

**APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS CON FINES DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES EN CUENCAS DE VENEZUELA**

Por:  
*José María Eterović Ruiz*

Trabajo de grado para optar al título de Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y  
Tierras mención Planificación de Recursos Hidráulicos

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

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO  
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
MÉRIDA, VENEZUELA  
2008

C.C.Reconocimiento

**A mi Familia: Isabel, Sofía y el/la personita que aún no conocemos.**

**A mi Papa, se que esto te tiene muy contento, te extraño mucho.**

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

C.C.Reconocimiento

# INDICE

INDICE.....	i
INDICE DE TABLAS.....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vii
CAPITULO 1 INTRODUCCION.....	I
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPITULO 2    METODOLOGIA.....	3
CAPITULO 3    REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 HISTORIA DEL MODELAJE HIDROLÓGICO.....	4
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	5
3.2.1 Modelos Físicos y Matemáticos.....	5
3.2.2 Tipos de modelos Matemáticos.....	6
3.2.3 Otras Clasificaciones.....	7
CAPITULO 4    MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL ESCURRIMIENTO.....	11
4.1 ETAPAS DE LA MODELACION HIDROLÓGICA.....	11
4.1.1 REVISIÓN Y ESTUDIO DEL MODELO.....	11
4.1.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA.....	11
4.1.3 INTRODUCCION DE DATOS AL MODELO.....	11
4.1.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	12
4.1.5 VALIDACIÓN DE LA CALIBRACION DEL MODELO.....	13
4.2 MÉTODOS DE CÁLCULO.....	13
4.2.1 PRECIPITACIÓN EFECTIVA.....	13
4.2.2 MODELACION DEL ESCURRIMIENTO.....	21
CAPITULO 5    REVISION DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA EVENTOS.....	30
5.1 WINHSPF.....	30
5.1.1 Descripción General.....	31
5.1.2 Requerimientos de información.....	33
5.1.3 Salida.....	34
5.1.4 Aplicaciones.....	34
5.2 HEC-HMS.....	35
5.2.1 Descripción General.....	35
5.2.2 Requerimientos de información.....	38
5.2.3 Salida.....	40
5.2.4 Aplicaciones.....	40

5.3	EVENTO.....	40
5.3.1	Descripción General.....	41
5.3.2	Requerimientos de información .....	42
5.3.3	Salida.....	42
5.3.4	Aplicaciones .....	42
5.4	TETIS.....	43
5.4.1	Descripción General.....	43
5.4.2	Requerimientos de información .....	45
5.4.3	Salida.....	46
5.4.4	Aplicaciones .....	46
5.5	HBV .....	46
5.5.1	Descripción General.....	47
5.5.2	Requerimientos de información .....	47
5.5.3	Salida.....	49
5.5.4	Aplicaciones .....	49
5.6	SUSHI .....	49
5.6.1	Descripción General.....	50
5.6.2	Requerimientos de información .....	50
5.6.3	Salida.....	50
5.6.4	Aplicaciones .....	51
CAPITULO 6      MODELOS SELECCIONADOS .....		52
6.1	TABLA DE COMPARACION.....	52
6.2	MODELOS SELECCIONADOS.....	54
6.3	INFORMACION REQUERIDA POR MODELOS SELECCIONADOS.....	54
6.3.1	HEC-HMS .....	55
6.3.2	EVENTO.....	55
6.3.3	WinHSPF .....	55
CAPITULO 7      RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LAS CUENCAS SELECCIONADAS .....		56
7.1	CUENCAS SELECCIONADAS.....	56
7.2	INFORMACIÓN RECOPIADA.....	56
7.2.1	CUENCA DEL RIO BOCONÓ.....	56
7.2.2	MICROCUENCA LA VALENCIA.....	58
7.3	EVENTOS SELECCIONADOS PARA LA MODELACIÓN.....	60
CAPITULO 8      MODELACION DE LAS CUENCAS SELECCIONADAS .....		61
8.1	MODELACION CON EL MODELO HEC-HMS.....	61
8.1.1	MODELACION DE LA CUENCA DEL RIO BOCONÓ CON EL MODELO HEC-HMS.....	61
8.1.2	MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO HEC-HMS.....	66
8.2	MODELACION CON EL MODELO WinHSPF .....	72
8.2.1	MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ CON EL MODELO WinHSPF .....	72
8.2.2	MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO WinHSPF .....	76
8.3	MODELACION CON EL MODELO EVENTO.....	77
8.3.1	MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ CON EL MODELO EVENTO.....	77
8.3.2	MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO EVENTO.....	81

8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
CAPITULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	90
9.1 CONCLUSIONES .....	90
9.2 RECOMENDACIONES .....	92
BIBLIOGRAFIA.....	94
WEBGRAFÍA.....	96
ANEXOS	
ANEXO A – TABLAS DE CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN EFECTIVA	
ANEXO B – DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS	
ANEXO C – USO DE LOS MODELOS	
ANEXO D – EJEMPLO ARCHIVOS DE ENTRADA	
ANEXO E – INFORMACIÓN EN DIGITAL	

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

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE .....	15
TABLA 2. APLICACIONES DEL WINHSPF .....	34
TABLA 3. DIFERENTES TIPOS DE INFORMACIÓN DE ENTRADA DEL MODELO HEC-HMS .....	39
TABLA 4. APLICACIONES POTENCIALES DEL HEC-HMS .....	40
TABLA 5. APLICACIONES POTENCIALES DEL EVENTO.....	43
TABLA 6. APLICACIONES DEL MODELO TETIS .....	46
TABLA 7. USOS POTENCIALES DEL MODELO HBV .....	49
TABLA 8. APLICACIONES DEL SUSHI .....	51
TABLA 9. COMPARACIÓN DE MODELOS .....	53
TABLA 10. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ.....	57
TABLA 11. ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZADA DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ .....	57
TABLA 12. INFORMACIÓN DIGITA DISPONIBLE DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ .....	58
TABLA 13. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA .....	59
TABLA 14. ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZADA DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA .....	59
TABLA 15. INFORMACIÓN DIGITA DISPONIBLE DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA .....	60
TABLA 16. EVENTOS SELECCIONADOS PARA CADA CUENCA.....	60
TABLA 17. DATOS DE CADA SUBCUENCA DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ PARA EL MODELO HEC-HMS .....	62
TABLA 18. DATOS DE CADA SUBCUENCA DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA PARA EL MODELO HEC-HMS .....	68
TABLA 19. DATOS DE CADA CANAL DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA PARA EL MODELO HEC-HMS .....	68
TABLA 20. DATOS DE CADA SUBCUENCA DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ PARA EL MODELO EVENTO .....	78
TABLA 21. DATOS DE CADA SUBCUENCA DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA PARA EL MODELO EVENTO .....	83
TABLA 22. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LAS CUENCAS SELECCIONADAS.....	86
TABLA 23. COMPARACIÓN DE FACILIDAD DE USO LOS MODELOS SELECCIONADOS .....	89

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DEL MODELO DE BENNETT (1998). (TOMADO DEL MANUAL DE REFERENCIA TÉCNICA HEC-HMS)	20
FIGURA 2. HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR DEL SCS	23
FIGURA 3. HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SNYDER A) HU ESTÁNDAR ( $T_p=5.5T_R$ ) B) HU REQUERIDO ( $T_{PR} \neq 5.5T_R$ )	24
FIGURA 4. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO WINHSPF EN SEGMENTOS PERMEABLES. (TOMADO DE HYDROCOMP, 1979)	32
FIGURA 5. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO WINHSPF EN SEGMENTOS IMPERMEABLES. (TOMADO DE HYDROCOMP, 1979)	33
FIGURA 6. ESQUEMATIZACIÓN DE UNA CUENCA EN EL HEC-HMS	36
FIGURA 7. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO HEC-HMS	37
FIGURA 8. ESQUEMATIZACIÓN DE UNA CUENCA EN EL MODELO EVENTO. (TOMADO DE DUQUE, 1981)	41
FIGURA 9. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO EVENTO	42
FIGURA 10. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO TETIS A NIVEL DE CELDA. (TOMADO DE VÉLEZ, 2001)	44
FIGURA 11. MOVIMIENTO HORIZONTAL PROPUESTO POR EL MODELO TETIS. (TOMADO DE VÉLEZ, 2001)	45
FIGURA 12. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE AGUA PARA EL MODELO HBV-96	48
FIGURA 13. UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ HASTA BOCONÓ	56
FIGURA 14. ESTACIONES UTILIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ	57
FIGURA 15. UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA	58
FIGURA 16. ESTACIONES INSTALADAS EN LA MICROCUENCA LA VALENCIA	59
FIGURA 17. ESQUEMATIZACIÓN RÍO BOCONÓ EN EL MODELO HEC-HMS	61
FIGURA 18. ESQUEMATIZACIÓN RÍO BOCONÓ PARA EL HEC-HMS	62
FIGURA 19. RESULTADOS DE LA PRIMERA SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ EN EL HEC-HMS	63
FIGURA 20. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN EN EL HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ	64
FIGURA 21. RESULTADOS DEL EVENTO EMPLEADO PARA LA VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ	65
FIGURA 22. ESQUEMATIZACIÓN MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL MODELO HEC-HMS	66
FIGURA 23. ESQUEMATIZACIÓN MICROCUENCA LA VALENCIA	67
FIGURA 24. RESULTADOS PRELIMINARES DE LA SIMULACIÓN DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL HEC-HMS	69
FIGURA 25. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL HEC-HMS	70

FIGURA 26. RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL HEC-HMS.....	71
FIGURA 27. UTILIZANDO EL MAPWINDOW PARA EL WINHSPF .....	73
FIGURA 28. ESQUEMA DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ EN EL MODELO WINHSPF .....	74
FIGURA 29. SALIDA DEL MODELO WINHSPF PARA LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ .....	74
FIGURA 30. SALIDA DEL MODELO WINHSPF PARA LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ DESPUÉS DE LA CALIBRACIÓN .....	75
FIGURA 31. SALIDA DEL MODELO WINHSPF PARA LA VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ.....	76
FIGURA 32. ESQUEMATIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ EN EL MODELO EVENTO .....	77
FIGURA 33. SALIDA DE LA PRIMERA CORRIDA DEL MODELO EVENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ.....	79
FIGURA 34. RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EVENTO PARA EL RÍO BOCONÓ .....	80
FIGURA 35. RESULTADO DE LA MODELACIÓN DEL EVENTO DEL 22 AL 29 DE JUNIO DEL RÍO BOCONÓ EN EL MODELO EVENTO.....	81
FIGURA 36. ESQUEMATIZACIÓN DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL MODELO EVENTO.....	82
FIGURA 37. RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EVENTO PARA LA MICROCUENCA LA VALENCIA .....	84
FIGURA 38. RESULTADO DE LA MODELACIÓN DEL EVENTO DEL 11 DE DICIEMBRE DE 1981 DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA EN EL MODELO EVENTO .....	85

www.bdigital.ula.ve



## AGRADECIMIENTO

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración y apoyo de muchas personas, a las cuales quisiera expresar mi agradecimiento.

Al Ministerio de Ciencias y Tecnología por el apoyo económico para la realización de este trabajo de grado.

Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT), por el apoyo económico para la realización de este trabajo de grado.

A todos los profesores del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de Los Andes, que siempre estuvieron listos a brindar su ayuda.

A todo el personal del CIDIAT, mis amigos, quienes me brindaron su ayuda de una u otra manera. En especial a Pedro, Germán y Merino que me hicieron los días más agradables en el laboratorio de computación.

A la Profesora Ángela Henao. Gracias a su paciencia, amistad y conocimientos este trabajo culminó con la mejor calidad posible.

Al Profesor Roberto Duque por todo el conocimiento y amistad compartidos.

A mi Papa, sin su apoyo no estaría entregando este trabajo.

A toda mi familia por todo su apoyo.

Cristy y Ro, gracias por todo su apoyo y cariño.

A mi Familia: Isabel y Sofía, por todo su amor, apoyo y aliento. Sin ustedes nada de esto tendría sentido.

## **Capítulo 1**

### **INTRODUCCION**

Para prevenir, y minimizar en el futuro, pérdidas materiales y especialmente humanas a causa del desbordamiento de quebradas y ríos, la implementación de un programa de prevención de desastres es una medida necesaria y deseable en cualquier país.

Dada la envergadura de un proyecto como este no puede esperarse que sea implementado, al menos en su totalidad, a corto plazo, y se requerirá el esfuerzo y compromiso conjunto de varias instituciones.

Como parte de este gran proyecto deben hacerse muchas mejoras en el pronóstico meteorológico general y en el pronóstico hidrometeorológico. Para ello es primordial desarrollar la capacidad de realizar pronósticos que permitan al Sistema Nacional de Protección Civil tomar decisiones operativas en función de:

- La cantidad de lluvia esperada.
- Los efectos que dicha lluvia pueda ocasionar.

Actualmente se está desarrollando el proyecto denominado “Implementación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres” entre el Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la Universidad Central de Venezuela (UCV) junto con el Centro Interamericano de Desarrollo Ambiental y Territorial (CIDIAT) y la participación de instituciones como el Ministerio del Poder Popular del Ambiente (MPPA), Electrificación del Caroní (CVG EDELCA) y la Fuerza Aérea Venezolana (FAV).

Esta investigación permitirá que Venezuela cuente con al menos un modelo meteorológico y un modelo hidrológico operativos para la prevención de desastres. El CIDIAT en este caso es el responsable de llevar adelante la investigación relacionada con el componente hidrológico.

Es por todo esto que, como parte del mencionado proyecto de investigación, se desea realizar una revisión de los principales modelos existentes para seleccionar el más prometedor en cuanto su uso y adaptación a las condiciones físicas de la cuenca y disponibilidad de datos. Es así que este trabajo se centra en la selección e implementación de un modelo hidrológico en una cuenca del país, que pueda ser utilizado en otras cuencas similares del país.

#### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Venezuela se tienen experiencias lamentables relacionadas con el agua, dado que en los últimos años ocurrieron dos grandes eventos meteorológicos que trajeron mucho dolor al pueblo venezolano.

El más grande fue el catástrofe de Vargas el año 1999, en el cual una serie de lluvias sucedieron en todo el país, en especial en la zona costera central, provocando grandes crecidas en varias cuencas de la zona, lo que sumado a la mala ubicación de la población que había invadido los conos de deyección de dichas cuencas, resultó en un completo desastre, que concluyó con la pérdida de vidas humanas, viviendas y bienes de muchas familias, afectando directamente e indirectamente a casi medio millón de personas en todo el país.

En el año 2005 se presentó otra serie de lluvias por todo el país, pero en esta ocasión donde tuvo peores consecuencias fue en la cuenca del río Mocotíes, en el Estado Mérida, donde principalmente afectó a las poblaciones de Tovar, Bailadores y Santa Cruz de Mora, quedando unas 16.000 personas damnificadas.

Un factor muy peligroso al enfrentar estos fenómenos naturales en Venezuela, es que no se cuenta con herramientas de pronóstico de inundaciones que permita trabajar al sistema de alarma adecuadamente, por lo que no se puede alertar oportunamente a las autoridades para que estas puedan actuar a tiempo para minimizar las pérdidas humanas y económicas.

A raíz de estos acontecimientos, y en previsión de eventos similares se desarrollaron sistemas de alarma temprana, que se espera ayuden a evitar desastres de esta magnitud en el futuro.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Contar con un modelo hidrológico operativo y probado en la cuenca seleccionada y disponible para emplearse en otras cuencas de Venezuela.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar el modelo de evento más idóneo para el proyecto.
- Calibrar el modelo y realizar una validación en base a una cuenca con datos conocidos.

## **Capítulo 2**

### **METODOLOGIA**

Para lograr los objetivos planteados se siguió la siguiente metodología:

#### **1. Revisión bibliográfica**

Esto es, una revisión de varios modelos para comparar sus virtudes y limitaciones en función de la realidad de las cuencas en Venezuela.

#### **2. Selección del modelo.**

Con base a la revisión realizada se escogieron los modelos de evento que más se adaptan a las condiciones físicas de las cuencas seleccionadas y a la disponibilidad de datos.

#### **3. Análisis del Modelo**

Una vez seleccionados los modelos se llevó a cabo el análisis de estos, para entender cómo trabaja su base teórica y aprender a manejarlos apropiadamente.

#### **4. Recopilación y validación**

Se buscó y recopiló la información necesaria para llevar a cabo la calibración y validación de los modelos en las cuencas empleadas. Estos datos pueden contener datos corruptos y/o datos faltantes, que deben ser depurados, por lo que se realizó un proceso de preparación de datos aplicándose distintos métodos de validación y relleno.

#### **5. Calibración y verificación del Modelo**

Entre los datos de cada una de las cuencas seleccionadas se escogieron dos periodos de tiempo distintos, cada uno correspondiente a un evento extremo, una para realizar la calibración del modelo y otra para la verificación de la misma. Todo esto para asegurar un correcto desempeño del modelo en la cuenca seleccionada.

#### **6. Análisis de resultados**

Los resultados obtenidos se analizaron para determinar cuan buenos son y si cumplen con todas las expectativas. Una vez realizado este análisis se hizo la selección final del software.

#### **7. Elaboración de las conclusiones y recomendaciones**

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

## Capítulo 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 HISTORIA DEL MODELAJE HIDROLÓGICO

Se puede definir el término “modelo” como una representación simplificada del mundo real, que permite tener una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias. En el caso de los modelos hidrológicos se intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio, generalmente una cuenca, que transforman una precipitación en escorrentía.

Podría decirse que la historia del modelaje se remonta al año 1851 cuando el ingeniero irlandés Thomas James Mulvaney publicó la famosa ecuación conocida como el método racional:

$$Q_p = CIA \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

- $Q_p$  : caudal pico del hidrograma.
- $C$  : coeficiente empírico.
- $I$  : intensidad de la lluvia.
- $A$  : área de la cuenca.

El coeficiente  $C$  es el que representa los procesos de escurrimiento y tránsito que ocurren en la cuenca, y varía de cuenca en cuenca, según las condiciones físicas, de humedad antes del evento y de la distribución temporal de la lluvia. Para obtener su valor, es decir, calibrar el modelo, se comparan los valores medidos de caudales pico para un evento con los obtenidos por la ecuación hasta obtener un coeficiente que genere la mínima diferencia.

Este es un modelo muy sencillo, pero ofrece solo una idea de lo que podría esperarse ante un evento, además que solamente modela caudales pico.

A partir de entonces distintos investigadores presentaron sus modelos en un intento de llegar a una mejor aproximación a los valores reales y mayor detalle de los distintos procesos. Por ejemplo el año 1921 Ross plantea la división de la cuenca en base a tiempos de viaje, buscando tomar en cuenta la distribución espacial de los parámetros y/o procesos hidrológicos. A partir de esta idea Clark formuló en el año 1945 el procedimiento del hidrograma unitario instantáneo.

Con la invención de la computadora en la década de 1950 se introdujo una poderosa herramienta que permite realizar cálculos de forma automatizada y rápida.

Desde entonces los modelos hidrológicos evolucionaron aprovechando las ventajas que le ofrecen las computadoras, de allí que a medida que la capacidad de almacenamiento y velocidad de las

computadoras aumentaba los modelos hidrológicos se hicieron más complejos con el fin de representar de la mejor manera posible los distintos procesos hidrológicos.

Uno de los primeros y más conocidos modelos es el Stanford Watershed Model formulado por Linsley y Crawford en la Universidad de Stanford en el año 1966, en base al cual se desarrolló más adelante el Hydrocomp Simulation Program, HSP, que incorporaba el modelaje del transporte de sedimentos y la calidad del agua, y este se convirtió en el año 1976 en el modelo Hydrologic Simulation Program – Fortran, HSPF, que trabaja en entorno MS-DOS y que es gratuito. Más tarde se desarrollaron en base a este modelo varias versiones que permiten una mejor interacción aprovechando el entorno Windows. Una de estas versiones es el WinHSPF distribuido como parte del BASINS de la US Environmental Protection Agency, EPA.

Así como este modelo, una gran cantidad de otros modelos fueron desarrollados y actualizados a lo largo de estas cinco décadas de modelaje hidrológico asistido por computadora, como el HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, el TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia y el SWAT del Servicio de Investigación de Agricultura de los Estados Unidos, entre otros.

## 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

### 3.2.1 Modelos Físicos y Matemáticos

En principio los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes grupos (Ponce, 1989):

- ***Modelos Físicos***

Los modelos físicos son representaciones físicas simplificadas del prototipo. Ejemplos de estos modelos son representaciones a escala de la cuenca o los simuladores de lluvia. Estos modelos son caros y deben construirse especialmente para el caso de estudio.

- ***Modelos Matemáticos***

Un modelo matemático es una abstracción matemática del prototipo que preserva propiedades importantes de este. Los modelos matemáticos son relativamente más baratos, flexibles, y existen una gran variedad ya desarrollados y listos para ser usados, ya sea haciendo o no algunas modificaciones a este para ajustarlo a las condiciones del caso en estudio.

### 3.2.2 Tipos de modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados según Ponce (1989) de la siguiente manera:

- ***Determinísticos***

Los modelos determinísticos son ecuaciones diferenciales formuladas siguiendo las leyes físicas y químicas de los procesos descritos. En estos modelos existe una relación de causa/efecto entre los parámetros y los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones. En la práctica estos modelos están limitados por su incapacidad para resolver la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos en intervalos suficientemente pequeños.

- ***Probabilísticos***

Los modelos probabilísticos pueden ser de dos tipos:

***Estadísticos:*** Estos modelos toman en cuenta los parámetros estadísticos de las variables que se desean generar, obtenidos de una serie de valores observados de cada variable.

***Estocásticos:*** Los modelos estocásticos, al igual que los estadísticos, generan valores para cada variable en base a sus parámetros estadísticos, pero toman en cuenta adicionalmente la dependencia que tiene la variable en el tiempo, espacio e incluso con otras variables.

- ***Conceptuales***

Los modelos conceptuales son representaciones matemáticas simplificadas de los procesos físicos, que simulan procesos complejos utilizando pocos parámetros claves.

- ***Paramétricos***

Estos modelos representan los procesos en base a parámetros empíricos contenidos en ecuaciones algebraicas que contiene uno o más parámetros. Para cada caso en particular se debe encontrar el juego de parámetros que mejor se ajusta, proceso al cual se denomina calibración.

Estos modelos son la forma más sencilla y económica de realizar una modelación. En la actualidad son el tipo de modelo más utilizado.

### 3.2.3 Otras Clasificaciones

Los modelos Hidrológicos también pueden ser clasificados según las siguientes características (Ponce,1989):

- Según sean lineales y no lineales
- Según la variación de parámetros en el tiempo
- Según su distribución espacial
- Según el tipo de función matemática
- Según el tipo de solución matemática
- Según la continuidad del tiempo

- ***Modelos Lineales y no lineales***

Los procesos físicos en la naturaleza por lo general no son lineales, pero al momento de modelarlos uno puede escoger utilizar expresiones matemáticas lineales o no lineales.

#### *Modelos lineales*

Los modelos lineales son los que simplifican la representación de los procesos llevándolos a una forma lineal, tienen la ventaja de ser sencillos pero a costa de perder cierta precisión y detalle en la simulación.

#### *Modelos no lineales*

Los modelos no lineales tienen un nivel de detalle mucho mayor en cuanto al proceso de simulación de la cuenca, pero su solución es mucho más compleja.

- ***Modelos según la variación de parámetros en el tiempo***

Los modelos se dividen según la variación de parámetros en el tiempo en:

#### *Variables en el tiempo*

Estos modelos permiten la variación en el valor de sus parámetros a lo largo del tiempo. Un ejemplo se puede ver en un modelo de almacenamiento de embalses de la siguiente forma  $S=K(t)O$ , donde la constante de almacenamiento del embalse  $K$  es función del tiempo.



### *Invariables en el tiempo*

Estos modelos son aquellos en los que sus parámetros se mantienen constantes en el tiempo. Siguiendo el mismo ejemplo del caso anterior se puede realizar el modelaje del reservorio con un valor constante de K. La mayoría de los modelos utilizados en la actualidad corresponden a este tipo.

- ***Modelos según su distribución espacial***

Los modelos según la distribución espacial de parámetros pueden ser:

#### *Agregados*

En la naturaleza las características físicas de una cuenca no son homogéneas, en los modelos agregados los parámetros asociados a estas características no cambian espacialmente dentro de la cuenca, es decir, se supone un valor típico o medio para toda la cuenca.

#### *Distribuidos*

Estos modelos permiten variar el valor de sus parámetros espacialmente dentro de la cuenca. Es por esta razón que el nivel de detalle es mucho mayor, pero también requiere una mayor cantidad y calidad de datos que crece a medida que se aumenta el nivel de detalle.

#### *Semi-distribuidos*

Estos modelos dividen la cuenca en sub-cuencas, las cuales a su vez son modeladas de manera agregada a pesar de no ser homogéneas.

- ***Modelos según el tipo de función matemática***

Matemáticamente una función puede ser continua o discreta, es entonces que los modelos pueden ser:

#### *Continuos*

Son los modelos presentados en forma de funciones continuas, es decir que tienen derivada en cualquier punto de su dominio, como por ejemplo el hidrograma de una cuenca.

### *Discretos*

Estos modelos al contrario de los anteriores se expresan con funciones discretas que no tienen solución en cualquier punto, si no solo en ciertos puntos predeterminados.

- ***Modelos según el tipo de solución matemática***

En esta clasificación se tienen los siguientes tipos:

### *Analíticos*

Estos modelos utilizan métodos analíticos para llegar a una solución, es decir, herramientas de la matemática clásica. Para estos métodos se necesita obtener las condiciones iniciales y de borde analíticamente. Suelen ser muy difíciles de usar desde el punto de vista matemático, a menos que se simplifique en gran medida la realidad, por esta razón se tiende a recurrir al uso de modelos numéricos.

### *Numéricos*

En estos modelos se utilizan métodos numéricos para encontrar la solución, tales como diferencias finitas, elementos finitos, o cualquier método que discretice el dominio de la solución. Este tipo de solución es el más utilizado ya que se ajustan mejor a condiciones iniciales y de borde determinados arbitrariamente, que es el caso típico.

- ***Modelos según continuidad del tiempo***

En esta clasificación se puede dividir los modelos en los siguientes tipos:

### *Evento*

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 entre eventos, por lo que no sirven para simular periodos secos (sin lluvia).

Para este proyecto interesa este tipo de modelos en particular, ya que se desea calcular caudales pico y manchas de inundación en base a eventos extremos.

### *Continuos*

Los modelos continuos realizan la 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, sub-superficial 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.

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

## **Capítulo 4**

### **MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL ESCURRIMIENTO**

En este trabajo se buscan modelos que sean capaces de procesar los datos generados utilizando métodos de pronóstico meteorológico con el fin de determinar áreas con riesgo de inundación, información que puede ser utilizada para dar la alerta y llevar a cabo procedimientos de evacuación y prevención de desastres. Es por esto que este trabajo se centra en la modelación de eventos extremos.

A continuación se detallan las etapas de la modelación hidrológica de eventos y algunos de los métodos de cálculo disponibles para llevar a cabo ésta.

#### **4.1 ETAPAS DE LA MODELACION HIDROLÓGICA**

Para la modelación del escurrimiento de una cuenca se deben pasar por las siguientes etapas:

- Revisión y estudio del modelo.
- Recopilación de la información necesaria.
- Introducción de datos al modelo.
- Calibración.
- Validación de la calibración.
- Uso del modelo para los fines propuestos.

##### **4.1.1 REVISIÓN Y ESTUDIO DEL MODELO**

En esta etapa se debe estudiar el funcionamiento del modelo. Para esto se necesita ver como está conceptualizado e identificar y estudiar los métodos hidráulicos, hidrológicos y matemáticos que utiliza y sus respectivos parámetros. De esta manera se podrán identificar sus debilidades y fortalezas, así como la información que este necesita y el formato en que se requiere esta.

##### **4.1.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA**

Una vez que se determina cual es la información que necesita el modelo para realizar la simulación, esta debe ser recopilada y preparada.

##### **4.1.3 INTRODUCCION DE DATOS AL MODELO**

El modelo puede contar con un interfaz de introducción de datos manual o simplemente puede ser que se alimente por medio de un archivo preparado por el usuario con un formato específico.

#### 4.1.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para realizar la calibración se debe escoger un periodo de tiempo en el que se tenga buena información de precipitación y su correspondiente registro de caudales a la salida de la cuenca.

La calibración del modelo consiste en un proceso de ensayo y error, en el que se cambia el valor de uno o varios parámetros con el fin de ajustar el hidrograma de salida del programa al hidrograma observado para la precipitación utilizada, de modo de poder determinar el juego de parámetros del modelo que reflejan con mayor exactitud el comportamiento de la cuenca.

Al realizar la simulación de eventos el usuario puede intentar ajustar con la calibración del modelo, principalmente, alguna de las siguientes características del hidrograma:

- Pico máximo.
- Tiempo al pico.
- Forma del hidrograma.
- Volumen total.

Cada una de estas características está relacionada con alguna propiedad del resultado de la modelación hidráulica del río, realizada a partir del hidrograma simulado.

El pico máximo está relacionado con el tamaño y forma de la mancha de inundación generada, determinado la zona afectada por el evento.

El volumen total se relaciona con el tiempo que permanecerá inundada la zona afectada.

El tiempo al pico determina cuanto tiempo transcurrirá desde el inicio del evento hasta que la mancha de inundación alcance su máxima extensión.

Finalmente la forma del hidrograma determina la distribución del volumen total en el tiempo, relacionando la forma y tamaño de la mancha de inundación con el tiempo. Esta relación, en el caso de tener una buena aproximación de volumen total escurrido, permite determinar el momento y la duración de la inundación en un punto específico en la zona afectada por el evento. Generalmente la forma del hidrograma se relaciona con la forma en afectará al lecho del río el evento en estudio.

Pensando en estas relaciones se pueden deducir las siguientes afirmaciones:

Si se calibra al pico máximo dejando el volumen generado muy por debajo del observado, se podrá determinar hasta dónde llegará la mancha de inundación pero no así cuanto tiempo quedará cubierta de agua la zona.

El tiempo al pico es importante para saber cuánto tiempo se dispone para llevar a cabo los trabajos de contingencia. La calibración de este tiempo, por lo general, depende de cuan discretizada se tiene la representación de la cuenca; por lo tanto mejorarla demanda mayor volumen de información.

En cuanto a la forma del hidrograma, permite visualizar de manera rápida cuán bien se simuló el evento en general, pero una calibración en función de esta no garantiza una buena calibración de volumen total, pico máximo ni tiempo al pico; excepto por el caso en que se tenga bien calibrado también el pico máximo, ya que por lógica el volumen total también queda calibrado.

Para evaluar el ajuste entre el hidrograma simulado y el observado se pueden utilizar varias pruebas, como la diferencia en porcentaje de volumen total producido o la diferencia en porcentaje entre los picos máximos.

#### **4.1.5 VALIDACIÓN DE LA CALIBRACION DEL MODELO**

Es el proceso que permite establecer la confiabilidad de predicción del modelo. La validación consiste en realizar la simulación de la cuenca en estudio, utilizando los parámetros establecidos con la calibración, con datos de precipitación y caudal de un periodo diferente al usado para la calibración.

Una vez realizada la simulación se realiza el análisis de comparación entre el hidrograma simulado y el observado. Si las pruebas aplicadas arrojan resultados similares a los obtenidos en la calibración, entonces la calibración del modelo se considera validada y el modelo queda listo para ser usado.

### **4.2 MÉTODOS DE CÁLCULO**

Para cada cálculo necesario en la modelación hidrológica e hidráulica existen muchos métodos disponibles. A continuación se presenta una descripción de los métodos más utilizados para calcular la precipitación efectiva y para la simulación de escurrimiento y escorrentía.

#### **4.2.1 PRECIPITACIÓN EFECTIVA**

De la lluvia total precipitada en una tormenta sobre una cuenca, solo una fracción escurre por las vertientes hasta llegar al río. Esta reducción del volumen se debe a que una parte es interceptada por las hojas de árboles, techos, y otros, evaporándose más tarde; otra parte llega al suelo pero se infiltra o se acumula en irregularidades del terreno formando charcos que se evaporan. El agua que finalmente llega hasta el río se llama precipitación efectiva.

Los métodos más utilizados para calcular la precipitación efectiva son los siguientes:

- Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de EUA (SCS)
  - Método del Índice de Infiltración Constante y Pérdida Inicial. (initial and constant-rate loss model)
  - Método del Índice de Infiltración Constante y Déficit. (deficit and constant-rate model)
  - Modelo de Infiltración de Green y Ampt
  - Modelo de Infiltración de Conteo de Humedad de Suelo
- **Método del número de curva (CN) del SCS**

El método del número de curva no sirve para modelación continua, sólo para la modelación de eventos.

Este método estima la precipitación efectiva como una función de la precipitación, cobertura, uso de suelo, humedad antecedente, condición hidrológica y tipo de suelo.

Las ecuaciones utilizadas para este cálculo son las siguientes:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (\text{ec. 2})$$

$$Pe = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

- S: Infiltración potencial (mm)
- CN: Numero de curva
- Pe: Precipitación efectiva (mm)
- P: Precipitación media sobre la cuenca (mm)

La infiltración potencial depende de factores edáficos, de las condiciones de la superficie del suelo y de la humedad antecedente, y su valor máximo puede considerarse igual a la capacidad útil del almacenamiento de humedad del suelo. Mientras la precipitación media sobre la cuenca no exceda las pérdidas iniciales, la precipitación efectiva será cero.

El valor del número de curva va desde 100, para cuerpos de agua, hasta 30, para suelos permeables con un índice de infiltración elevado. El SCS elaboró tablas del número de curva, donde lo relaciona con la cobertura vegetal, el uso del suelo, la condición

hidrológica, la humedad antecedente y el tipo de suelo. Estas tablas se presentan en el Anexo A.

La condición hidrológica se refiere al grado de cobertura vegetal, cuanto más densa es la cobertura vegetal, mejor es su condición hidrológica, lo que significa mayor infiltración y por lo tanto menor es el valor del número de curva representativo de la escorrentía. Se consideran tres grados de condición hidrológica en función del porcentaje de área cubierta con vegetación nativa, estos son:

- condición hidrológica buena, más del 75% de cobertura.
- condición hidrológica regular, comprendido entre 50 y 75% de cobertura.
- condición hidrológica mala, menos del 50% de cobertura.

La humedad antecedente se refiere al estado de humedad del suelo antes de iniciarse la lluvia en estudio, considerando la cantidad de lluvia caída en el período de los cinco días anteriores a la tormenta. Se establecieron tres clases de Humedad Antecedente en función de esta cantidad de lluvia. Esta clasificación se presenta en la Tabla 1:

*Tabla 1. Condiciones de Humedad Antecedente*

Condición de Humedad Antecedente (CHA)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración
I	0.0 a 33,0 mm
II	33,0 a 52,5 mm
III	más de 52,5 mm

Los valores del número de curva presentados en la Tabla A.1.a del Anexo A corresponden a una humedad antecedente clase II, que corresponde a una condición de humedad antecedente promedio. Sin embargo, estos valores se pueden pasar a la condición I o a la condición III usando la Tabla A1.b o las ecuaciones siguientes:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)} \quad (\text{ec. 4})$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)} \quad (\text{ec. 5})$$



En el caso que se tenga una cuenca con muchos usos y tipos de suelo se puede dividir la cuenca en varias zonas, obtener el número de curva y el área para cada una y finalmente calcular el número de curva para la cuenca completa con el promedio ponderado por área utilizando la siguiente ecuación:

$$CN_c = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{\sum A_i} \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

- $CN_c$ : Número de curva de la cuenca.
- $CN_i$ : Número de curva de cada subdivisión.
- $A_i$ : Área de cada subdivisión.

Si se utiliza este método en la modelación de una cuenca se puede calibrar el modelo modificando el valor del número de curva, dentro de un rango de valores lógicos para dicha cuenca.

• **Método del índice de infiltración constante y pérdida inicial**

Es método del índice constante e inicial de pérdida es apto para la modelación de evento, mas no para la modelación continua.

Este método considera que el índice máximo de infiltración potencial ( $f_c$ ) es constante a lo largo de todo el evento. Entonces cuando la precipitación media en un intervalo de tiempo dado supera el valor de  $f_c$  empieza el escurrimiento.

También se consideran las pérdidas iniciales ( $I_a$ ) por intercepción y almacenamiento en depresiones. Mientras la precipitación acumulada no exceda las perdidas iniciales no habrá escurrimiento.

De todo lo anterior se puede deducir que el valor de la precipitación efectiva ( $Pe$ ), en un intervalo de tiempo dado ( $t$ ), puede calcularse por la siguiente expresión:

$$Pe_t = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum p_i < I_a \\ p_t - f_c & \text{si } \sum p_i > I_a \text{ y } p_t > f_c \\ 0 & \text{si } \sum p_i > I_a \text{ y } p_t < f_c \end{cases} \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

- $P_{e_t}$  Precipitación efectiva en el intervalo de tiempo t.
- $P_i$ : Precipitación acumulada.
- $I_a$ : Perdidas iniciales.
- $p_t$ : Precipitación media en el intervalo de tiempo t.
- $f_c$ : Índice de infiltración potencial.

En una cuenca en condición saturada, el valor de las perdidas iniciales se aproximará a cero. Por el contrario, si la cuenca está seca este valor representará la máxima profundidad de lluvia que puede precipitar sin generar escurrimiento, el cual dependerá de tipo y uso del suelo de la cuenca. En la Tabla A.2.a del Anexo A se tienen valores sugeridos para las perdidas Iniciales.

El valor índice de infiltración potencial fue estimado para distintos tipos de suelo (Skaggs y Khaleel, 1982), clasificados por el SCS. Estos valores se presentan en la tabla A.2.b del Anexo A.

Debido a que los valores del Índice de infiltración potencial ( $f_c$ ) y de pérdidas iniciales ( $I_a$ ) son estimaciones, estos pueden ser modificados a la hora de realizar la calibración del modelo, si se utiliza este método para calcular la precipitación efectiva.

• ***Método del índice de infiltración constante y déficit***

Este método es una variación cuasi-continua del método anterior. En este caso las pérdidas iniciales ( $I_a$ ) se pueden recuperar durante periodos secos a una tasa dada.

Entonces los parámetros de este modelo son:

- $I_a$ : Perdidas iniciales.
- $f_c$ : Índice de infiltración potencial.
- $r_c$ : Índice de recuperación.

El índice de recuperación está dado en mm/h, entonces al tenerse un periodo seco este determina la velocidad a la que se vacía nuevamente el suelo pasando el agua de este a formar parte de la precipitación efectiva.

• **Modelo de infiltración de Green y Ampt**

Este es un método no apto para simulación continua, solo para eventos aislados.

El modelo de infiltración de Green y Ampt (Mein y Larson 1973) está basado en la ecuación de Richards (Richards 1931, Eagleson 1970), la cual simula la infiltración de la lluvia a través del perfil de suelo y su capacidad de infiltración.

La ecuación de Richards se deriva de combinar la ley de Darcy para flujo no saturado con la ley de conservación de masas. Toma como hipótesis un suelo ideal homogéneo e infinito.

Este método considera que la infiltración se distribuye uniformemente en el suelo.

El cálculo de las pérdidas de precipitación en cada periodo de tiempo se realiza con la siguiente expresión:

$$f_t = K \left[ \frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

- $f_t$ : Pérdidas durante el periodo  $t$
- $K$ : Conductividad hidráulica del suelo saturado en  $mm/h$
- $\phi$ : Porosidad del suelo.
- $\theta_i$ : Contenido inicial de humedad del suelo.
- $S_f$ : Succión del frente húmedo
- $F_t$ : Pérdidas acumuladas hasta el periodo  $t$ .

Por lo tanto la Precipitación efectiva queda como:

$$Pe_t = Pt_t - f_t \quad (\text{ec. 9})$$

La conductividad hidráulica es el parámetro que expresa la velocidad a la que el agua se mueve a través de un suelo.

La porosidad expresa la relación entre volumen de vacíos y el volumen total del suelo.

La succión del frente húmedo es básicamente la succión debida al efecto de capilaridad. Mientras el suelo este más seco y sea de material más fino, mayor será el valor de  $S_f$ .

Estos tres parámetros pueden ser estimados en base a la Tabla A.3.a del Anexo A.

- **Modelo de infiltración de conteo de humedad de suelo**

Este es un modelo continuo tipo tanque, desarrollado por Bennett (1998) en base al modelo de Leavesley (1983).

En la Figura 1 se puede ver el esquematización de la cuenca para el modelo. Los componentes de esta esquematización son los siguientes:

- **Intercepción de la vegetación:** Representa toda la lluvia que no alcanza el suelo al ser capturada por la vegetación. Su única alimentación es la precipitación. El modelo llena primero este tanque en cuanto empieza la lluvia. Cuando se llena recién pasa a los demás tanques. El nivel de este tanque baja debido a la evaporación.
- **Retención en depresiones:** Es el volumen de agua que queda almacenado en las depresiones del suelo. El agua que se acumula en este tanque es aquella que no fue interceptada por la vegetación y que sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo. Cuando el nivel máximo de este es alcanzado en un intervalo de tiempo dado, el agua pasa al escurrimiento superficial formando la precipitación efectiva. Las salidas de este tanque son la evaporación y la infiltración.
- **Almacenamiento en el perfil del suelo:** Representa el agua almacenada en la capa superior del suelo. La entrada de agua de este tanque es la infiltración y su salida puede ser la evapotranspiración y/o la percolación. Esta capa está dividida en dos: la zona superior y la zona de almacenamiento en tensión. La primera representa el agua que ocupa los poros del suelo y la segunda el agua adherida a las partículas de suelo y que puede ser reducida sólo por la evapotranspiración cuando la zona superior ya no tiene agua.
- **Almacenamiento subterráneo:** En esta capa se representa el proceso horizontal del interflujo. Su entrada de agua es la percolación de la zona superior, y su salida es la percolación a la capa inferior o el flujo subterráneo. Este tanque puede estar dividido en dos tanques que se comportan igual. Cuando el agua pasa del segundo tanque a la percolación profunda se considera pérdida del sistema.

La infiltración potencial (*InfPot*) se calcula con la siguiente expresión:

$$InfPot = MaxInf - \frac{AlmSuelo_{inicial}}{AlmMaxSuelo} \cdot MaxInf \quad (ec. 10)$$

Donde:

- *InfPot*: Infiltración potencial.
- *MaxInf*: Infiltración máxima del suelo.
- *AlmSuelo<sub>inicial</sub>*: Almac. del suelo al comienzo del intervalo de tiempo t.
- *AlmMaxSuelo*: Almacenamiento máximo del suelo.

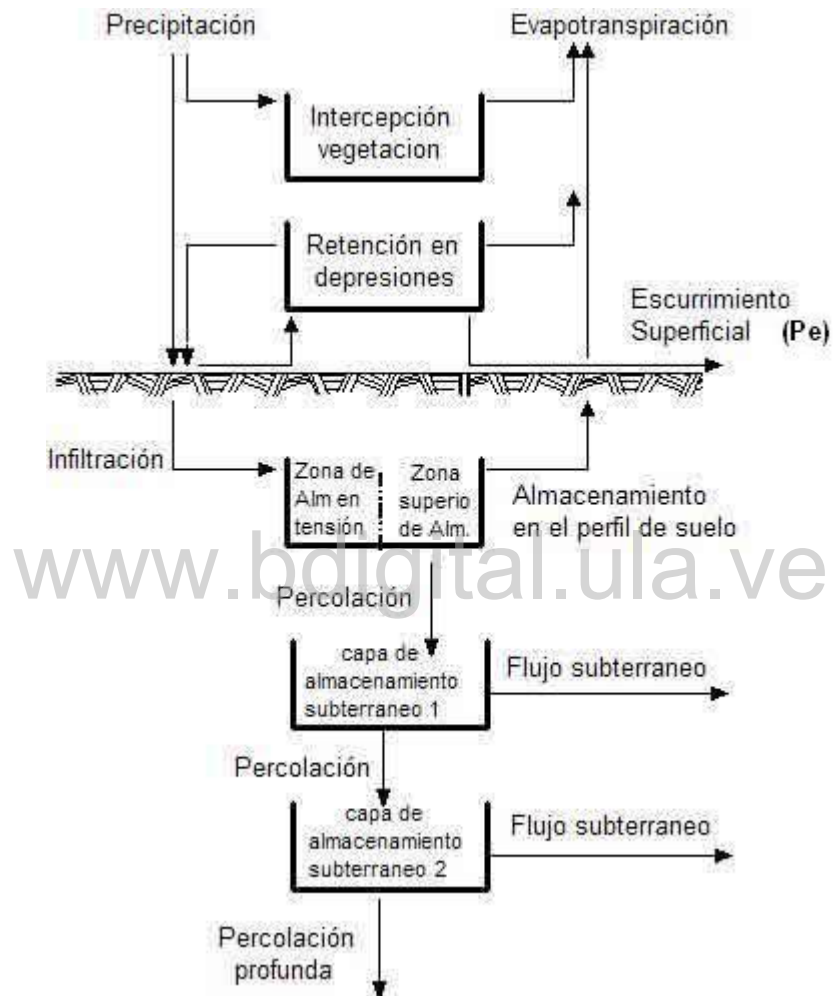


Figura 1. Esquema del modelo de Bennett (1998). (Tomado del Manual de Referencia técnica HEC-HMS)

Entonces la infiltración en el intervalo de tiempo actual ( $Inf_t$ ) está dada por:

$$Inf_t = \text{minimo} \begin{cases} InfPot_t \\ \text{Volumen disponible para infiltracion} \end{cases} \quad (\text{ec. 11})$$

Donde el volumen disponible para infiltración es el agua que no es interceptada por la vegetación y aquella que se encuentra almacenada en depresiones al principio del intervalo de tiempo.

Si el volumen disponible para infiltración excede la infiltración potencial, la diferencia pasa al almacenamiento en depresiones.

Entonces la Precipitación efectiva queda como sigue:

$$Pe_t = Pt_t - Inf_t \quad (\text{ec. 12})$$

#### 4.2.2 MODELACION DEL ESCURRIMIENTO

Los métodos descritos en este punto simulan el proceso de transformación de la precipitación efectiva en escurrimiento.

Existen dos tipos de modelos, los empíricos y los conceptuales. Los primeros son más simples y establecen una relación entre el escurrimiento y la precipitación efectiva sin entrar en mucho detalle en los procesos internos. Los modelos conceptuales intentan representar, dentro de lo posible, los procesos físicos que gobiernan el movimiento del agua proveniente de la precipitación efectiva sobre la superficie de la cuenca.

Los métodos más utilizados en cada categoría son los siguientes:

- Modelos empíricos:

- Hidrograma Unitario Triangular del SCS
- Hidrograma Unitario de Synder
- Hidrograma Unitario de Clark

- Modelos Conceptuales:

- Onda cinemática

- **Modelos empíricos**

El hidrograma unitario (HU) fue propuesto originalmente por Sherman (1932). Se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una unidad de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante durante un tiempo determinado. Se basa en el concepto de linealidad del proceso de escurrimiento, el

cual supone que el escurrimiento producido por una precipitación mayor o menor a una unidad, no es más que un múltiplo del hidrograma de una unidad de lluvia.

Teniendo el hidrograma unitario y la precipitación efectiva de un evento en una cuenca se puede calcular el hidrograma de dicho evento con la siguiente expresión:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{ec. 13})$$

Donde:

- $Q_n$ : Escorrentía directa.
- $P_m$ : Precipitación efectiva.
- $U$ : Ordenadas del hidrograma unitario
- $n$ : Pulso de escorrentía
- $m$ : Pulso de precipitación efectiva
- $M$ : Número total de pulsos de precipitación efectiva.

Por pulso se refiere a los intervalos de tiempo en que se discretiza el evento. Se debe tener cuidado de tener los intervalos de tiempo del histograma y del hidrograma unitario iguales.

Para poder utilizar un hidrograma unitario se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. La precipitación efectiva debe estar espacialmente distribuida de forma uniforme y tener una intensidad constante durante el intervalo de tiempo.
2. El tiempo base de los hidrogramas correspondientes a precipitaciones de una misma duración es constante.
3. Las ordenadas de todos los hidrogramas correspondientes a precipitaciones de una misma duración son directamente proporcionales al volumen efectivo precipitado.
4. El hidrograma resultante de una precipitación efectiva dada es independiente al tiempo en el que ocurre y de la lluvia antecedente.

Estas suposiciones no se cumplen de forma perfecta en condiciones naturales. Sin embargo, si se logra cumplirlas de forma aproximada, los resultados obtenidos con este método generalmente serán aceptables para propósitos prácticos (Heerdegen, 1974).

Un hidrograma unitario es válido solamente en el punto de la corriente donde se midió la información de caudales a partir de la cual se desarrollo. Existe un procedimiento para desarrollar hidrogramas en otros puntos de la corriente de la misma cuenca o de cuencas adyacentes de carácter similar, estos se llaman hidrogramas sintéticos. Existen tres tipos: 1) los basados en hidrogramas unitarios adimensionales (SCS, 1972), 2) los que relacionan el

hidrograma con las características de la cuenca (Snyder, 1938), y 3) los basados en modelos de almacenamiento de la cuenca (Clark, 1943).

### Hidrograma Unitario Triangular del SCS

El hidrograma triangular del SCS está basado en hidrogramas unitarios desarrollados para un gran número de pequeñas cuencas rurales de Estados Unidos.

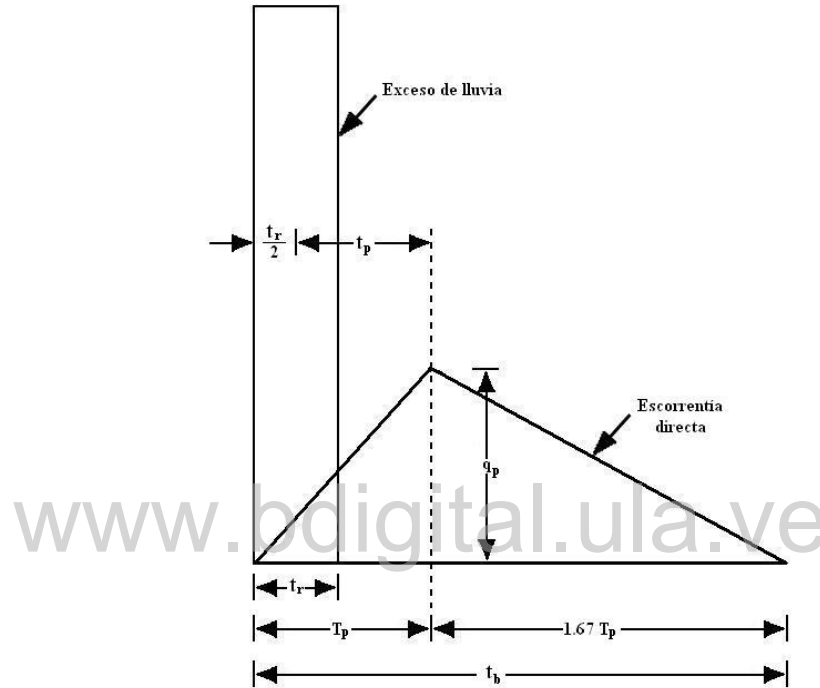


Figura 2. Hidrograma unitario triangular del SCS

En la Figura 2 se puede ver la esquematización de este modelo. Donde:

- $q_p$ : Caudal pico en  $m^3/s-cm$
- $T_p$ : Tiempo al pico en horas
- $t_p$ : Tiempo de retardo en horas
- $t_r$ : Duración de la precipitación efectiva en horas
- $t_b$ : Tiempo base del hidrograma en horas

Para calcular los diferentes componentes de este hidrograma el SCS propone las siguientes expresiones:

$$q_p = 2.08 \cdot \frac{A}{T_p} \quad (\text{ec. 14})$$



$$t_p = 0.6 \cdot T_c \quad (\text{ec. 15})$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (\text{ec. 16})$$

donde  $T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca, que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$T_c = 0.9545 \cdot \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{ec. 17})$$

Donde:

- $L$ : Longitud del tramo, kilometros
- $H$ : Diferencia de cotas del tramo, metros
- $T_c$ : Tiempo de concentración, horas

### Hidrograma Unitario de Snyder

Snyder (1938), basado en varias cuencas de los Estados Unidos con áreas que oscilaban entre 30 y 30.000 Km<sup>2</sup>, encontró relaciones sintéticas para algunas características de un hidrograma estándar que sirven para calcular el hidrograma requerido. En la Figura 3 se muestran las variables de estos dos hidrogramas.

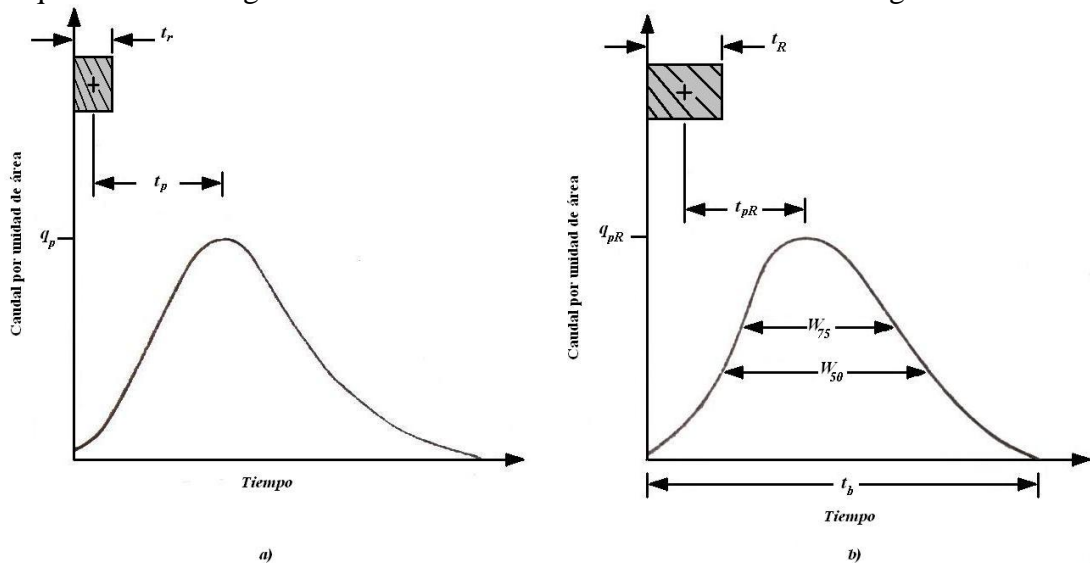


Figura 3. Hidrograma unitario sintético de Snyder a) HU Estándar ( $t_p=5.5t_r$ ) b) HU Requerido ( $t_{pR} \neq 5.5t_{rR}$ )

El hidrograma estándar fue definido por Snyder como aquel que cumple la siguiente relación:

$$t_p = 5.5 \cdot t_r \quad (\text{ec. 18})$$

Donde:

- $t_p$ : Retardo de la cuenca, horas
- $t_r$ : Duración de la lluvia, horas

Snyder encontró que para el hidrograma unitario estándar se cumple:

$$t_p = 0.75 \cdot C_t (L \cdot L_c)^{0.3} \quad (\text{ec. 19})$$

$$q_p = \frac{2.75 \cdot C_p}{t_p} \quad (\text{ec. 20})$$

Donde:

- $L$ : Longitud del cauce principal, desde la salida de la cuenca hasta la divisoria de aguas arriba, km
- $L_c$ : Longitud desde la salida de la cuenca hasta el punto sobre el cauce más cercano al centroide de la cuenca, km
- $C_b, C_p$ : Coeficiente basado en cuencas instrumentadas de la misma región.
- $q_p$ : Caudal pico por unidad de área de drenaje,  $m^3 / s \cdot km^2$

También estableció la relación entre el hidrograma estándar con el requerido con las siguientes ecuaciones:

$$q_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}} \quad (\text{ec. 21})$$

$$t_b = \frac{5.56}{q_{pR}} \quad (\text{ec. 22})$$

$$W = C_w \cdot q_{pR}^{-1.08} \quad (\text{ec. 23})$$

Donde:

- $q_{pR}$ : Caudal pico del hidrograma requerido por unidad de área,  $m^3 / s \cdot km^2$
- $t_{pR}$ : Retardo en el hidrograma requerido, horas
- $t_b$ : Tiempo base del hidrograma requerido, horas
- $W$ : Ancho del hidrograma unitario requerido a cierto porcentaje del caudal pico, h
- $C_w$ : Coeficiente igual a 1.22 para  $W_{75\%}$  y 2.14 para  $W_{50\%}$

Para calcular los coeficientes  $C_t$  y  $C_p$  se necesita un hidrograma unitario deducido para la cuenca, del cual se obtiene la duración efectiva,  $t_{rD}$ , el retardo de la cuenca,  $t_{pD}$ , y el caudal pico por unidad de área,  $q_{pD}$ . Si  $t_{pD}=5.5 t_{rD}$ , cumple la condición de hidrograma unitario estándar por lo que  $t_p=t_{pD}$ ,  $t_r=t_{rD}$  y  $q_p=q_{pD}$ , y  $C_t$  y  $C_p$  se calculan con la ecuación (ec. 19) y la (ec. 20). Si  $t_{pD}$  es muy diferente a  $5.5t_{rD}$ , el retardo de cuenca estándar es:

$$t_p = t_{pD} + \frac{t_r - t_{rD}}{4} \quad (\text{ec. 24})$$

La ecuación (ec. 18) y la ecuación (ec. 24) se resuelven simultáneamente para encontrar  $t_r$  y  $t_p$ . Después se calculan los valores de  $C_t$  y  $C_p$  con la ecuación (ec. 19) y la (ec. 20) con  $q_p=q_{pD}$  y  $t_p=t_{pD}$ .

Si se cuenta con los coeficientes  $C_t$  y  $C_p$  para una cuenca, se pueden utilizar estos mismos en otra cuenca de similares características no instrumentada para deducir su hidrograma sintético requerido.

### Hidrograma Unitario de Clark

Este modelo deriva el hidrograma unitario de una cuenca al representar explícitamente dos procesos críticos en la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía:

- El movimiento de la precipitación efectiva desde su origen hasta la salida de la cuenca a través del drenaje de esta.
- La reducción de la magnitud de la descarga mientras la precipitación efectiva se almacena en toda la cuenca.

El almacenaje esporádico en la cuenca (en el suelo, superficie y canales) juega un papel importante en la transformación de la precipitación efectiva en escurrimiento. Para representar este almacenamiento se puede utilizar un modelo lineal de reservorio ubicado a la salida de la cuenca. Este modelo se deduce de la ecuación de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (\text{ec. 25})$$

Donde:

- $\frac{dS}{dt}$ : Es el cambio en el almacenamiento en el tiempo  $t$
- $I_t$ : La entrada promedio al reservorio en el tiempo  $t$
- $O_t$ : Salida del reservorio en el tiempo  $t$

El almacenamiento en el tiempo  $t$  está relacionado a la salida como sigue:

$$S_t = R \cdot O_t \quad (\text{ec. 26})$$

Donde:

- $R$ : Parámetro constante del reservorio lineal

Combinando y resolviendo estas ecuaciones se obtiene:

$$O_t = C_A \cdot I_t + C_B \cdot O_{t-1} \quad (\text{ec. 27})$$

Donde los coeficientes  $C_A$  y  $C_B$  se obtienen de:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad (\text{ec. 28})$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (\text{ec. 29})$$

La salida promedio durante el periodo  $t$  es:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (\text{ec. 30})$$

Este modelo también utiliza un modelo lineal de canal para simular el retraso del agua desde cualquier punto de la cuenca hasta la salida de esta. Este retraso puede ser representado también con un histograma tiempo-área, que especifica la fracción de área de la cuenca que aporta agua como función del tiempo. Si esta área es multiplicada por la lámina de agua y dividida por el intervalo de tiempo  $\Delta t$  se obtiene el flujo de entrada al reservorio.

Una relación típica tiempo-área es la siguiente:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left( \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{si } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left( 1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{si } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (\text{ec. 31})$$

Donde:

- $A_t$ : Área aportante en el tiempo  $t$ .
- $A$ : Área total de la cuenca.
- $t_c$ : Tiempo de concentración de la cuenca.

Al resolver recursivamente las ecuaciones (ec. 27) y (ec. 30) se obtienen los valores de la salida del reservorio para cada intervalo de tiempo. Si la entrada al reservorio es calculada a partir de una unidad de precipitación efectiva, la salida de este será el hidrograma unitario.

### • Modelos conceptuales

#### Modelo de la onda cinemática

Este modelo representa la cuenca como un canal abierto, donde la entrada de flujo es la precipitación efectiva, y el hidrograma es calculado al resolver ecuaciones que simulan un canal en régimen no permanente.

Las ecuaciones utilizadas en este modelo son las siguientes:

$$V_{i,j} - V_{i,j-1} = I_{vol} + P - O_{vol} \quad (\text{ec. 32})$$

$$O_{vol} = [K_s \cdot Q_{i,j-1} + (1 - K_s) \cdot Q_{i,j}] dt \quad (\text{ec. 33})$$

Donde:

- $V_{i,j}$ : Volumen almacenado en el cauce al final del intervalo  $dt$ .
- $V_{i,j-1}$ : Volumen almacenado en el cauce al inicio del intervalo  $dt$ .
- $I_{vol}$ : Volumen total de agua que entra al cauce durante el intervalo de tiempo  $dt$ , proveniente de segmentos aguas arriba.
- $P$ : Volumen de precipitación que entra al cauce durante el intervalo  $dt$ .
- $O_s$ : Volumen total que sale hacia aguas abajo en el intervalo de tiempo  $dt$ .
- $Q_{i,j}$ : Caudal efluente del segmento al final del intervalo de tiempo  $dt$ .
- $Q_{i,j-1}$ : Caudal efluente del segmento al inicio del intervalo de tiempo  $dt$ .
- $K_s$ : Factor de peso para la ponderación  $(1 - \theta)$
- $dt$ : Intervalo de tiempo usado para el tránsito.

Sustituyendo la ecuación (ec. 33) en la (ec. 32) se obtiene:

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + I_{vol} + P - [K_s \cdot Q_{i,j-1} + (1 - K_s) \cdot Q_{i,j}] dt \quad (\text{ec. 34})$$

Donde se puede apreciar que existen dos incógnitas:  $V_{i,j}$  y  $Q_{i,j}$ . Es por esto que se requiere de una relación entre el caudal y el volumen.

Esta relación se puede establecer con la ecuación de Manning conociendo la rugosidad, pendiente y la sección transversal del cauce.

$$Q_{i,j} = f(V_{i,j}) \quad (\text{ec. 35})$$

Al resolver las dos últimas ecuaciones se puede obtener el valor del caudal y del volumen para cada intervalo de tiempo  $dt$ .

Esta metodología puede ser utilizada para modelar primero las vertientes del cauce, donde la entrada lateral es la precipitación efectiva, y luego el cauce donde la entrada lateral es la salida de las vertientes. De esta manera se obtiene el hidrograma generado por la precipitación efectiva.

## **Capítulo 5**

### **REVISION DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA EVENTOS**

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; características que también puede afectar la respuesta del modelo a cierto tipo de cuenca.

Después de una revisión de revistas especializadas, libros, tesis e internet en busca de información sobre modelos hidrológicos de eventos se identificaron los más usados.

En este punto se presenta una breve revisión de los mejores modelos hidrológicos de eventos utilizados en la actualidad, con el fin de conocer sus características, fortalezas y debilidades; y así, en base a esta información, poder compararlos y seleccionar los que mejor se adapten a este trabajo.

Los modelos a evaluar en este primer paso serán los siguientes:

- WinHSPF
- HEC-HMS
- EVENTO
- TETIS
- HBV
- SUSHI

www.bdigital.ula.ve

#### **5.1 WinHSPF**

El HSPF (Hydrologic Simulation Program - Fortran) fue desarrollado por la empresa Hydrocomp a pedido de la EPA (Environmental Protection Agency) en 1976 (<http://www.hydrocomp.com>). Está basado en el modelo Standford creado por Crawford y Linsley en 1966, el cual es considerado uno de los primeros modelos hidrológicos, y que más adelante se convirtió en el HSP (Hydrocomp Simulation Program) añadiendo la capacidad de simular transporte de sedimentos y calidad de agua.

A principios de la década del 70 Hydrocomp desarrolló el modelo ARM (Agricultural Runoff Management Model) para simular el escurrimiento superficial en áreas agrícolas y el NPS (Nonpoint Source Pollutant Loading Model) para la simulación de contaminantes, los dos para la EPA. Es entonces que para el año 1976 la EPA encargó a Hydrocomp el desarrollo de un modelo que pudiese realizar todo lo que manejaba el HSP, el ARM y el NPS y que al mismo tiempo fuese fácil de mantener y modificar. Es así que nace el HSPF.

Este modelo está desarrollado en entorno MS-DOS, pero existen programas que le han incorporado una interfaz gráfica de usuario para Windows que facilita el uso del modelo, uno de estos programas es el WinHSPF, el cual se distribuye de forma gratuita como parte del BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) de la EPA, el cual es un programa que enlaza el Sistema de Información Geográfica MapWindow con diferentes modelos hidrológicos e hidráulicos. ([www.epa.gov/waterscience/basins](http://www.epa.gov/waterscience/basins)).

### **5.1.1 Descripción General**

El modelo WinHSPF es capaz de simular la cantidad y la calidad de agua de una cuenca, incluyendo transporte de sedimentos y movimiento de contaminantes. Igualmente puede trabajar en simulación de eventos como en modelación continua, ya sea de forma global o semi-distribuida.

En este modelo los diferentes procesos hidrológicos están representados matemáticamente como flujos y almacenamientos de forma conceptual o simplificada.

La cuenca se representa por segmentos de suelo, reservorios y corrientes de agua. Cada segmento representa una porción de la cuenca, generalmente con características hidrológicas homogéneas. Estos segmentos pueden ser permeables o impermeables, realizándose la modelación de cada caso por separado. Por lo que se puede considerar este modelo como semi-distribuido.

En el caso de los segmentos permeables existen tres flujos: superficial, interflujo y subterráneo. Para representar los diferentes horizontes y su interacción utilizan una variedad de almacenamientos. El modelo también incluye la simulación de la acumulación y derretido de nieve. El esquema de flujos de agua para los segmentos permeables es presentado en la Figura 4.

En los segmentos impermeables se omite la infiltración en el proceso de transformación de la precipitación en escurrimiento. El esquema para el flujo de agua en estos segmentos se puede ver en la Figura 5.

Para el arrastre de sedimentos, el modelo toma en cuenta tres tipos de sedimentos: arena, limo y arcilla; con sus características particulares.

En la modelación de calidad del agua simula químicos orgánicos simples y los productos de la transformación de estos químicos. Los procesos de transferencia y reacción química incluidos son la hidrólisis, oxidación, fotosíntesis, biodegradación, volatilización y absorción.



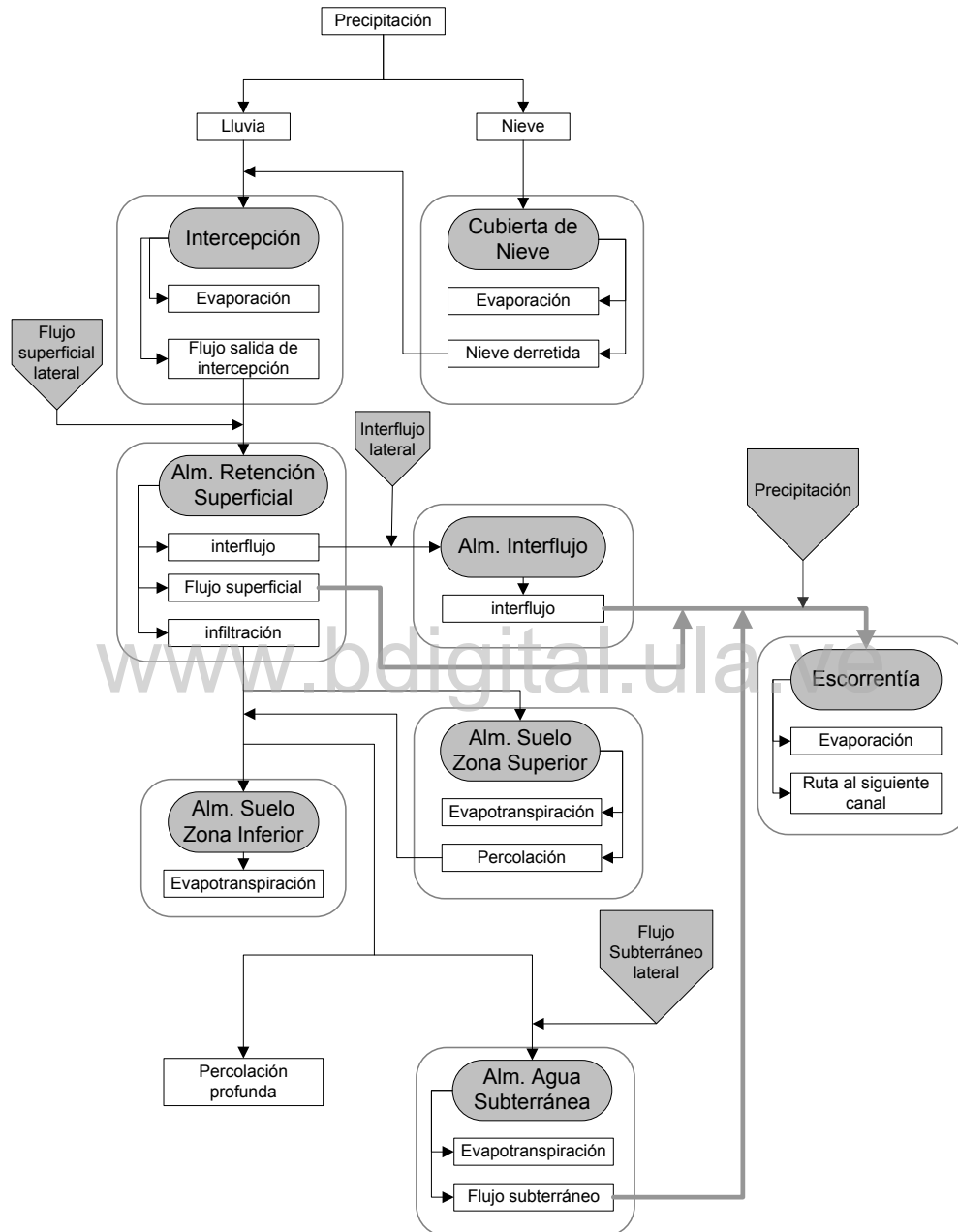


Figura 4. Esquema de los flujos de agua para el modelo WinHSPF en segmentos permeables. (Tomado de Hydrocomp, 1979)

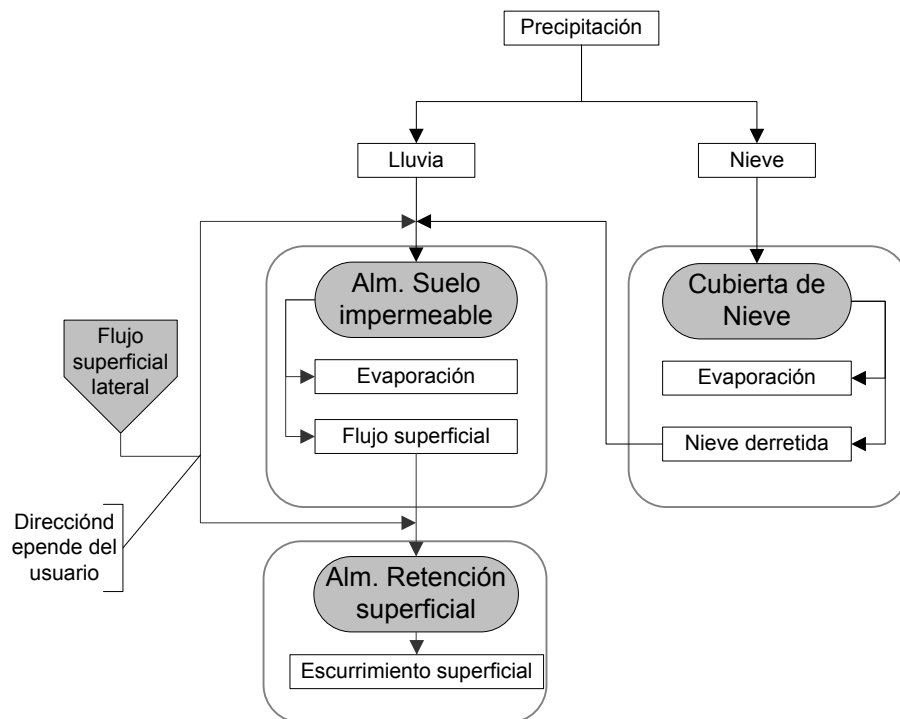


Figura 5. Esquema de los flujos de agua para el modelo WinHSPF en segmentos impermeables. (Tomado de Hydrocomp, 1979)

### 5.1.2 Requerimientos de información

Para la simulación de eventos aislados se requiere:

- Precipitación
- Evapotranspiración potencial

El modelo permite modelar nieve a partir de información adicional como temperatura, velocidad de viento y radiación solar.

El modelo puede trabajar con intervalos de tiempo de una hora o de un día, donde mientras más corto sea el periodo mayor será la precisión. La versión original en MS-DOS de este modelo, el HSPF permite trabajar con intervalos de tiempo menores a una hora. Esta limitación en la versión WinHSPF le quita la capacidad de trabajar con eventos cortos o cuencas pequeñas, donde el tiempo de respuesta es corto por lo que un intervalo de una hora puede ser mayor al tiempo de concentración.

Para la calibración se requerirán los siguientes datos para un mismo evento:

- Precipitación
- Evapotranspiración
- Caudales observados
- Datos para simular nieve si es necesario

### 5.1.3 Salida

El WinHSPF produce una serie de tiempo del escurrimiento, de la carga sólida y de las concentraciones de pesticidas y nutrientes para cualquier punto de la cuenca con el intervalo de tiempo que se requiera, mientras este sea igual o mayor al de los datos de entrada.

### 5.1.4 Aplicaciones

En la Tabla 2 se presentan todas las aplicaciones potenciales de este modelo según el tipo de proceso simulado, ya sea hidrológico, hidráulico o de calidad de agua.

Tabla 2. Aplicaciones del WinHSPF

Tipo de proceso	Aplicaciones
<i>Hidrológico e hidráulico</i>	Mapeo de inundaciones
	Planificación para control de inundaciones
	Estudios y diseños Hidroeléctricos
	Operación plantas hidroeléctricas
	Planificación de cuencas
	Estudios de drenaje urbano
<i>Calidad de agua</i>	Estudios de agua subterránea
	Estudio de estrategias de tratamiento de aguas servidas
	Estudio de estrategias de control de contaminantes agrícolas
	Estudio de estrategias de control de tierras tóxicas permeables e impermeables
	Estudio de fuentes urbanas no puntuales de contaminación
	Estudio de calidad de agua en corrientes de agua y reservorios no estratificados
Estudio de problemas de sedimentación y erosión	
Estudio del efecto de proyectos de recreación, control de flujo y otros en la calidad de agua de corrientes de agua	
Estudio de tendencias de calidad de agua a largo plazo	

## 5.2 HEC-HMS

El Sistema de Modelaje Hidrológico (HMS por sus siglas en inglés) fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC por sus siglas en inglés) perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, basado en algoritmos de varios modelos desarrollados por el HEC: HEC-1 (HEC, 1998), HEC-IFH (HEC, 1992), HEC-1F (HEC, 1989) y PRECIP (HEC, 1989) los cuales fueron modernizados y combinados con nuevos algoritmos (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/index.html>).

Este modelo está diseñado para simular el proceso precipitación-escorrentía en cuencas dendríticas, que pueden tener uno o más reservorios como parte de su sistema de drenaje. Todo esto dentro de una interfaz gráfica de usuario clara y fácil de usar.

### 5.2.1 Descripción General

Este modelo puede realizar la modelación de una cuenca de forma continua o de eventos aislados, ya sea de forma global, semi-distribuida o distribuida. Esta diseñado de forma tal que puede realizar la simulación desde grandes cuencas hasta pequeñas redes de drenaje urbano.

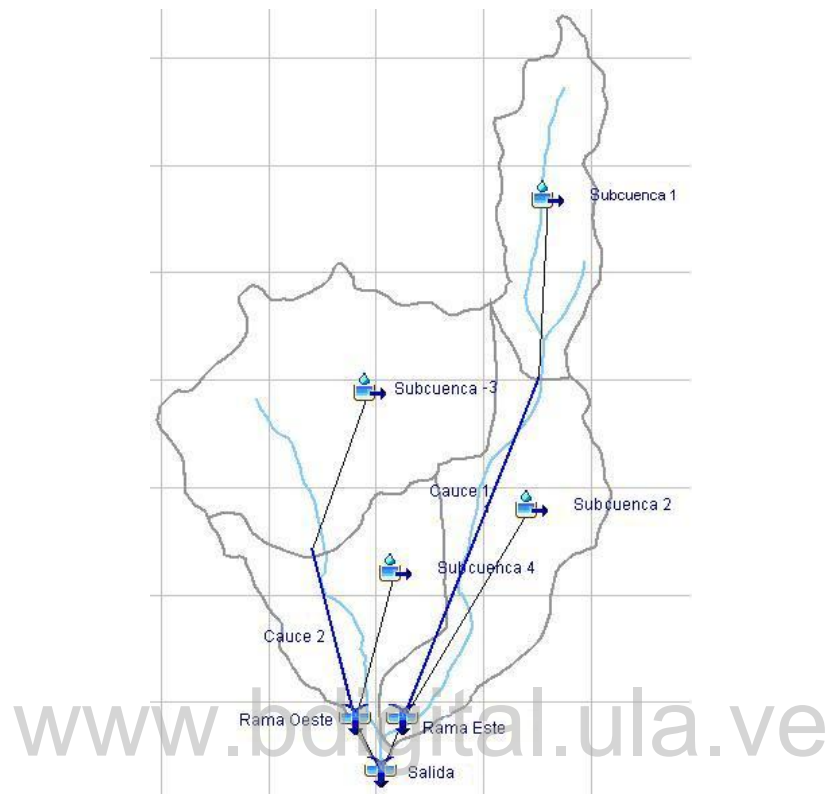
Para la representación de la cuenca el HEC-HMS utiliza los siguientes elementos hidrológicos:

- a. Subcuencas
- b. Escorrentía
- c. Fuentes de agua
- d. Reservorios
- e. Divisiones del cauce
- f. Uniones de cauce

En la Figura 6 se puede ver la esquematización en el HEC-HMS de una cuenca, dividida en cuatro subcuencas, donde se utilizan algunos de estos elementos.

Este modelo permite escoger entre una variedad de métodos para el cálculo de pérdidas, cálculo del caudal base, tránsito de la escorrentía y simulación de reservorios. Dependiendo del método escogido el programa realizará los cálculos correspondientes para simular cada uno de estos elementos.

El HEC-HMS da la posibilidad de escoger métodos de cálculo diferentes para cada subcuenca, permitiendo representar cada subcuenca de la mejor manera cuando, por ejemplo, se tienen distintos niveles de información para cada subcuenca.



*Figura 6. Esquematización de una cuenca en el HEC-HMS*

En la Figura 7 se tiene el esquema general que utiliza el HEC-HMS para modelar el recorrido del agua. Según los métodos seleccionados, algunos de estos procesos podrán ser tomados en cuenta o no.

Una característica muy interesante que ofrece este modelo es la posibilidad de crear distintos escenarios, lo que facilita la comparación de distintas situaciones de la cuenca, como por ejemplo diferentes grados de humedad antecedente, eventos con periodos de retorno diferentes, entre otros.

El modelo puede realizar un proceso de auto calibración para los parámetros que el usuario especifique.

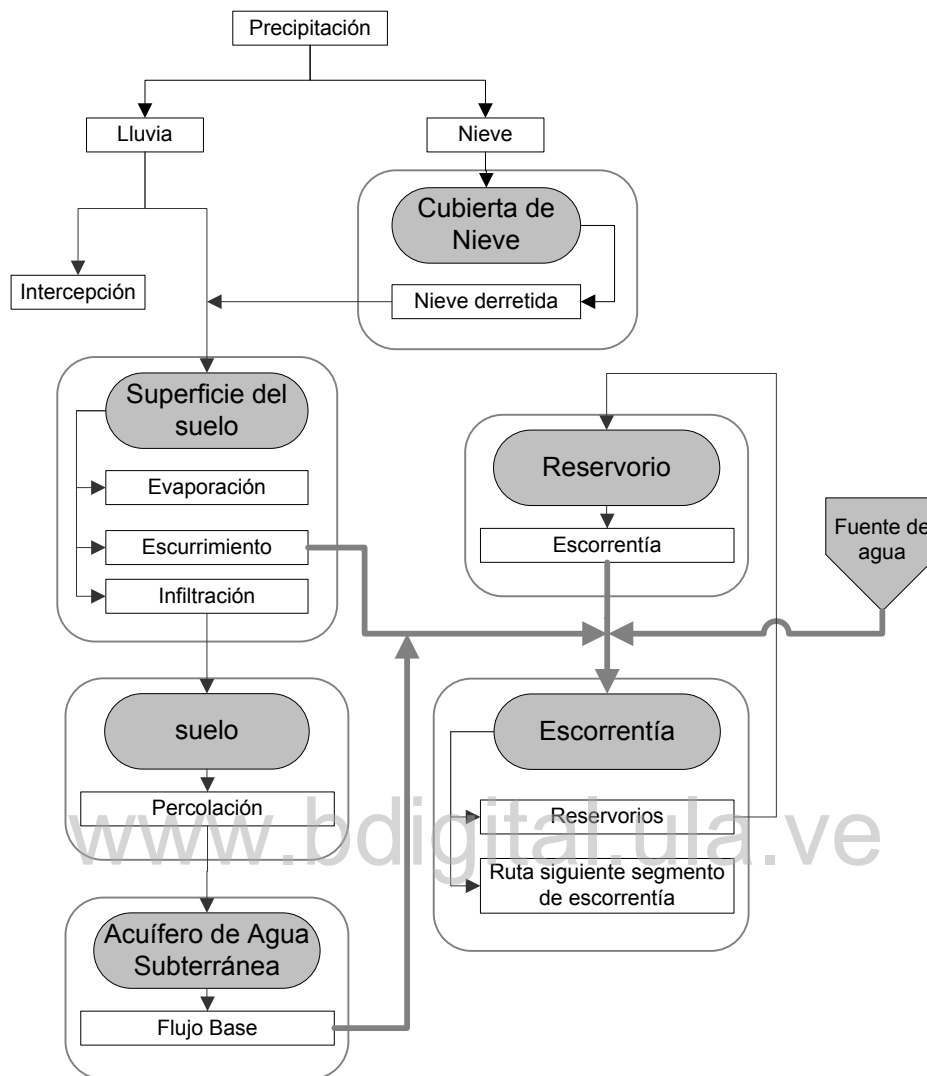


Figura 7. Esquema de los flujos de agua para el modelo HEC-HMS

Con el HEC-HMS se puede realizar un análisis Área-Profundidad, el cual permite calcular el pico correspondiente a una tormenta de cierto periodo de retorno, asignando la tormenta hipotética adecuada a cada sector de la cuenca en base a un factor de corrección área-profundidad definido tabularmente por el usuario.

El HEC-HMS pertenece a una familia de paquetes del HEC. Los paquetes que también forman parte de esta familia son los siguientes:

- HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System). Paquete que permite la modelación del flujo, caudal sólido y temperatura del agua en un río.
- HEC-GeoRAS: Permite la preparación de datos geoespaciales en ArcGIS para importarlos directamente en el HEC-RAS.
- HEC-GeoHMS: Permite obtener datos desde el ArcView e importarlos en el HEC-HMS.
- HEC-SSP: (Hydrologic Engineering Center Statistical Software Package).Paquete que permite realizar análisis estadísticos a datos hidrológicos.
- HEC-ResSim (Hydrologic Engineering Center Reservoir System Simulation). Paquete que permite simular reservorios.
- HEC-FDA (Hydrologic Engineering Center Flood Damage Analysis). Paquete que realice el análisis económico en proyectos de reducción de daños por inundaciones.
- HEC-DSS (Hydrologic Engineering Center Data Storage System). Es una base de datos que permite manejar los datos hidrológicos.
- HEC-RPT (Hydrologic Engineering Center Regime Prescription tool). Paquete que permite compartir información hidrológica en tiempo real.

Al formar parte de una familia en el caso de que los resultados de un paquete alimenten a otro, el paso de información de uno a otro es muy sencillo. Para este estudio en particular el HEC-RAS es de gran utilidad para determinar la mancha de inundación generada por un evento simulado con el HEC-HMS.

### **5.2.2 Requerimientos de información**

Para la modelación de eventos la información básica requerida es:

- Precipitación
- Evapotranspiración potencial

Dependiendo del método seleccionado para simular cada elemento el modelo requerirá que el usuario introduzca ciertos parámetros o datos adicionales. Todos los datos aceptados por el HEC-HMS se presentan en la Tabla 3:

*Tabla 3. Diferentes tipos de información de entrada del modelo HEC-HMS.*

<b>Series de tiempo</b>	<b>Pares de Datos</b>	<b>Espacialmente Distribuidos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación</li> <li>• Caudales</li> <li>• Profundidad del río</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Radiación Solar</li> <li>• Coeficientes de Cultivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga-Descarga</li> <li>• Elevación-Almacenamiento</li> <li>• Área-Elevación</li> <li>• Elevación-Descarga</li> <li>• Estrada – desvío de flujo</li> <li>• Secciones transversales</li> <li>• Curva hidrograma unitario</li> <li>• Curvas de porcentaje</li> <li>• Índice de temperatura antecedente – índice derretido de nieve</li> <li>• Índice de temperatura antecedente - función de enfriamiento</li> <li>• Modelo de derretido de nieve</li> <li>• Índice de derretido de nieve</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Radiación Solar</li> <li>• Coeficientes de Cultivo</li> <li>• Capacidad de almacenamiento</li> <li>• Índice de precolación</li> <li>• Coeficiente de almacenamiento</li> <li>• Déficit de humedad</li> <li>• Área impermeable</li> <li>• Número de curva SCS</li> <li>• Elevación</li> <li>• Temperatura actual</li> <li>• Temperatura actual, Índice temperatura antecedente</li> <li>• Índice de derretido, Índice temperatura antecedente</li> <li>• Contenido de agua líquida</li> <li>• Equivalente de agua de nieve</li> </ul>

Para la calibración se necesita también una serie de precipitación con sus respectivas series de caudales observados.

El programa permite introducir los datos en una variedad de formatos, ya sea como series de tiempo, pares de datos o distribuidos espacialmente. Las series de tiempo y los pares de datos pueden ser introducidos manualmente o con la ayuda del HEC-DSS, y los distribuidos espacialmente solo a través del HEC-DSS.



### 5.2.3 Salida

Una vez realizada la simulación de un evento en una cuenca, los resultados disponibles más relevantes para este proyecto son, a nivel de subcuenca, los siguientes:

- Hidrograma Simulado total
- Hidrograma del caudal base.
- Hidrograma Observado (si se introdujo)
- Hietograma de la precipitación total.
- Hietograma de la precipitación efectiva.
- Hietograma de las pérdidas por infiltración.

Estos resultados pueden ser visualizados en forma gráfica y tabulada. En su forma gráfica se pueden combinar según se necesite para poder ser comparados en una misma escala.

### 5.2.4 Aplicaciones

Algunas de las actividades en las que se podría utilizar este modelo se presentan en la Tabla 4.

*Tabla 4. Aplicaciones potenciales del HEC-HMS*

<b>Estudios que se pueden realizar con la ayuda del HEC-HMS</b>
Reducción de daños por inundaciones
Regulación de planicies de inundación
Drenaje Urbano
Predicción de caudales
Impacto de futuras urbanizaciones
Diseño de aliviaderos en reservorios
Operación de sistemas

## 5.3 EVENTO

Este modelo fue desarrollado por Duque (1990) en base al modelo determinístico de escurrimiento urbano de John Schaake (1970), el cual a su vez está basado en la teoría de movimiento de la onda cinemática en canales abiertos uniformes con aportes aguas arriba y laterales, y el modelo entrega como resultado hidrogramas de salida en puntos seleccionados a lo largo del sistema representado. El modelo está desarrollado en FORTRAN y en trabaja en entorno MS-DOS.

### 5.3.1 Descripción General

El modelo EVENTO es un programa de simulación hidrológica, que como su nombre indica, analiza únicamente eventos aislados de forma semi-distribuida.

Para la simulación se requiere esquematizar la cuenca, dividiéndola en subcuencas homogéneas, utilizando para esto tres elementos:

- Segmento de escurrimiento
- Segmento de escorrentía
- Segmento de unión

Donde los segmentos de escurrimiento representa las vertientes de la subcuenca, los de escorrentía el canal principal de esta y los de unión representan un punto donde convergen dos canales para juntar sus aguas en uno solo.

En la Figura 8 se puede ver la esquematización de una cuenca.

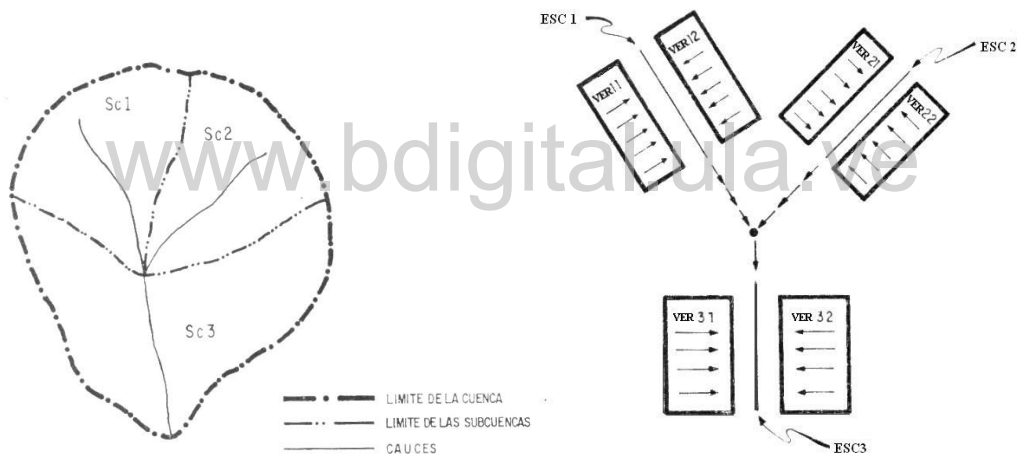


Figura 8. Esquematización de una cuenca en el modelo EVENTO. (Tomado de Duque, 1981)

Para cada segmento de escurrimiento se calcula la precipitación efectiva y se la transita hasta los segmentos de escorrentía, los que se van uniendo usando los segmentos de unión hasta llegar al final de la cuenca, donde se presenta el hidrograma de salida. También es posible visualizar los hidrogramas en los segmentos de unión. En la Figura 9 se tiene el esquema general que sigue el agua en este modelo.

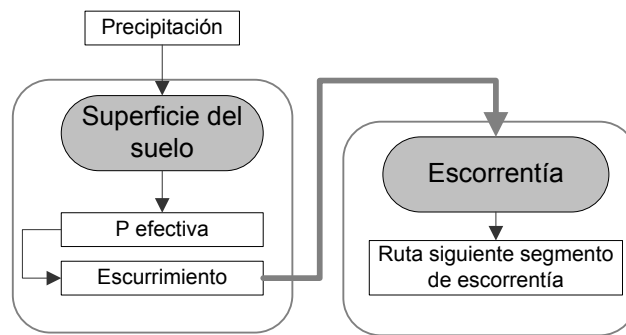


Figura 9. Esquema de los flujos de agua para el modelo EVENTO

Debido a su capacidad de discretizar la cuenca en estudio en varias subcuencas, este modelo puede simular tanto grandes como pequeñas cuencas.

### 5.3.2 Requerimientos de información

Este modelo requiere de información básica de la cuenca y del evento para funcionar. Los datos requeridos son:

- Hietograma del evento.
- Descripción de cada segmento:
  - Descripción de vertientes (rugosidad, pendiente, número de curva, área)
  - Descripción del canal (longitud, rugosidad, sección)

### 5.3.3 Salida

El modelo EVENTO ofrece como salida un archivo en formato ASCII, donde se resume para cada segmento los datos de entrada, los parámetros utilizados en la simulación y presenta el hidrograma calculado para los segmentos que el usuario necesite y para la salida de la cuenca, estos se presentan utilizando caracteres de texto localizados de manera que formen el hidrograma.

### 5.3.4 Aplicaciones

Algunos ejemplos de aplicación potenciales de este modelo se presentan en la Tabla 5.

*Tabla 5. Aplicaciones potenciales del EVENTO*

<b>Estudios que se pueden realizar con la ayuda del EVENTO</b>
Predicción de caudales extremos
Drenaje Urbano
Diseño de aliviaderos en embalses
Planificación para control de inundaciones

## **5.4 TETIS**

El modelo TETIS fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (<http://lluvia.dihma.upv.es/miembrosd.php?language=&id=1>)

Este modelo fue desarrollado para obtener la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual, tanto para la simulación continua como la de eventos de crecida.

El modelo realiza la simulación de producción de escurrimiento, fusión de nieve, riego, tránsito a lo largo de cauces y operación de embalses.

### **5.4.1 Descripción General**

Este modelo puede generar información distribuida en el espacio basándose en datos puntuales de precipitación, altura equivalente de agua inicial, temperatura y evapotranspiración potencial.

El modelo considera como entrada de agua la precipitación de lluvia, la fusión de nieve y el riego.

La producción de escurrimiento se basa en un balance hídrico en cada celda, distribuyendo el agua en cinco niveles, representados por tanques de almacenamiento conectados entre sí como se puede ver en la Figura 10.

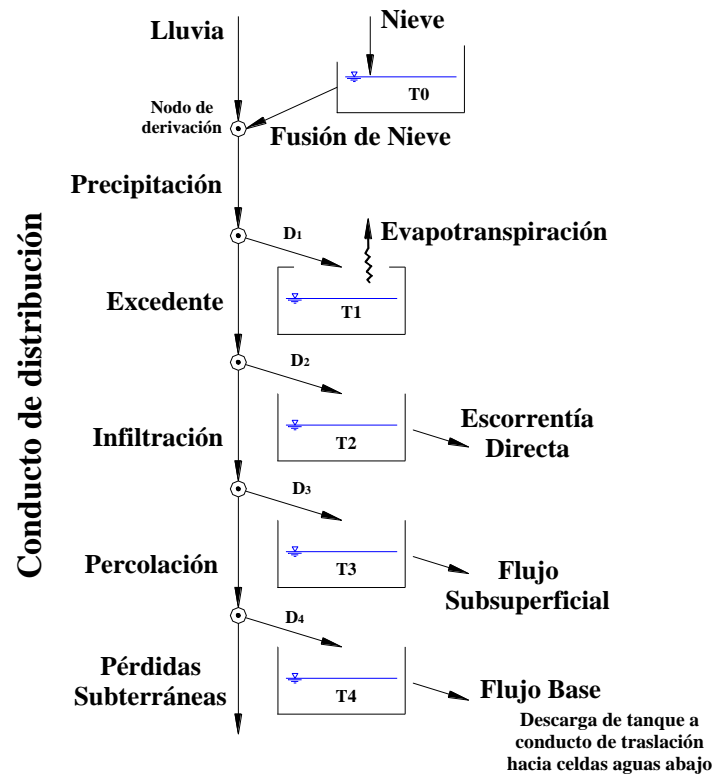


Figura 10. Esquema de los flujos de agua para el modelo TETIS a nivel de celda. (Tomado de Vélez, 2001)

Estos tanques representan los siguientes almacenamientos:

- T0: Almacenamiento de nieve.
- T1: Intercepción, retención en depresiones y capilaridad del suelo.
- T2: Almacenamiento superficial.
- T3: Almacenamiento subsuperficial.
- T4: Almacenamiento subterráneo.

El modelo se puede conceptualizar como una malla interconectada en tres dimensiones. En la Figura 11 se muestra esta esquematización para los tres tanques inferiores, los que drenan hacia el tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones de flujo obtenidas en base al modelo de elevación digital de la cuenca.

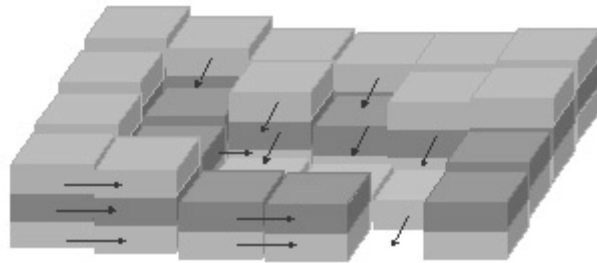


Figura 11. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS. (Tomado de Vélez, 2001)

Una vez que el agua llega a la red principal de drenaje, esta es transitada hasta llegar a la salida de la cuenca.

El modelo es capaz de simular embalses con diferentes métodos, dependiendo de la cantidad de información disponible. La simulación de este modelo no es aceptable en grandes embalses.

Este modelo cuenta también con una rutina de autocalibración conocida por sus siglas en inglés “Shuffled Complex Evolution – University of Arizona”, SCE-UA que ha sido desarrollada en la Universidad de Arizona por Duan et al. (1992). Este procedimiento se encarga de realizar la calibración automática para obtener el conjunto de factores correctores y estados de almacenamiento inicial óptimos, de tal forma que se simule de forma satisfactoria el ciclo hidrológico dentro de la cuenca estudiada.

www.bdigital.ula.ve

#### 5.4.2 *Requerimientos de información*

El modelo TETIS requiere para funcionar la siguiente información:

- Modelo digital de elevación del terreno.
- Series temporales del evento de precipitación.
- Evapotranspiración.
- Altura equivalente de agua.
- Temperatura.
- Aportes o retención de caudal.

Para realizar la calibración se necesitará adicionalmente:

- Caudales en las estaciones de aforo

Si en el sistema se tienen embalses se requerirá también:

- Volúmenes y niveles de embalse.
- Caudal de salida de embalses.
- Curva característica de embalses.

### 5.4.3 Salida

Como resultado de la simulación se obtienen las siguientes series temporales:

- Caudal estimado en puntos seleccionados.
- Niveles de embalse.
- Caudal de entrada al embalse.
- Volumen observado y simulado del embalse.
- Volumen simulado de nieve en toda la cuenca.
- Flujos medios entre tanques de toda la cuenca.
- Almacenamientos medios de toda la cuenca.

El modelo también puede desplegar los resultados en forma gráfica.

### 5.4.4 Aplicaciones

Algunos de los usos potenciales de este modelo se presentan en la Tabla 6.

*Tabla 6. Aplicaciones del modelo TETIS*

Aplicaciones del TETIS
Estudio del efecto de cambios de uso de tierra
Estudios del efecto del cambio climático
Estudios de movimiento de sedimentos
Estudios de pronostico de inundaciones en tiempo real
Alimentar modelos hidráulicos o de calidad de agua
Estudios de disponibilidad de agua en una cuenca

## 5.5 HBV

El modelo HBV fue desarrollado por el profesor Bergström para el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI por sus siglas en sueco) el año 1972. Su nombre proviene de la abreviación en sueco de la división del SMHI que lo desarrolló: la oficina hidrológica de balance de agua (**H**ydrologiska **B**yråns **V**attenbalansavdelning). ([http://www.smhi.se/foretag/m/hbv\\_demo/html/welcome.html](http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html))

El HBV es un modelo precipitación-escorrentía que puede ser clasificado como conceptual, continuo y semi-distribuido, ya que divide la cuenca en subcuencas para realizar la simulación. De acuerdo a la experiencia adquirida por los desarrolladores del modelo, el HBV se comporta mejor en cuencas con una superficie de 100 Km<sup>2</sup> o más, ya que para pequeñas cuencas se tuvieron resultados muy variados.

Este modelo cuenta con una interfaz gráfica de usuario programada bajo entorno Windows.

### **5.5.1 Descripción General**

El HBV está formado por las siguientes subrutinas:

- Interpolación meteorológica.
- Acumulación y fusión de nieve.
- Estimación de evapotranspiración.
- Conteo de humedad de suelo.
- Generación de escorrentía.
- Transito de caudales entre subcuencas y reservorios internos.

En la Figura 12 se puede ver la estructura que siguen los flujos de agua en el modelo, donde se pueden observar la mayoría de los procesos considerados por el HBV desde la precipitación de lluvia y nieve hasta la generación de la escorrentía.

### **5.5.2 Requerimientos de información**

Los datos requeridos para este modelo son:

- Precipitación.
- Temperatura del aire.
- Evapotranspiración potencial (ETp).
- Subdivisión de subcuencas.
- Distribución de altitud y coberturas.

Usualmente se utiliza a nivel diario, pero puede usarse con una escala de tiempo mayor. La temperatura del aire se utiliza para los cálculos de acumulación y derretido de nieve, para corregir la ETp cuando la temperatura se desvía de los valores normales o para calcular la ETp. Si no se utiliza ninguna de estas opciones entonces se puede omitir este dato en zonas sin nieve.



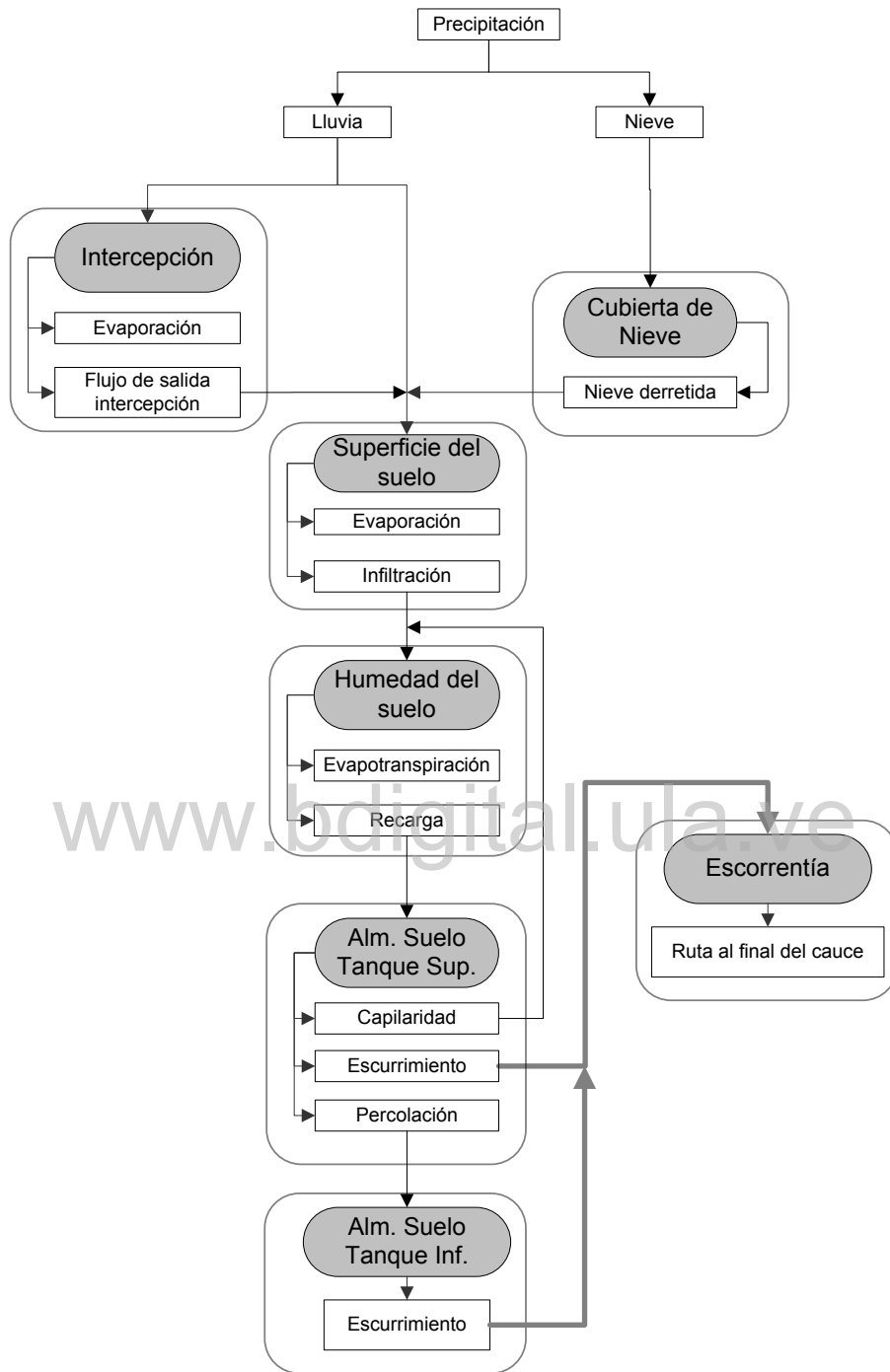


Figura 12. Esquema de los flujos de agua para el modelo HBV-96

### 5.5.3 Salida

El modelo es bastante flexible a la hora de definir las variables que se desean ver, ya sea en forma gráfica o tabulada. Algunas de estas son:

- Hidrograma a la salida de la cuenca.
- Flujo de entrada a reservorios.
- Acumulación de nieve.
- Fusión de nieve
- Distribución de la precipitación.
- Almacenamiento de humedad en el suelo.
- Recarga y almacenamiento de agua subterránea.
- Evapotranspiración efectiva.

### 5.5.4 Aplicaciones

En la Tabla 7 se presentan algunos de los potenciales usos del modelo HBV.

*Tabla 7. Usos Potenciales del modelo HBV*

Aplicaciones del HBV
Estudio del efecto de cambios de uso de tierra
Estudios del efecto del cambio climático
Alarma de inundaciones
Estudios de Hidroelectricidad
Manejo de presas
Estudio para riego

## 5.6 SUSHI

SUSHI (SimUlación Hidrológico-Selvícola Integrada) es una aplicación SIG destinada al análisis hidrológico de pequeñas y medianas cuencas desde un punto de vista hidrológico-forestal. Desarrollado por Víctor Olaya y José Carlos Robredo en Madrid, España en año 2001.

Este modelo permite relacionar los principales parámetros hidrológicos de una cuenca con la cobertura, usos y manejo de suelos existentes en esta, así como otros modificadores de la cubierta vegetal tales como reforestaciones, incendios, y otros.

Este modelo permite tanto la simulación continua como la simulación de eventos, utilizando datos distribuidos o globales.

### **5.6.1 Descripción General**

El modelo SUSHI puede almacenar un número ilimitado de estaciones de datos climáticos y pluviométricos, de las cuales se obtendrá la información requerida para la simulación de la cuenca en estudio. El programa tiene la capacidad de realizar un análisis de datos climáticos como parte de un proyecto o de forma independiente. Algunos de los cálculos que puede realizar en este módulo son: Resumen termométrico, resumen pluviométrico, precipitaciones máximas en 24 horas, precipitaciones medias mensuales, temperaturas medias mensuales, índice de agresividad de Fournier, Precipitación extrema anual, curvas altura-duración-frecuencia, cálculo del hietograma de tormenta, ponderación de estaciones por polígonos de thiessen, media aritmética y manual, análisis de datos procedentes de radar, entre otros.

El modelo cuenta con algunas herramientas propias de un SIG como cálculo de áreas, medición de longitudes, perfil longitudinal y otros. También puede realizar cálculos a partir del modelo de elevación digital tales como el mapa de pendientes, el de isócronas o el mapa de número de curva. En el caso de no contar con un modelo digital de elevaciones, el programa podrá trabajar con parámetros introducidos y calculados externamente por el usuario.

La simulación hidrológica está dividida en dos: el cálculo de caudales pico (simulación de eventos) y el caudal medio (simulación continua). Para la simulación de eventos, que es la que nos interesa, utiliza métodos muy básicos y sencillos como el hidrograma unitario triangular, el método de las isócronas y el método racional.

Para el cálculo de la degradación de la cuenca y producción de sedimentos utiliza dos métodos, la USLE y la MUSLE.

### **5.6.2 Requerimientos de información**

Los datos requeridos para realizar la modelación de la cuenca:

- Modelo digital de elevación.
- Precipitación.
- Temperatura.

### **5.6.3 Salida**

Según el método de simulación escogido los resultados podrán ser presentados en forma gráfica, tabulada o valor numérico.

#### 5.6.4 Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones posibles del SUSHI se presentan en la Tabla 8.

*Tabla 8. Aplicaciones del SUSHI*

<b>Aplicaciones del SUSHI</b>
Planificación de cuencas
Predicción de caudales extremos
Estudio del efecto de cambios de uso de tierra

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

## **Capítulo 6**

### **MODELOS SELECCIONADOS**

Para seleccionar el modelo más apropiado para el proyecto se siguieron los siguientes criterios:

- Determinar que preguntas se deben responder y con cuanta información se cuenta.
- Usar el método más simple para responder estas preguntas.
- Usar el modelo más simple que cumpla con la precisión requerida.
- No tratar de adecuar el problema al modelo, si no buscar el modelo que se adecua al problema.
- No confundir complejidad con precisión.
- Siempre evaluar si la mejora de precisión vale el aumento de esfuerzo y costo requerido.
- Usar un modelo apropiado para simulación de eventos extremos.
- Usar software gratuito.

#### **6.1 TABLA DE COMPARACION**

A continuación se presenta la tabla donde se comparan algunos datos relevantes de los modelos revisados, como su capacidad de análisis, nivel de detalle con que trabajan y elementos hidrológicos que toman en cuenta, sistema operativo sobre el que trabajan y otros.

Adicionalmente a los modelos mencionados en este capítulo, se presenta información de modelos que también fueron revisados, pero se descartaron de este documento por no tener la capacidad de modelación de eventos.

Tabla 9. Comparación de Modelos

CARACTERÍSTICAS	MODELOS CONSIDERADOS								
	WinHSPF	HEC-HMS	EVENTO	TETIS	HBV	SUSHI	TOPKAPI*	TOPMODEL*	SWAT*
<b>TIPO</b>									
Continuo	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Evento	●	●	●	●	○	●	×	○	○
Distribuido	○	●	○	●	○	●	●	○	●
Semi-distribuido	●	●	●	○	●	●	○	●	●
Global	●	●	●	○	●	●	○	○	×
<b>HIDROLOGÍA</b>									
Divide la cuenca en subcuencas	●	●	●	●	●	●	●	×	●
Escurrimiento áreas impermeables	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Escurrimiento áreas permeables	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Varia parámetros en el tiempo	●	○	○	●	○	○	○	○	×
<b>OTRAS CARACTERÍSTICAS</b>									
Simula calidad de agua	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Toma en cuenta riego	○	○	○	●	○	○	○	○	●
Toma en cuenta usos de suelo	○	○	○	●	●	●	●	○	●
Considera obras de almacenamiento	●	●	○	●	●	●	●	○	●
<b>DATOS GENERALES</b>									
Dificultad de aprendizaje	▲	▼	▼	●	×	▼	×	●	▲
Dificultad del manejo de datos	▲	▼	▲	●	×	▼	×	×	▲
Requerimientos de información	▲	▼	▼	●	×	▼	×	×	▲
<b>CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA</b>									
Entorno									
Software Gratuito	●	●	●	○	○	●	×	○*	●
Open Source	●	●	●	×	○	×	×	○*	●

● Afirmativo    ○ Negativo    × No se tiene informa

Fuente: Elaboración Propia

▲ Alto    ● Medio    ▼ Bajo



Windows

MS-DOS

Unix

Solaris

\* Para propósitos académicos y no comerciales se puede hablar con el autor para obtener una versión gratuita y/o el código fuente.

\* Modelos Continuos.

## 6.2 MODELOS SELECCIONADOS

Al estar este trabajo enfocado en proporcionar información a organizaciones de protección civil para el sistema de alarma temprana y la toma de decisiones en cuanto a prevención de desastres, se tomó la decisión de centrar la búsqueda en la modelación de eventos extremos.

Al ser un trabajo cuyo resultado se pretende que sea aplicado en la mayor cantidad posible de cuencas de Venezuela, y pensando en que la cantidad de información disponible variará de una cuenca a otra, además que por lo general la información es muy escasa; es por esto que se debe apuntar a modelos simples, que no requieran gran cantidad de información.

Para poder ver el comportamiento de los diferentes modelos ante lluvias extremas se utilizarán los eventos máximos registrados en las cuencas seleccionadas, por lo tanto es importante que los modelos seleccionados tengan la capacidad de trabajar con eventos.

Se pretende que el modelo seleccionado en este trabajo sea utilizado por las diferentes instituciones pertenecientes al Estado Venezolano, que tengan la responsabilidad de llevar adelante el Sistema de alarma temprana. Es por esto que se debe optar por software libre, ya que las leyes Venezolanas, alientan el uso de este en instituciones públicas.

En este trabajo se optó por utilizar los modelos bajo ambiente Windows, dado que era el más común entre los modelos considerados, y lo importante es comparar sus capacidades en la modelación hidrológica.

Siguiendo los criterios descritos al inicio de este capítulo se preseleccionaron los modelos WinHSPF, HEC-HMS, SUSHI y EVENTO

El SUSHI fue probado en varias computadoras con Windows XP, el cual es adecuado para este según sus creadores, y resultó ser inestable, es decir, se cierra muchas veces y sin previo aviso perdiendo todos los cambios realizados. Otra desventaja de este modelo son los métodos que utiliza para modelar eventos, estos son demasiado simples y presentan un grado de incertidumbre muy grande, por lo que no son recomendables para el tipo de trabajo que se desea realizar.

Es entonces que quedan seleccionados los siguientes modelos:

- HEC-HMS
- EVENTO
- WinHSPF

## 6.3 INFORMACION REQUERIDA POR MODELOS SELECCIONADOS

En los siguientes puntos se presenta de forma tabulada la información requerida por cada uno de los modelos seleccionados para la simulación de eventos.

### 6.3.1 HEC-HMS

Dato	Distribución	Tipo	Intervalo de tiempo
Precipitación	Subcuenca o Global	Serie de tiempo	1 a 6 minutos
			10 minutos
15 minutos			
20 minutos			
30 minutos			
Caudales	Puntual	1 a 4 Horas	
		6 Horas	
		8 Horas	
		12 Horas	
Geomorfología	subcuenca	Valores	1 Día

### 6.3.2 EVENTO

Dato	Distribución	Tipo	Intervalo de tiempo
Precipitación	Global	Serie de tiempo	Libre (en minutos)
Caudales	Puntual		
Geomorfología	subcuenca	Valores	

### 6.3.3 WinHSPF

Dato	Distribución	Tipo	Intervalo de tiempo
Precipitación	Global	Serie de tiempo	1 Hora 1 Día
Evapotranspiración	Global		
Caudales	Puntual		
Geomorfología	cuenca	DEM	



## Capítulo 7 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LAS CUENCAS SELECCIONADAS

### 7.1 CUENCAS SELECCIONADAS

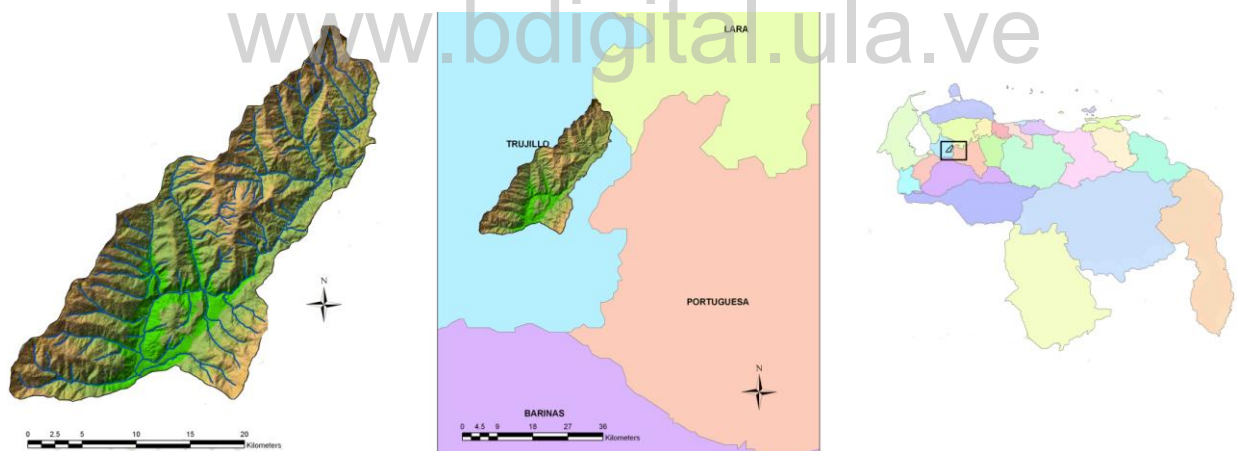
Para el presente trabajo se seleccionaron dos cuencas, una del Estado Trujillo y otra del estado Mérida, para las cuales se encontró información de eventos extremos con un intervalo de tiempo adecuado para este trabajo. Las dos cuencas seleccionadas son:

- Cuenca alta del río Boconó, Edo. Trujillo.
- Microcuenca La Valencia Del Río Mucujún, Edo. Mérida.

### 7.2 INFORMACIÓN RECOPIADA

#### 7.2.1 CUENCA DEL RIO BOCONÓ

La cuenca del río Boconó hasta Boconó tiene un área de 501 Km<sup>2</sup> y está localizada en el municipio del mismo nombre al este del estado Trujillo. (Figura 13)



*Figura 13. Ubicación de la Cuenca del río Boconó hasta Boconó*

Este río forma parte del sistema Boconó – Tucupido que tiene como propósitos principales el riego y la hidroelectricidad.

La información disponible para los eventos que serán estudiados fue obtenida de las estaciones mostradas en la Figura 14, en la Tabla 10 y en la Tabla 11.



Figura 14. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Boconó

Tabla 10. Estaciones pluviométricas utilizadas de la cuenca del río Boconó

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Información horaria disponible
Boconó	360007	1021926	Junio 1971
San Rafael	361592	1035810	Junio 1971

Tabla 11. Estación de medición de caudales utilizada de la cuenca del río Boconó

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Información horaria disponible
Boconó en Boconó	360007	1021926	Junio 1971

Adicionalmente se cuenta con información digital, en formato compatible con el paquete ArcGIS 8.0 o posterior, presentados en la Tabla 12.

Tabla 12. Información digital disponible de la cuenca del río Boconó

Descripción	Tipo
Modelo Digital de Elevación	Grilla
Curvas de nivel cada 40 m	Polilíneas
Ríos	Polilíneas
Delimitación de la cuenca	Polígonos
Delimitación de sub-cuencas	Polígonos
Estaciones de aforo	Puntos
Estaciones pluviométricas	Puntos

### 7.2.2 MICROCUENCA LA VALENCIA

La microcuenca La Valencia tiene un área de 32.22 ha. Forma parte de la subcuenca La Cuesta del río Mucujún, que se encuentra al centro del estado Mérida, desembocando al río Albarregas en la zona este de la ciudad de Mérida.

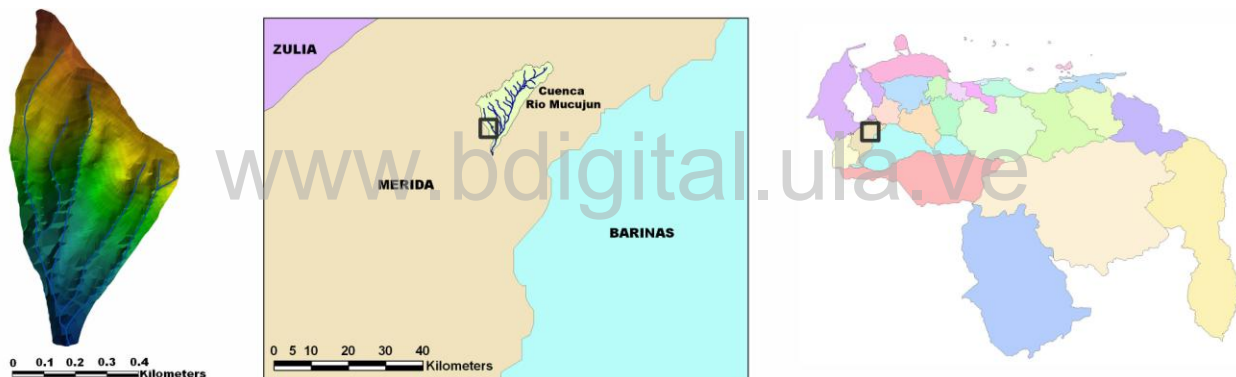


Figura 15. Ubicación de la Microcuenca La Valencia

Actualmente la cuenca del río Mucujún es una de las principales cuencas abastecedoras de agua de la ciudad de Mérida, captándose el agua a través de una toma directa.

En la Figura 16 se puede observar la ubicación de las estaciones de medición de caudales y precipitación instaladas en la cuenca.

La información disponible para los eventos que serán estudiados fue obtenida de las estaciones mostradas en la Figura 16 y en la Tabla 13 y la Tabla 14.

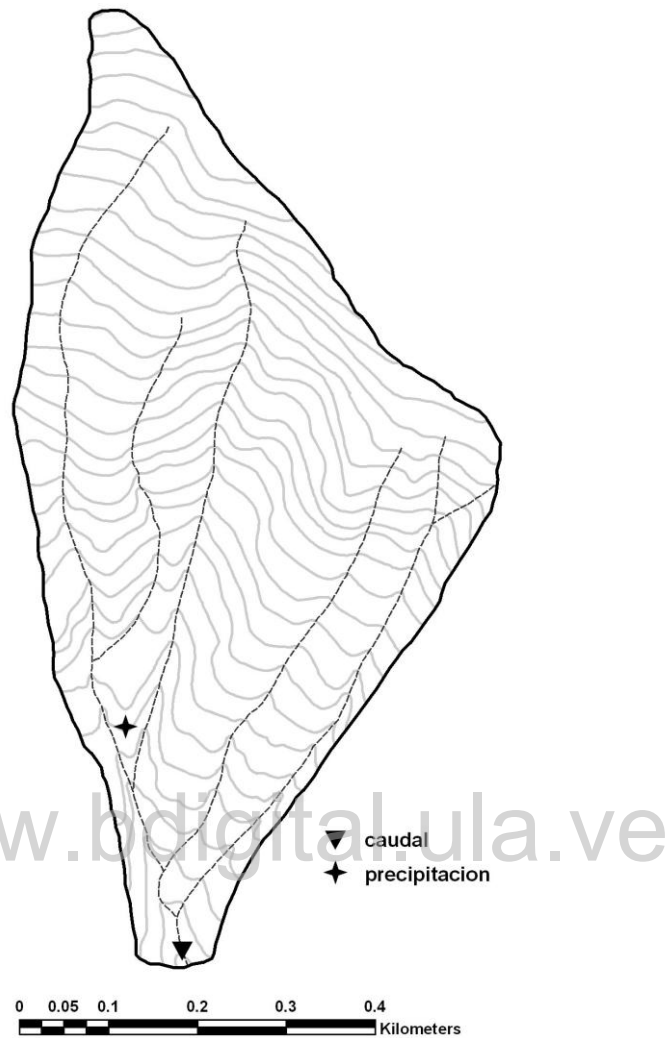


Figura 16. Estaciones instaladas en la microcuenca La Valencia

Tabla 13. Estaciones pluviométricas utilizadas de la microcuenca La Valencia

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Información horaria disponible
La Valencia	266283	957831	Se conocen solo los eventos en estudio

Tabla 14. Estación de medición de caudales utilizada de la microcuenca La Valencia

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Información horaria disponible
La Valencia	266219	958084	Se conocen solo los eventos en estudio

Adicionalmente se cuenta con información digital, en formato compatible con el paquete ArcGIS 8.0 o posterior, presentados en la Tabla 15

*Tabla 15. Información digital disponible de la microcuenca La Valencia*

<b>Descripción</b>	<b>Tipo</b>
Modelo Digital de Elevación	Grilla
Curvas de nivel cada 10 m	Polilíneas
Ríos	Polilíneas
Delimitación de la cuenca	Polígonos
Delimitación de sub-cuencas	Polígonos
Estaciones de aforo	Puntos
Estaciones pluviométricas	Puntos

### 7.3 EVENTOS SELECCIONADOS PARA LA MODELACIÓN

Para cada una de las cuencas se seleccionaron, entre la información recopilada, dos eventos extremos; uno para realizar la calibración de los modelos, y otro para el proceso de validación.

En la Tabla 16 Se presenta el periodo de tiempo al que corresponde cada uno de estos eventos seleccionados. Los datos correspondientes a cada evento se presentan en el anexo B.

*Tabla 16. Eventos seleccionados para cada cuenca*

<b>Cuenca</b>	<b>Proceso</b>	<b>Periodo de tiempo</b>
Boconó	Calibración	1 al 4 de Junio de 1971
	Validación	22 al 29 de Junio de 1971
La Valencia	Calibración	22 de Noviembre de 1981
	Validación	11 de Diciembre de 1981

## Capítulo 8 MODELACION DE LAS CUENCAS SELECCIONADAS

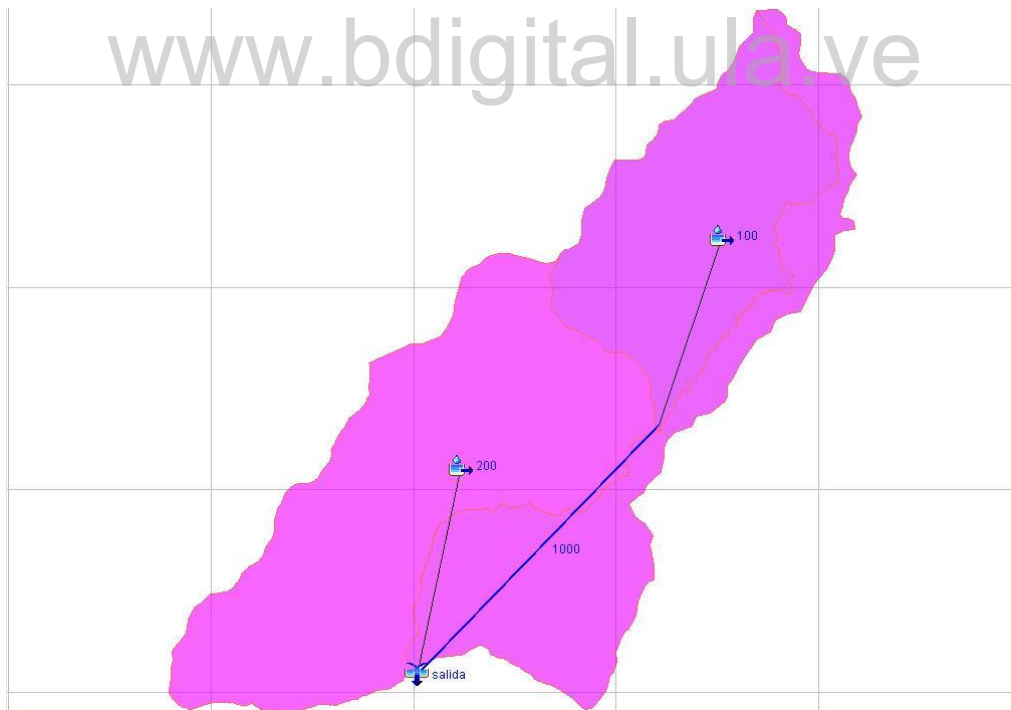
En el Anexo C se tiene una descripción a modo de manual rápido de los pasos a seguir para realizar la modelación de una cuenca con los modelos seleccionados. Esta permitirá al lector familiarizarse con el programa e iniciarse en su utilización.

### 8.1 MODELACION CON EL MODELO HEC-HMS

A continuación se presenta un resumen de los datos introducidos al modelo HEC-HMS para realizar la simulación de los eventos extremos escogidos de las dos cuencas seleccionadas y los resultados obtenidos para estas.

#### 8.1.1 MODELACION DE LA CUENCA DEL RIO BOCONÓ CON EL MODELO HEC-HMS

En la Figura 17 se muestra la esquematización de la cuenca del Río Boconó para el uso del modelo HEC-HMS. Esta esquematización se deduce de la división de subcuencas, como se presenta en la Figura 18, donde cada una de esta está subdividida a su vez en vertientes.



*Figura 17. Esquematización Río Boconó en el modelo HEC-HMS*

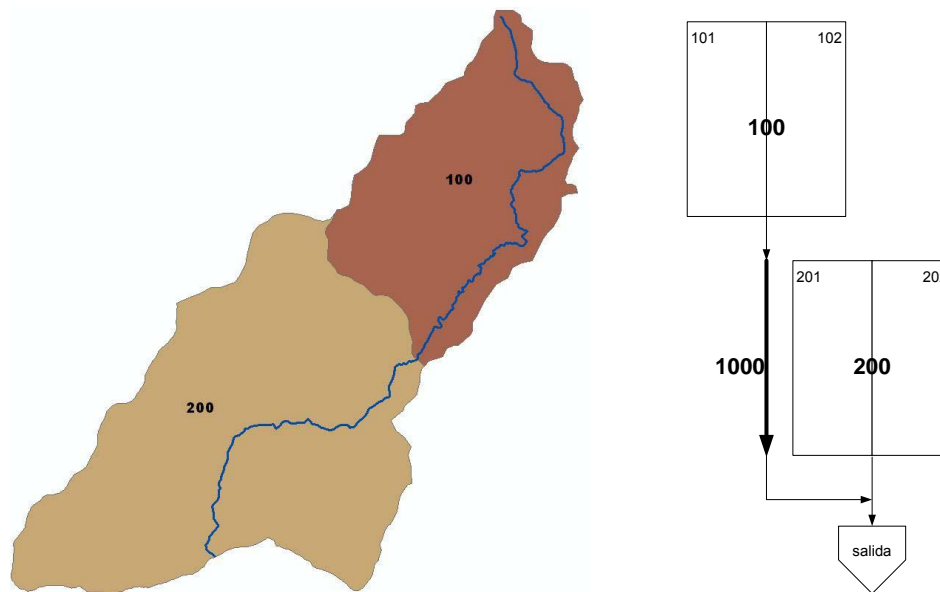


Figura 18. Esquematzación Río Boconó para el HEC-HMS

Tabla 17. Datos de cada subcuena de la cuena del Río Boconó para el modelo HEC-HMS

Subcuena	100	200
Área (km <sup>2</sup> )	173.32	327.58
<b>Vertiente 1</b>		
Longitud (m)	5938	1744.14
Pendiente (m/m)	0.455	0.4
Rugosidad	0.35	0.35
% área total	77.3	22.7
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Vertiente 2</b>		
Longitud (m)	7627.69	2974.70
Pendiente (m/m)	0.458	0.377
Rugosidad	0.35	0.35
% área total	71.94	28.06
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Canal</b>		
Longitud (m)	22561.71	30896.92
Pendiente (m/m)	0.0137	0.0192
Forma	Rectangular	Rectangular
Base (m)	15	15
Rugosidad	0.035	0.035

En la Figura 19 se puede observar que los resultados obtenidos con los valores utilizados para esta primera simulación no son aceptables, ya que tanto el pico máximo como el volumen total de agua producida están muy por debajo de los valores observados.

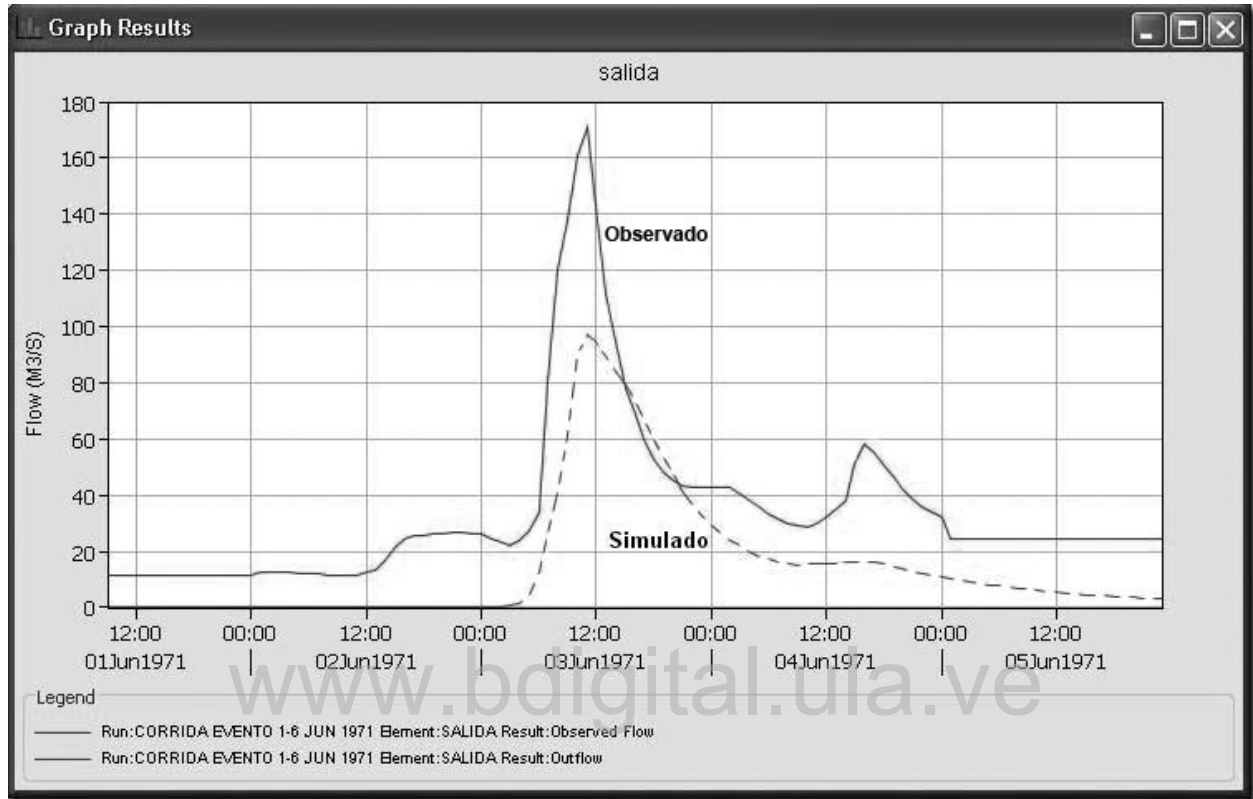


Figura 19. Resultados de la primera simulación de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS

- **Calibración**

En la Figura 20 se presentan los resultados obtenidos luego de realizar el proceso de autocalibración. Como se puede ver en estos, se logró una diferencia de 0% en el pico máximo del evento, aunque con una diferencia de 2 horas en el tiempo al pico; y en el volumen se alcanza una diferencia de -9.95%.

Esta calibración resulta muy buena para determinar la zona afectada por el evento, ya que el pico máximo se alcanzó con la simulación; adicionalmente, y a pesar de tener un volumen total simulado inferior al volumen total observado, la forma del hidrograma en las horas cercanas a este es muy similar al hidrograma observado, que es lo mismo que decir que se tiene el volumen total de agua para estas horas, lo que permite tener una idea de cuánto tiempo permanecerá inundada cada zona.



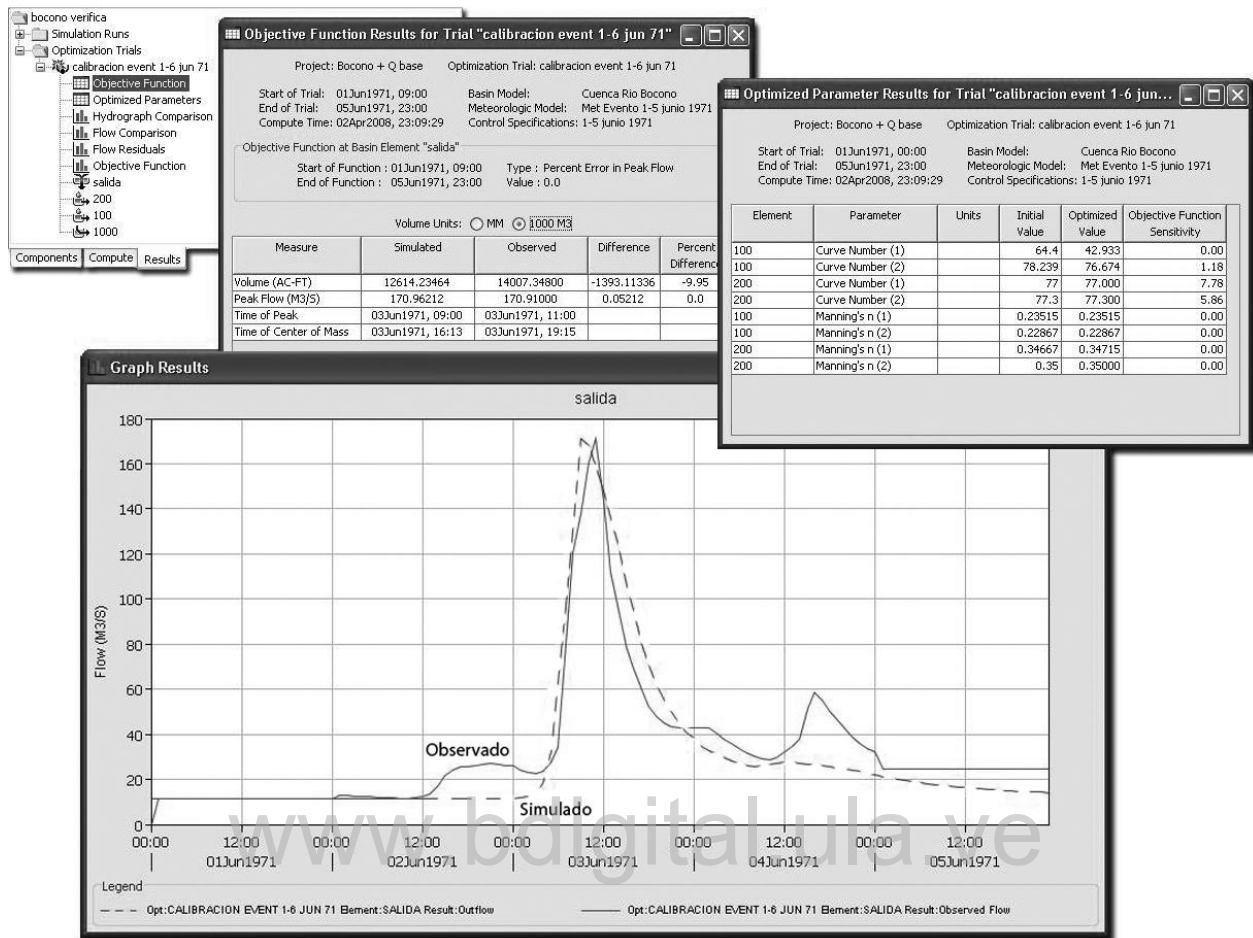


Figura 20. Resultados de la calibración en el HEC-HMS para la cuenca del Río Boconó

• **Validación**

Para verificar que la calibración alcanzada es apropiada para la cuenca y cuán bien representa la cuenca el modelo HEC-HMS, se modeló, utilizando los parámetros obtenidos, el evento del 22 al 29 de junio de 1971.

Una vez ejecutado el modelo se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 21.

Como se ve en la Figura 21 se alcanzó la magnitud y ubicación en el tiempo del pico, aunque la forma del hidrograma resultante es diferente al hidrograma observado en las horas más alejadas antes y después del pico máximo, pero en las horas alrededor del este se comporta de manera bastante similar al observado.

El pico simulado es un 0.3% más grande, el tiempo al pico es el mismo al observado y el volumen generado es un 10.23% más pequeño que el observado.

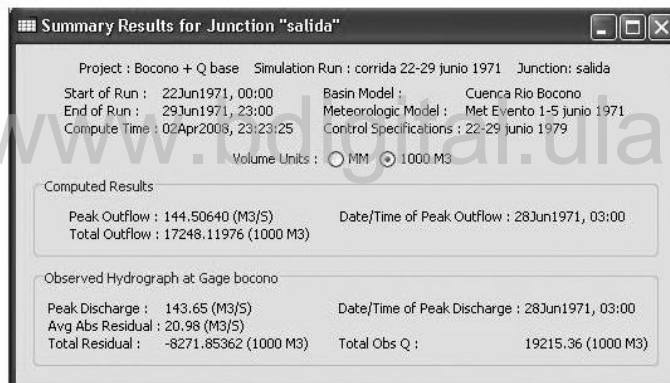
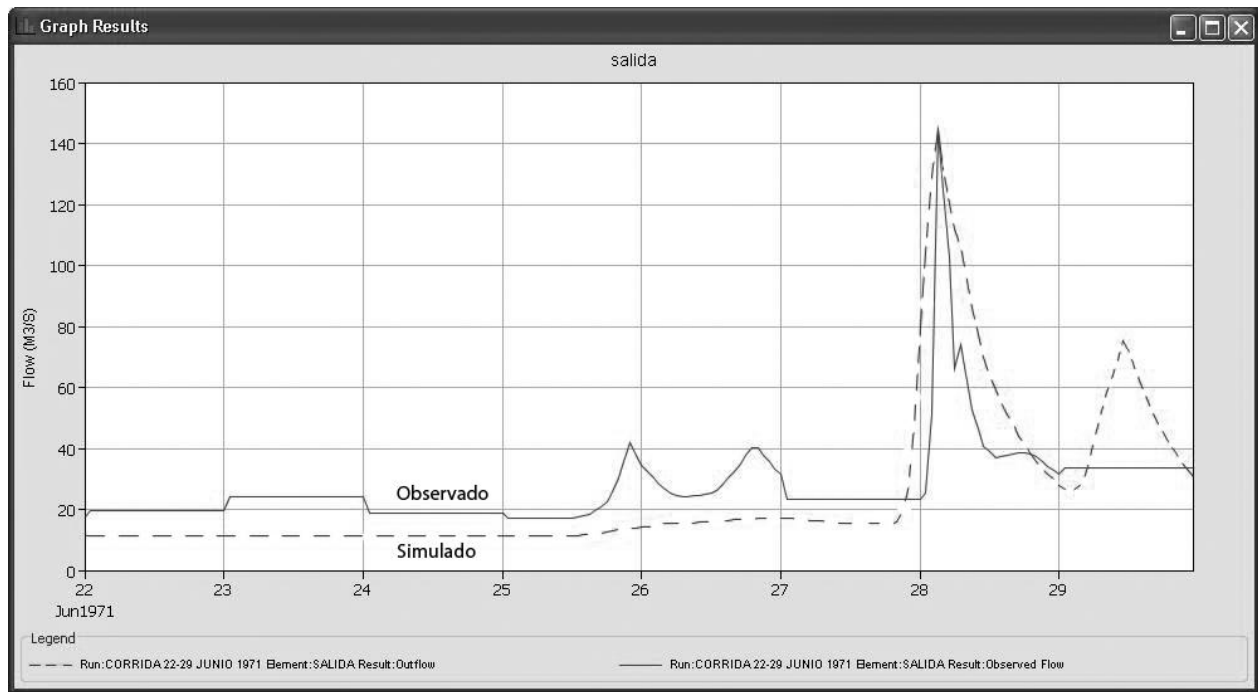


Figura 21. Resultados del evento empleado para la validación de la calibración del HEC-HMS para la cuenca del Río Boconó

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en la fase de calibración, por lo tanto se puede decir que la calibración queda validada.

Se puede observar que el dato menos confiable en la simulación de esta cuenca en el HEC-HMS con esta calibración es el tiempo al pico, mientras que el grado de incertidumbre es menor en cuanto al pico máximo y al volumen total en las horas cercanas a este.

### 8.1.2 MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO HEC-HMS

Para la calibración del modelo HEC-HMS para la microcuenca La Valencia se utilizó el evento del 22 de Noviembre de 1981.

En la Figura 22 se muestra la esquematización de la microcuenca La Valencia en el modelo HEC-HMS. Esta esquematización se deduce de la división de subcuencas presentada también en la Figura 23.

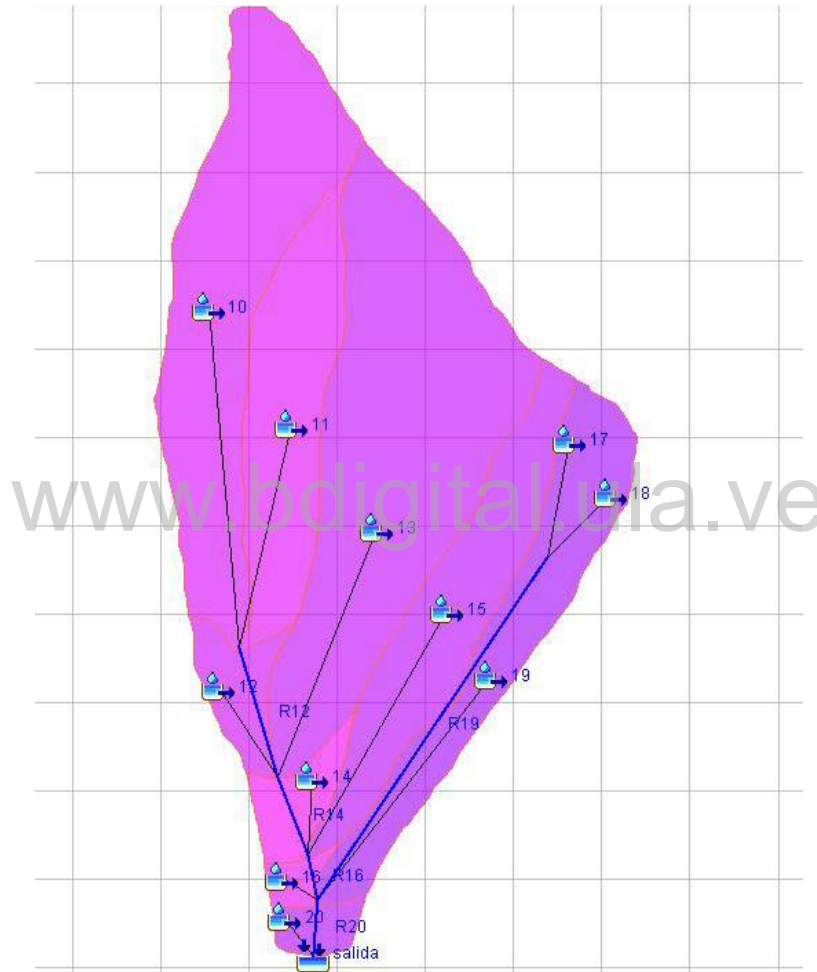


Figura 22. Esquematización microcuenca La Valencia en el modelo HEC-HMS

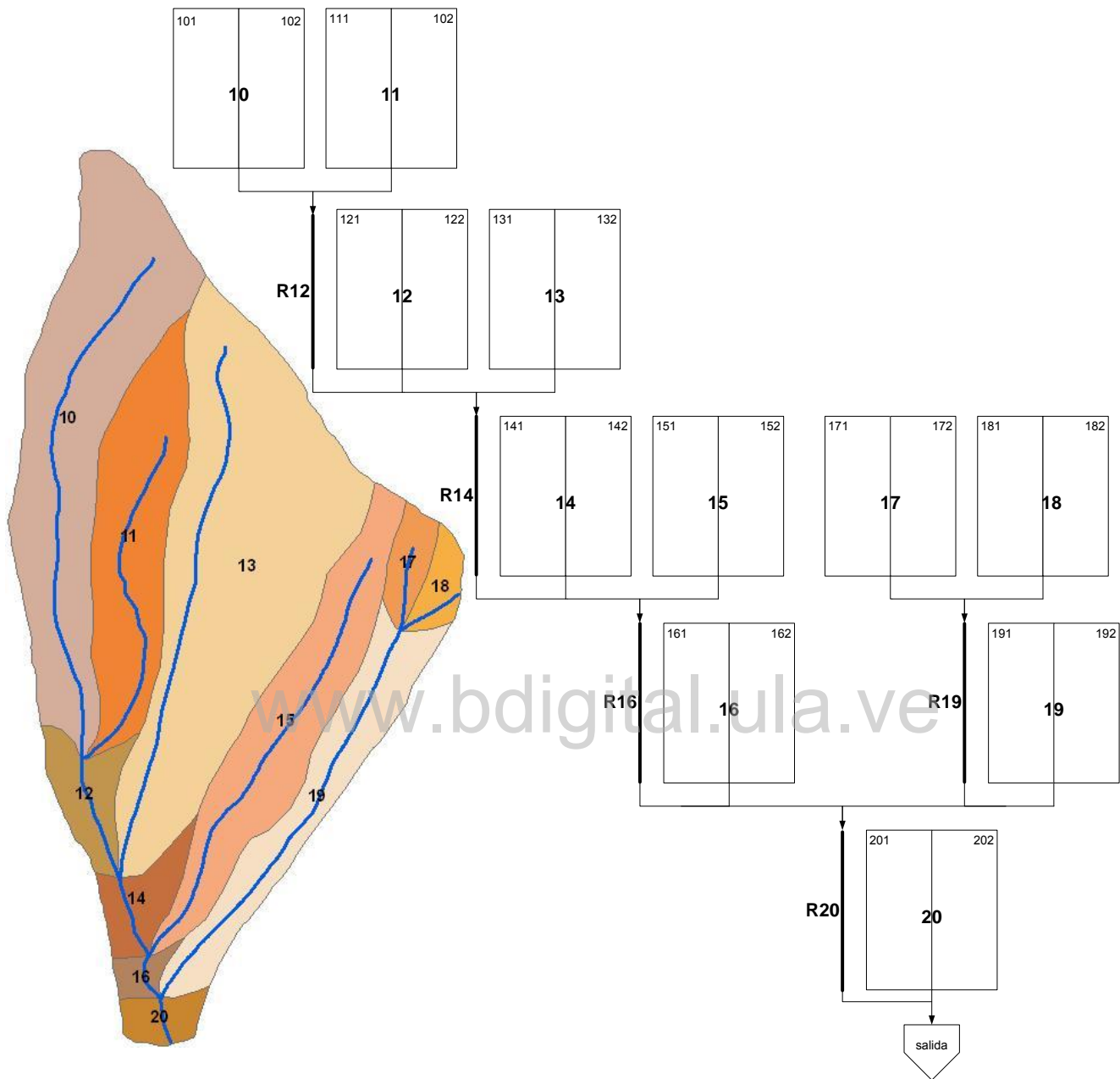


Figura 23. Esquematización microcuenca La Valencia

Tabla 18. Datos de cada subcuenca de la microcuenca La Valencia para el modelo HEC-HMS

Subcuenca	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Área (km <sup>2</sup> )	0.085	0.03	0.009	0.1	0.007	0.047	0.004	0.006	0.006	0.026	0.002
<b>Vertiente 1</b>											
Longitud (m)	64.06	48.08	53.52	44.82	27.4	46.71	42.09	29.4	59.26	27.33	31.5
Pendiente (m/m)	0.338	0.477	0.2242	0.5293	0.7142	0.3892	0.5372	0.5319	0.495	0.3804	0.4760
Rugosidad	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35	0.3	0.35	0.25	0.25	0.3	0.3
% área total	49	60	71	28	44	55	67	24	70	53	35
NC	73	73	73	84	73	84	74	86	86	84	74
% impermeabilidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vertiente 2</b>											
Longitud (m)	66.92	31.73	21.84	115.2	35.4	38.91	20.87	92.8	25.18	24.16	58.5
Pendiente (m/m)	0.248	0.4202	0.2839	0.4774	0.5601	0.3797	0.2708	0.5319	0.3824	0.4918	0.1709
Rugosidad	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35	0.3	0.3	0.25	0.25	0.3	0.3
% área total	51	40	29	72	56	45	33	76	30	47	65
NC	73	73	73	84	73	84	74	86	86	84	74
% impermeabilidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Canal</b>											
Longitud (m)	650	375	125	625	117.5	550	57.5	50	67.5	505	20
Pendiente (m/m)	0.338	0.375	0.238	0.32	0.16	0.35	0.153	0.541	0.6	0.294	0.153
Forma	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec
Base (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Rugosidad	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.043	0.045	0.043	0.043	0.045	0.045

Tabla 19. Datos de cada canal de la microcuenca La Valencia para el modelo HEC-HMS

Elemento	R12	R14	R16	R19	R20
Longitud (m)	125	117.5	57.5	505	20
Pendiente (m/m)	0.238	0.16	0.153	0.294	0.153
Forma	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Rectangular
Base (m)	2	2	2	2	2
Rugosidad	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045

Como resultado de la esta primera modelación se obtuvieron los resultados mostrados en Figura 24.

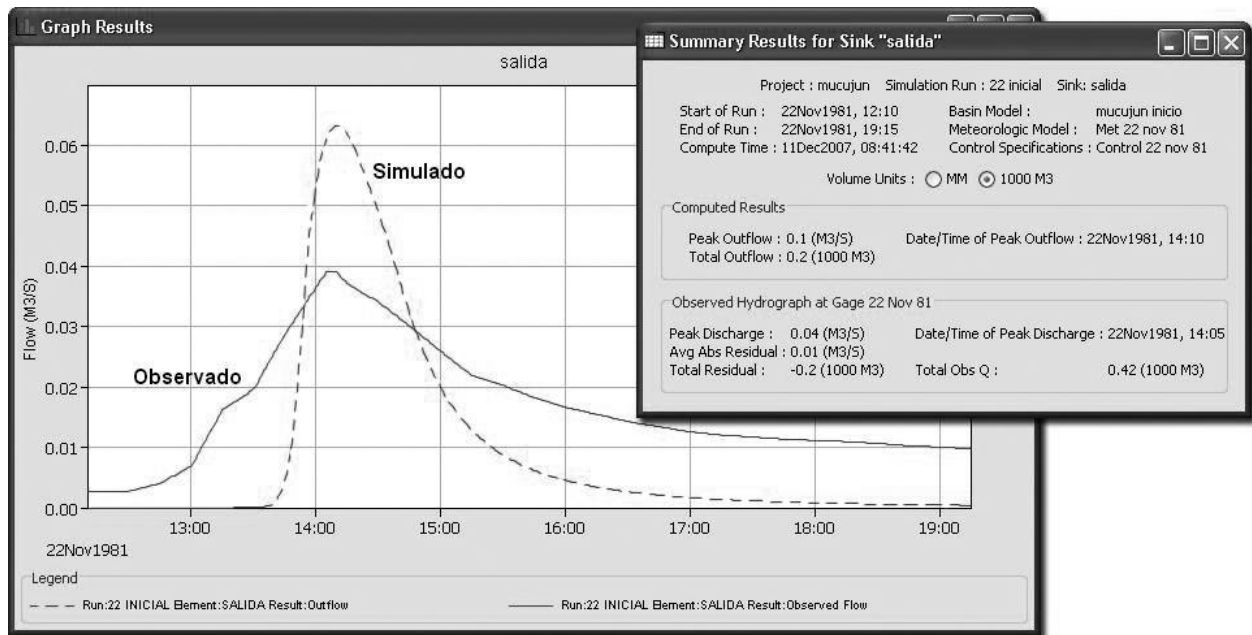


Figura 24. Resultados preliminares de la simulación de la microcuenca La Valencia en el HEC-HMS

Al observar los resultados se aprecia que el pico simulado está muy por encima del pico observado, por lo que se requiere calibrar el modelo.

- **Calibración**

Se procedió a crear una corrida de optimización obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 25.

Como se puede ver el pico se alcanza con un error de 2.7% por encima, aunque dejando una considerable diferencia en el volumen total generado de -42.74%. La forma del hidrograma en las horas cercanas al pico se asemeja bastante al observado.

Como en el caso de la cuenca del Río Boconó este resultado nos permite determinar la zona afectada por el evento, ya que el pico máximo se simuló con buena precisión. Así mismo al tener la forma del hidrograma en las horas cercanas al pico máximo similar al hidrograma observado, permite tener una idea de cuánto tiempo permanecerá inundada cada zona.

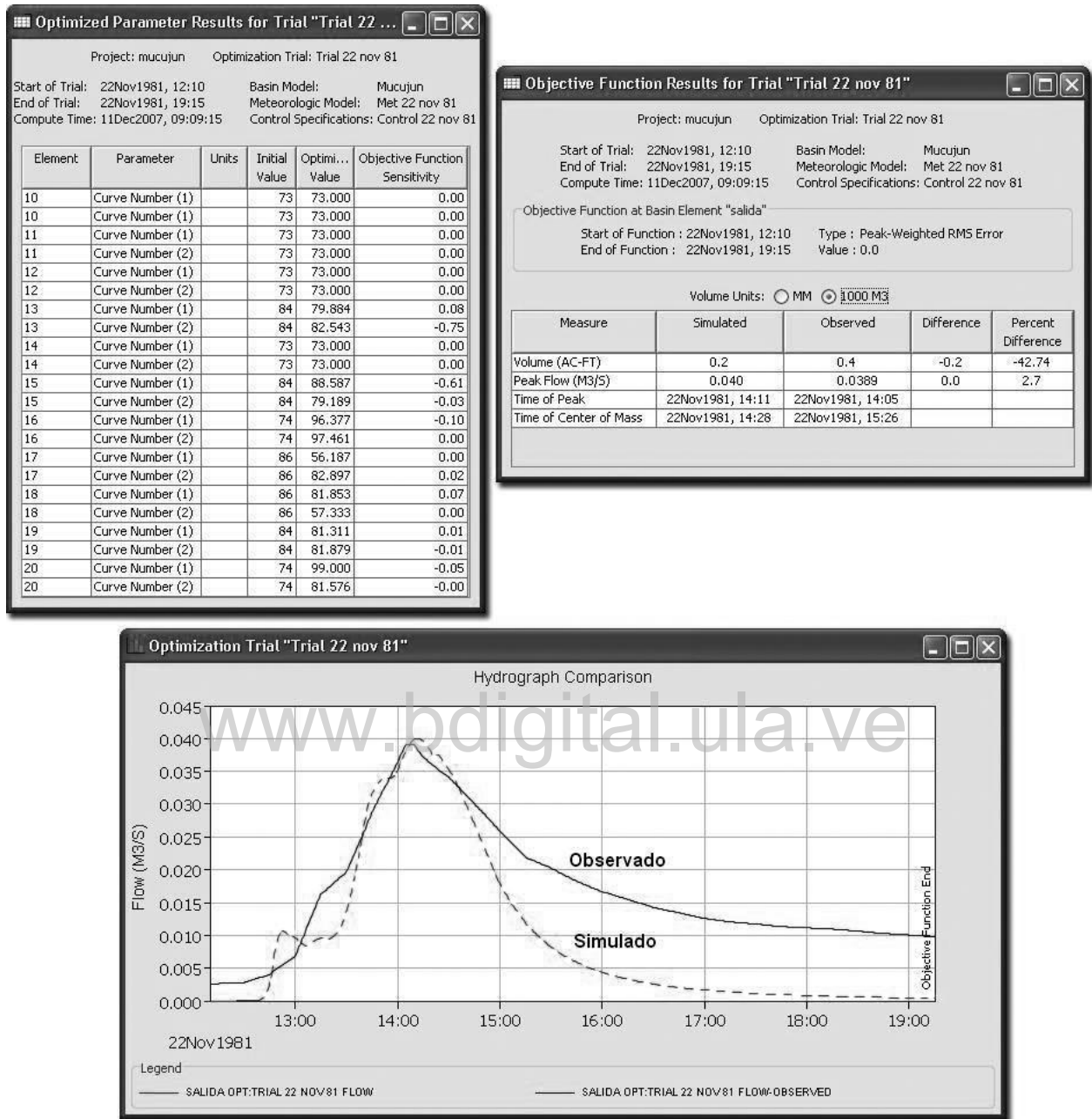


Figura 25. Resultados de la calibración de la simulación de la microcuenca La Valencia en el HEC-HMS

• **Verificación**

Para la verificar la calibración del modelo para la microcuenca La Valencia se utilizó el evento del 11 de diciembre de 1981, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 26.

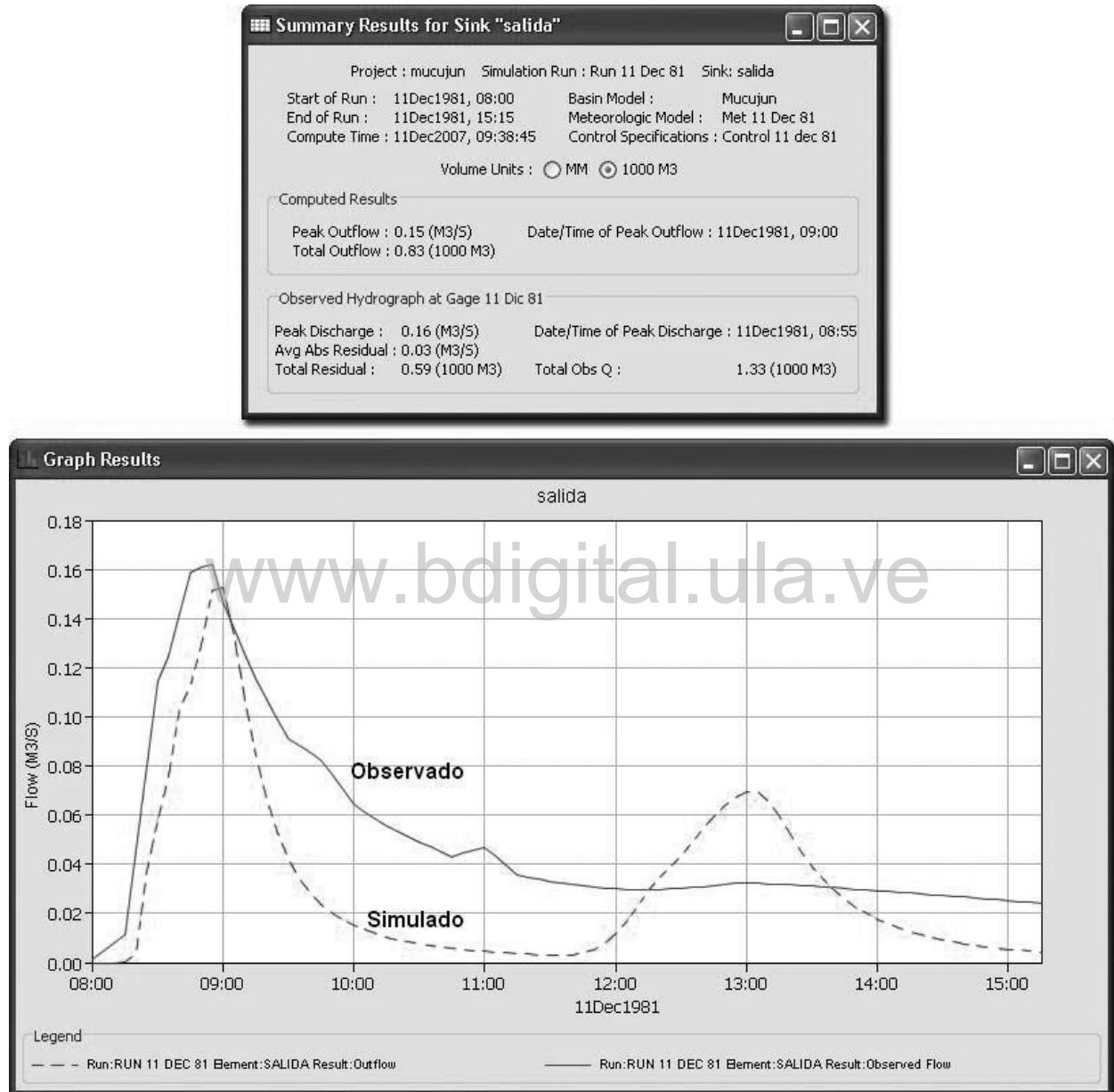


Figura 26. Resultados de la verificación de la simulación de la microcuenca La Valencia en el HEC-HMS



Se tiene que el pico generado es un 6% por debajo del observado y tiene una diferencia de 5 minutos en el tiempo al pico. Por otra parte, el volumen simulado es un 37.6% más bajo que el observado.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en la fase de calibración. Aunque el pico máximo quedo por debajo del observado, este se mantuvo en un valor cercano, con un error relativamente pequeño. El error en el volumen total se mantuvo en el mismo orden de magnitud en porcentaje.

Por lo tanto se puede decir que la verificación de la calibración dio resultados positivos para la microcuenca La Valencia en el modelo HEC-HMS.

## **8.2 MODELACION CON EL MODELO WinHSPF**

A continuación se presenta un resumen de los datos introducidos al modelo WinHSPF para realizar la simulación de los eventos extremos escogidos de las dos cuencas seleccionadas y los resultados obtenidos para estas.

### **8.2.1 MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ CON EL MODELO WinHSPF**

Para la representación física de la cuenca se utilizó la información digital compatible con ArcGIS disponible, la cual fue exportada al paquete MapWindow como se muestra en la Figura 27. El MapWindow luego de procesar toda esta información le pasa los resultados directamente al modelo WinHSPF, quedando la cuenca esquematizada como se muestra en la Figura 28.

Entre los datos generados por el MapWindow a partir de la información proporcionada se encuentran longitudes de cauce, pendientes de cauce y vertientes, áreas aportantes y otros.

El evento utilizado para realizar el proceso de calibración es el correspondiente a los días 1 al 6 de junio de 1971.

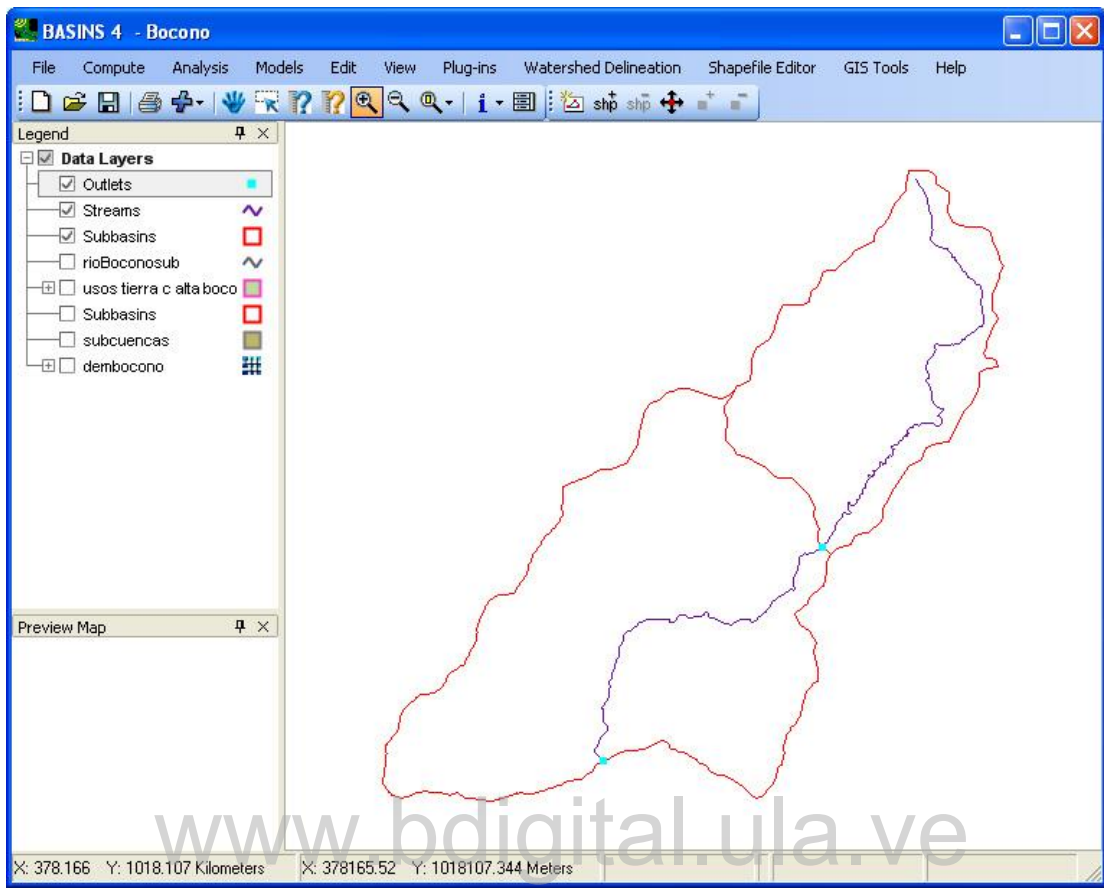


Figura 27. Utilizando el MapWindow para el WinHSPF

En la Figura 29 se presentan los resultados obtenidos por la simulación de la cuenca del Río Boconó en el modelo WinHSPF. Lo que salta a la vista es que existe una gran diferencia en la magnitud de los caudales, siendo los generados muy pequeños en comparación con los observados, por lo que se requiere realizar un proceso de calibración.

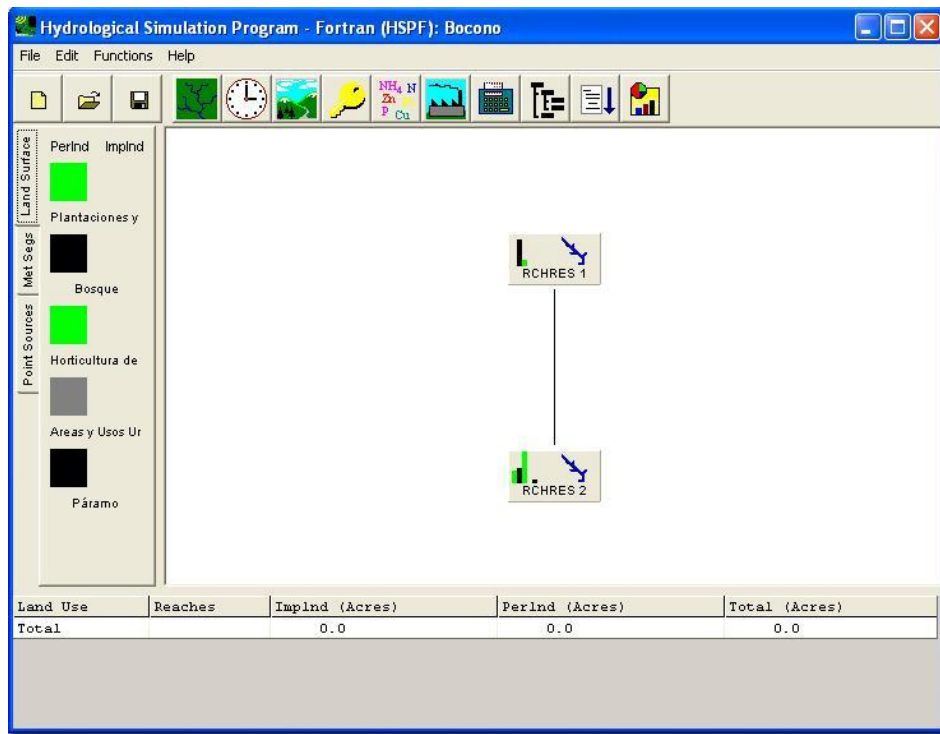


Figura 28. Esquema de la cuenca del Río Boconó en el modelo WinHSPF

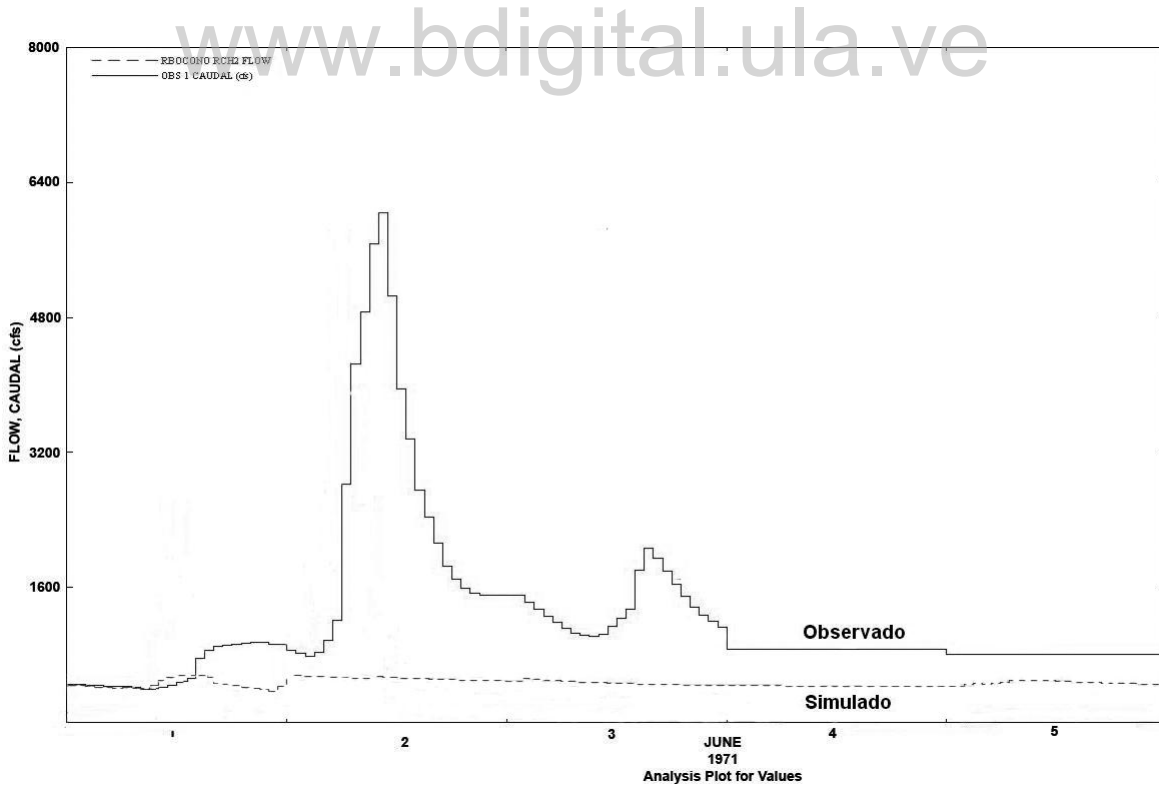


Figura 29. Salida del modelo WinHSPF para la cuenca del Río Boconó

- **Calibración**

Este modelo no cuenta con un modulo de autocalibración, por lo que se procedió a realizar la calibración manualmente por ensayo y error. Debido a que se tiene una gran cantidad de parámetros (17 en nuestro caso) este procedimiento dura varias horas. Al final se llegó al resultado presentado en la Figura 30

Como se puede observar se logro calibrar el pico más alto con un error menor al 1%, aunque este ocurre 4 horas antes que en el hidrograma observado. La forma del hidrograma no sigue la forma del hidrograma observado, aunque si se aproxima en las horas cercanas al pico máximo, y el volumen simulado alcanza tan solo al 42% del observado, lo que da una diferencia del 58%.

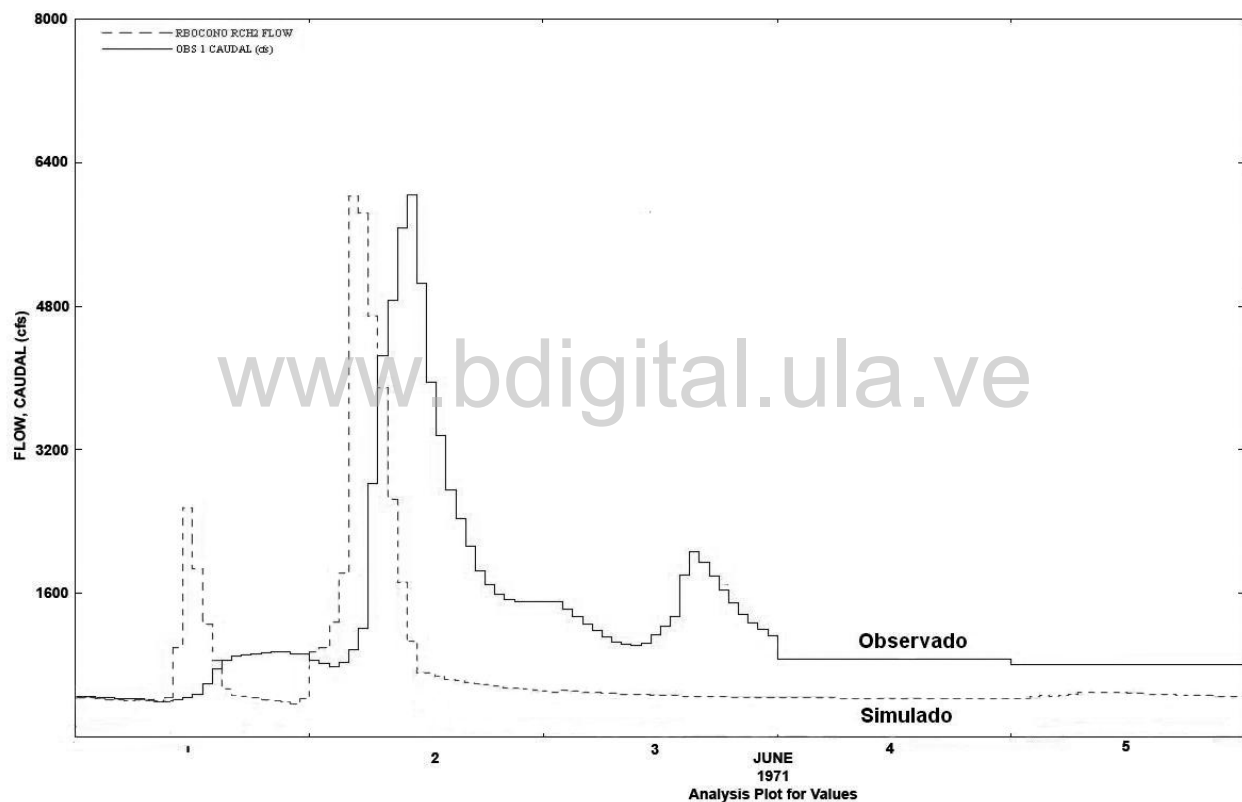


Figura 30. Salida del modelo WinHSPF para la cuenca del Río Boconó después de la calibración

- **Validación**

Para verificar la calibración del modelo WinHSPF para la cuenca del Río Boconó se creó un nuevo proyecto con la información meteorológica correspondiente al evento del 22 al 29 de Junio de 1971 y los parámetros obtenidos en la fase de calibración.

El resultado obtenido al ejecutar el modelo para el evento mencionado se presenta en la Figura 31.

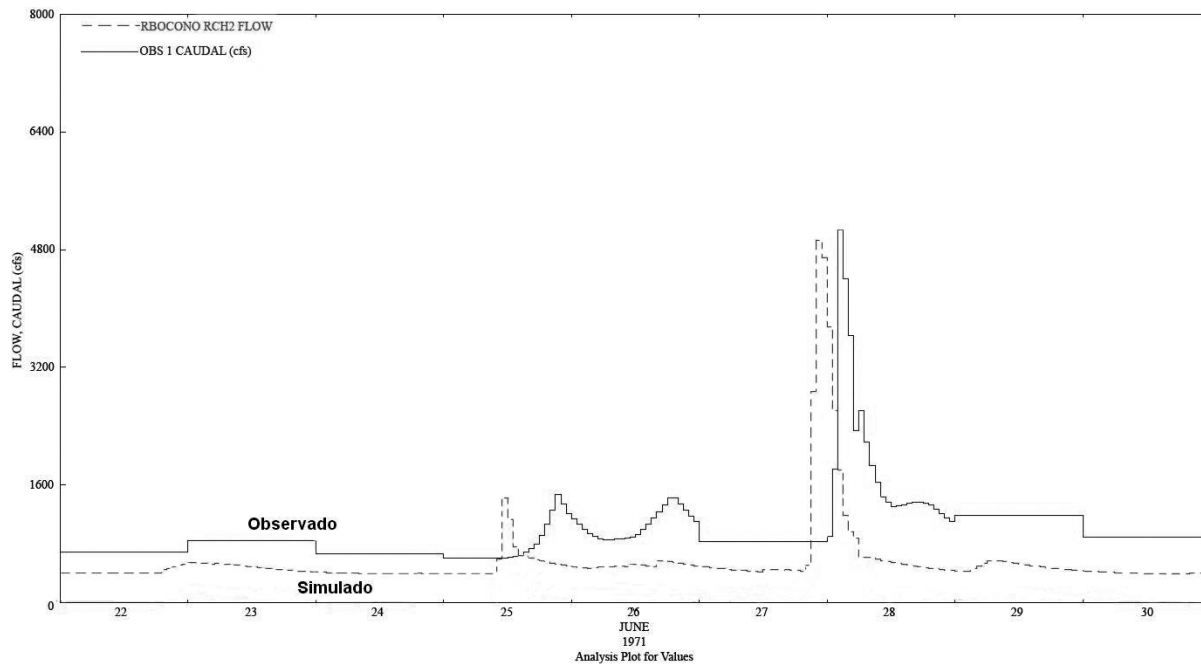


Figura 31. Salida del modelo WinHSPF para la validación de la calibración de la cuenca del Río Boconó.

Como se observa la diferencia entre picos es muy pequeña (4.60%) aunque el simulado se da 4 horas antes que el observado y el volumen generado es un 56.7% menor que el observado. Estos resultados son consistentes con los obtenidos durante el proceso de calibración, por lo que esta queda validada.

### 8.2.2 MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO WinHSPF

Para la modelación de la microcuenca La Valencia en el modelo WinHSPF se siguieron todos los pasos descritos en el punto 8.1.1 para crear un proyecto con toda la información geomorfológica y meteorológica de la cuenca para el evento del 22 de noviembre de 1981.

El modelo WinHSPF trabaja sólo a nivel horario o diario, por lo que no se pudo realizar la modelación directamente con los datos del evento ya que estos tienen un intervalo de tiempo de 5 minutos. Para llevar la información a nivel horario se agruparon los datos, resultando una serie de 3 datos, los que fueron insuficientes para llevar a cabo la modelación.

Por lo tanto no se puede realizar la modelación de eventos de corta duración a nivel horario en el modelo WinHSPF.

### 8.3 MODELACION CON EL MODELO EVENTO

A continuación se presenta un resumen de los datos introducidos al modelo EVENTO para realizar la simulación de los eventos extremos escogidos de las dos cuencas seleccionadas y los resultados obtenidos para estas.

#### 8.3.1 MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO BOCONÓ CON EL MODELO EVENTO

La cuenca se divide en segmentos para ser modelada, en la Figura 32 Se presenta la esquematización de la cuenca y los datos de cada segmento se presentan en la Tabla 20

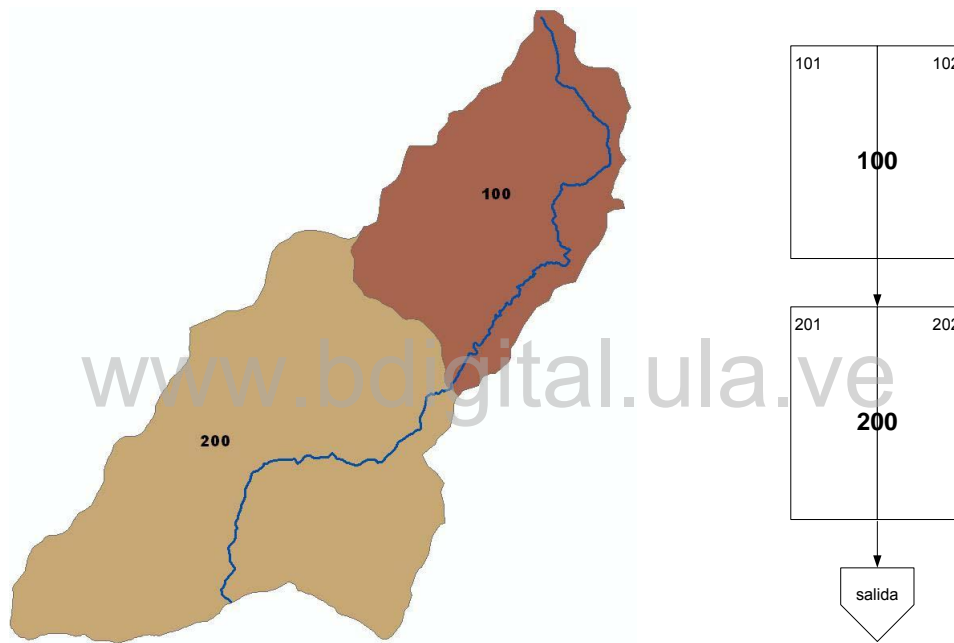


Figura 32. Esquematización de la cuenca del Río Boconó en el modelo EVENTO

El modelo EVENTO no permite introducir el hidrograma observado, por lo que no es posible compararlos directamente en la salida del programa. Es por esta razón que se llevaron los datos de la salida y el hidrograma observado a MS Excel. En la Figura 33 se presenta la salida de la primera corrida.

Tabla 20. Datos de cada subcuenca de la cuenca del Río Boconó para el modelo EVENTO

<b>Subcuenca</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Área (km <sup>2</sup> )	173.32	327.58
<b>Vertiente 1– segmento tipo 1:</b>	<b>101</b>	<b>102</b>
Longitud (m)	5938	1744.14
Pendiente (m/m)	0.455	0.4
Rugosidad	0.35	0.35
Fac. ponderación	0.5	0.5
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Vertiente 2– segmento tipo 1:</b>	<b>201</b>	<b>202</b>
Longitud (m)	7627.69	2974.70
Pendiente (m/m)	0.458	0.377
Rugosidad	0.35	0.35
Fac. ponderación	0.5	0.5
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Canal– segmento tipo 2:</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
Longitud (m)	22561.71	30896.92
Pendiente (m/m)	0.0137	0.0192
Forma	Rectangular	Rectangular
Base (m)	15	15
Rugosidad	0.035	0.035

Como se puede observar en el hidrograma simulado el pico máximo se encuentra muy por debajo del pico máximo observado, por lo tanto se requiere realizar una calibración.



Figura 33. Salida de la primera corrida del modelo EVENTO para la cuenca del Río Boconó

- **Calibración**

La calibración del modelo EVENTO se debe realizar por ensayo y error, ya que no cuenta con una rutina de auto-calibración. Luego de llevar a cabo este proceso se llegó al resultado presentado en la Figura 34.

Como se puede ver el pico se alcanzó con un error de tan solo 0.5% y 12 minutos antes del observado. En cuanto al volumen se generó un 37% menos que el volumen observado.



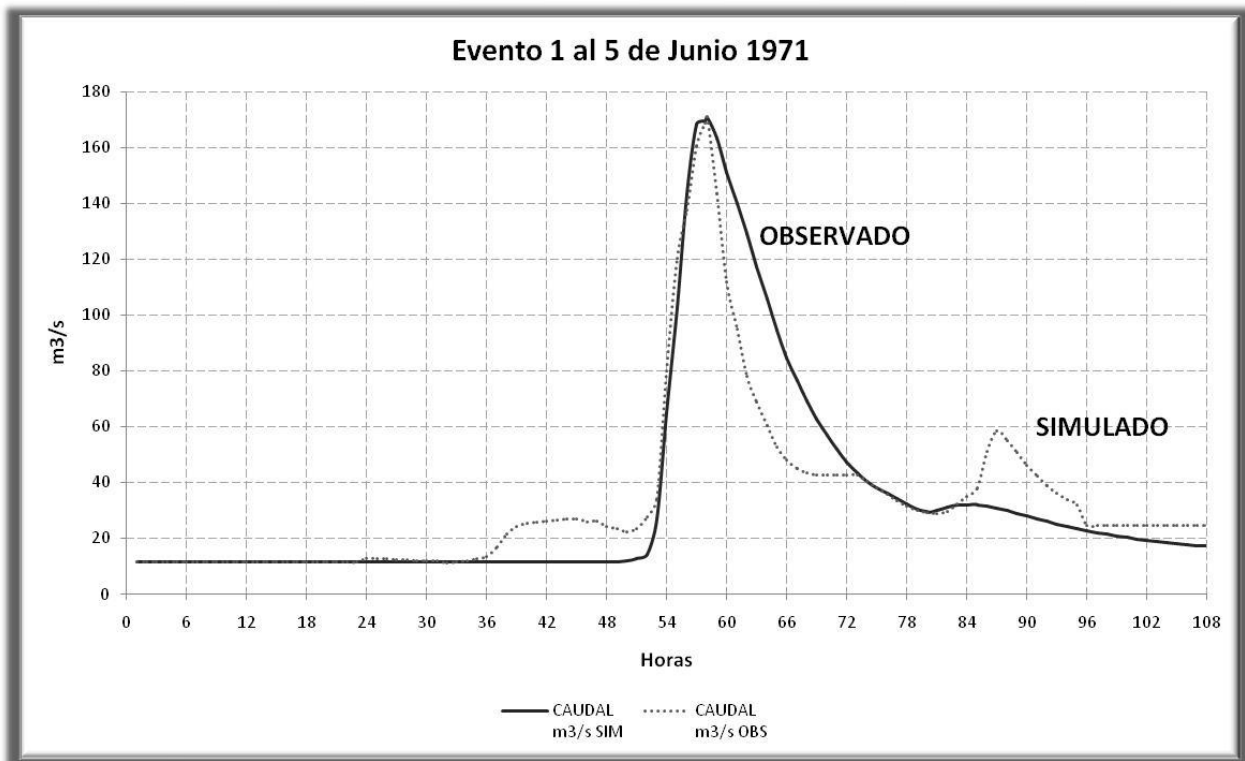


Figura 34. Resultado de la calibración del modelo EVENTO para el Río Boconó

• **Validación**

Como se hizo para los otros modelos se validó la calibración del Río Boconó empleando la tormenta del 22 al 29 de Junio de 1971. El resultado obtenido se presenta en la Figura 35.

Salta a la vista la diferencia entre el hidrograma generado y el simulado. El valor del pico generado es un 93.2% mayor al observado con una diferencia de 1 hora en el tiempo al pico, y el volumen generado es un 50% mayor al observado.

Estos resultados son muy diferentes a los obtenidos durante el proceso de calibración, por lo que se puede concluir que la calibración no es válida.

Luego de realizar los procesos de calibración y validación nuevamente obteniendo un nuevo juego de valores para los parámetros no se obtuvieron mejores resultados. Por esta razón se puede decir que este modelo no es el más apropiado para modelar esta cuenca.

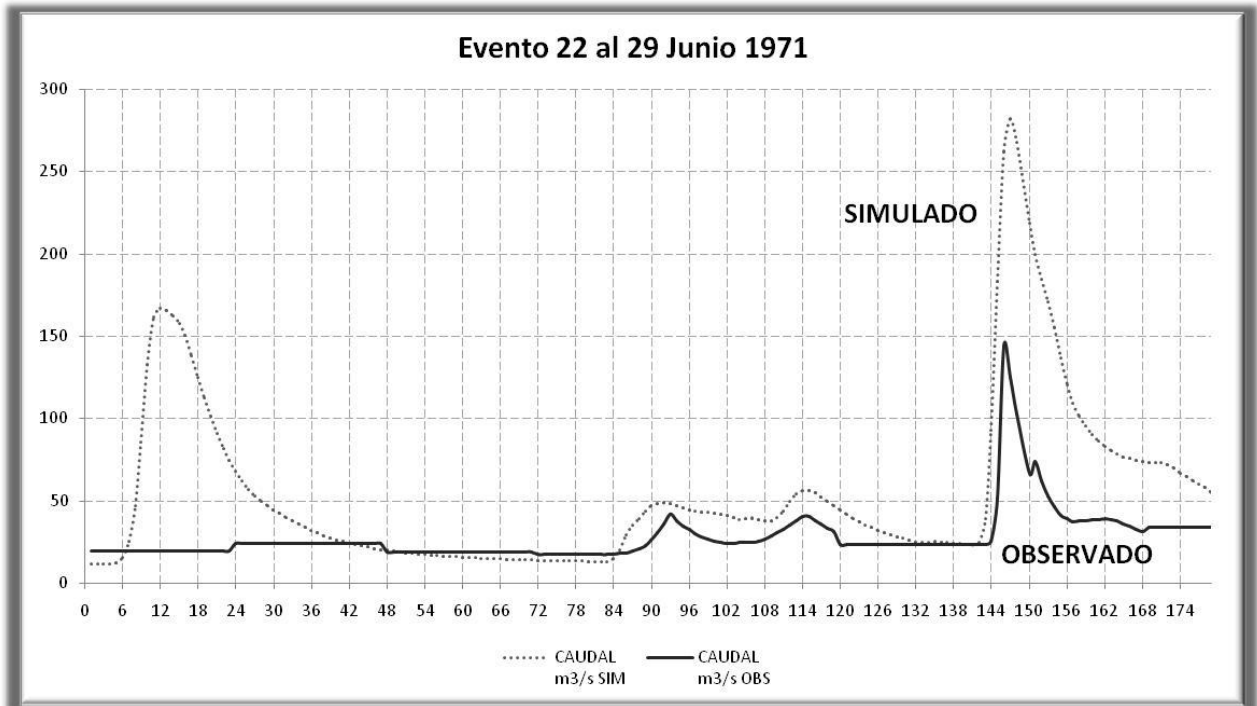


Figura 35. Resultado de la modelación del evento del 22 al 29 de Junio del Río Boconó en el modelo EVENTO

www.bdigital.ula.ve

### 8.3.2 MODELACION DE LA MICROCUENCA LA VALENCIA CON EL MODELO EVENTO

Siguiendo el procedimiento descrito en el punto 8.3.1 se realizó el modelado de la microcuenca La Valencia para el evento del 22 de Noviembre de 1981.

La esquematización de la cuenca utilizada en la modelación de esta en el modelo EVENTO se presenta en la Figura 36.

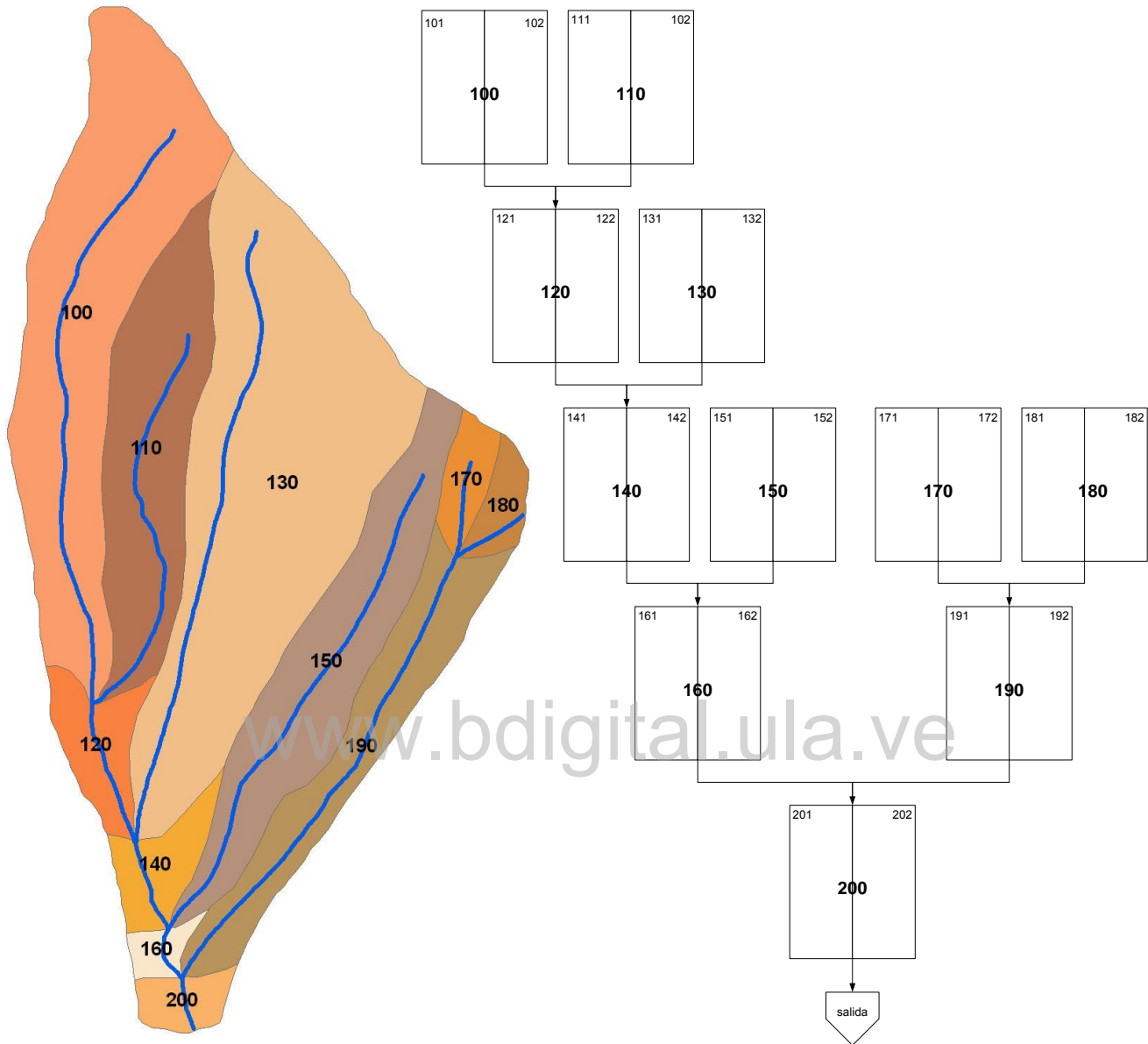


Figura 36. Esquematización de la microcuenca La Valencia en el modelo EVENTO

Los datos para cada segmento se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Datos de cada subcuenca de la microcuenca La Valencia para el modelo EVENTO

<b>Subcuenca</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>120</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>170</b>	<b>180</b>	<b>190</b>	<b>200</b>
Área (km <sup>2</sup> )	0.085	0.03	0.009	0.1	0.007	0.047	0.004	0.006	0.006	0.026	0.002
<b>Vertiente 1: Segmento Tipo 1:</b>	<b>101</b>	<b>111</b>	<b>121</b>	<b>131</b>	<b>141</b>	<b>151</b>	<b>161</b>	<b>171</b>	<b>181</b>	<b>191</b>	<b>201</b>
Longitud (m)	64.06	48.08	53.52	44.82	27.4	46.71	42.09	29.4	59.26	27.33	31.5
Pendiente (m/m)	0.338	0.477	0.2242	0.5293	0.7142	0.3892	0.5372	0.5319	0.495	0.3804	0.4760
Rugosidad	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35	0.3	0.35	0.25	0.25	0.3	0.3
Fac. ponderación	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
NC	73	73	73	84	73	84	74	86	86	84	74
% impermeabilidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vertiente 2: Segmento Tipo 1:</b>	<b>102</b>	<b>112</b>	<b>122</b>	<b>132</b>	<b>142</b>	<b>152</b>	<b>162</b>	<b>172</b>	<b>182</b>	<b>192</b>	<b>202</b>
Longitud (m)	66.92	31.73	21.84	115.2	35.4	38.91	20.87	92.8	25.18	24.16	58.5
Pendiente (m/m)	0.248	0.4202	0.2839	0.4774	0.5601	0.3797	0.2708	0.5319	0.3824	0.4918	0.1709
Rugosidad	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35	0.3	0.3	0.25	0.25	0.3	0.3
Fac. ponderación	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
NC	73	73	73	84	73	84	74	86	86	84	74
% impermeabilidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Canal: Segmento tipo 2:</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Longitud (m)	650	375	125	625	117.5	550	57.5	50	67.5	505	20
Pendiente (m/m)	0.338	0.375	0.238	0.32	0.16	0.35	0.153	0.541	0.6	0.294	0.153
Forma	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec	Rec
Base (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Rugosidad	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.043	0.045	0.043	0.043	0.045	0.045

### • Calibración

Luego de realizar la calibración del modelo para la microcuenca La Valencia se obtuvo el hidrograma presentado en la Figura 37.

El pico alcanzado en la simulación es idéntico en magnitud al pico observado, con una diferencia muy pequeña de 3 minutos antes que el observado. En cuanto al volumen, el simulado es un 64% menor al observado.

En este caso se podrá estimar de una manera muy precisa el área afectada por el evento, pero al tener tanta diferencia en volumen y siendo la forma del hidrograma diferente no se puede calcular de forma precisa el tiempo que se mantendrá inundada la zona.



Figura 37. Resultado de la calibración del modelo EVENTO para la microcuenca La Valencia

- **Validación**

Para la validación se modeló el evento del 11 de diciembre de 1981 utilizando los parámetros obtenidos en la calibración.

El pico obtenido durante la simulación es un 28.4% más grande que el observado y se da 12 minutos antes. El volumen simulado es un 28% menor al observado. La forma del hidrograma simulado presenta un segundo pico, más pequeño, que el observado no tiene.

Los resultados obtenidos no son consistentes con los obtenidos en el proceso de calibración, por lo que no se puede considerar validada la calibración de la microcuenca La Valencia en el modelo EVENTO.



Figura 38. Resultado de la modelación del evento del 11 de Diciembre de 1981 de la microcuenca La Valencia en el modelo EVENTO

#### 8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se expuso en el punto 4.1.4, al momento de calibrar los modelos, existen cuatro características del hidrograma generado que son especialmente importantes para este trabajo: El caudal pico máximo, el tiempo al pico, el volumen total y la forma del hidrograma.

A medida que el caudal pico máximo simulado se acerca al observado, y al realizar una modelación hidráulica del río con este hidrograma, se podrá reproducir de manera más exacta el alcance de la mancha de inundación.

Por otro lado el volumen total generado nos permite determinar cuánto tiempo quedara bajo el agua la zona inundada.

Calibrar de buena manera la forma del hidrograma nos da la posibilidad de determinar en qué momento y por cuánto tiempo se inundará un punto de la zona afectada por el evento.

Por último el tiempo al pico es importante desde el punto de vista de un sistema de alarma temprana, en el que saber el tiempo con el que se cuenta es primordial.

Ahora bien, las dos cuencas consideradas en este trabajo, por razones de disponibilidad de información, pertenecen a los andes venezolanos, es decir, son de alta pendiente. Para este tipo de cuencas, debido a las velocidades de flujo que se presentan y a la pendiente del terreno, el volumen total simulado no es relevante, debido a que el agua tenderá siempre a escurrir sin dejar áreas inundadas. Por otro lado el pico máximo y el tiempo al pico si son importantes; ya que, como sabemos, nos permiten determinar la zona afectada por el evento y cuando alcanzara esta su máxima extensión.

Si se considera que, en su gran mayoría, las cuencas de alta pendiente pasan a ser o desembocan a un río de baja pendiente, el volumen total, en caso de requerirse la información en estas zonas bajas, toma relevancia nuevamente por las razones ya expuestas.

Después de realizar la modelación de las cuencas seleccionadas en los tres modelos se elaboró un cuadro comparativo, presentado en la Tabla 22, de tal manera que facilite el análisis de los resultados.

Al analizar la Tabla 22 se puede destacar que los tres modelos pudieron reproducir los caudales pico con bastante precisión a la hora de la calibración, pero tuvieron muchos problemas a la hora de ajustar la forma del hidrograma; por lo que los volúmenes generados resultaron muy por debajo de los observados, con diferencias en porcentaje que van desde 4% hasta 59%.

Tabla 22. Comparación de resultados obtenidos en la simulación de las cuencas seleccionadas

		WinHSPF	HEC-HMS	EVENTO	
<b>DIFERENCIA</b>	<b>Boconó Calibración</b>	<b>Pico</b> [m <sup>3</sup> /s]	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	-0.28 (-0.2%)
		<b>Tiempo al pico</b> min	-240	-120	0
		<b>Volumen</b> [Hm <sup>3</sup> ]	-7.99 (-58.5%)	-1.39 (-10.0%)	-0.55 (-4.0%)
	<b>Boconó Validación</b>	<b>Pico</b> [m <sup>3</sup> /s]	-4.60 (-3.2%)	+0.86 (+0.6%)	+138.51 (+49.1%)
		<b>Tiempo al pico</b> min	-240	0	60
		<b>Volumen</b> [Hm <sup>3</sup> ]	-10.90 (-56.7%)	-1.97 (-10.2%)	+15.20 (+45.14%)
	<b>La Valencia Calibración</b>	<b>Pico</b> [m <sup>3</sup> /s]	-	0.001 (2.7%)	0.0 (0.0%)
		<b>Tiempo al pico</b> min	-	6	3
		<b>Volumen</b> [Hm <sup>3</sup> ]	-	-1.7E-4 (-42.7%)	-2.3E-4 (-55.1%)
	<b>La Valencia Validación</b>	<b>Pico</b> [m <sup>3</sup> /s]	-	-0.0097 (-6%)	0.046 (28.4%)
		<b>Tiempo al pico</b> min	-	5	12
		<b>Volumen</b> [Hm <sup>3</sup> ]	-	-0.9E-4 (-37.6%)	-0.6E-4 (-28.0%)

Las grandes diferencias en el volumen total podría deberse a que los modelos suponen agua pura, sin tomar en cuenta el volumen sólido. El volumen sólido, dependiendo de las características de la cuenca, puede significar un porcentaje significativo del volumen total escurrido, especialmente cuando se trata de eventos extremos que se caracterizan, por lo general, por arrastrar grandes masas de sedimentos.

A continuación se presenta un análisis independiente para cada uno de los modelos:

- **HEC-HMS**

En el caso de la cuenca del Río Boconó se tuvo una muy buena calibración del pico máximo (0%) y la verificación arrojó valores que se pueden considerar igual de buenos, quedando validada la calibración. En consecuencia, en el caso de utilizar este modelo para simular un evento pronosticado por medio de métodos meteorológicos, se puede esperar obtener una muy buena aproximación de la mancha de inundación que generará dicho evento.

En cuanto al volumen total, tanto en la calibración como en la validación, se obtuvieron valores consistentes entre sí, pero, aproximadamente un 10% más pequeños que los observados. De tratarse de una cuenca de baja pendiente, esta diferencia nos indicaría que el grado de incertidumbre, sobre cuánto tiempo quedara la zona inundada bajo el agua, sería razonable.

El tiempo al pico fue el menos consistente, ya que se obtuvo una diferencia de 2 horas entre el observado y el simulado en el evento de calibración, y en el evento de validación se obtuvo el tiempo al pico exacto. Por lo tanto este es un dato que se puede usar de referencia, pero tomando en cuenta que este tiempo tiene una precisión aproximada de +/- 2% de la duración del evento.

Para el caso de la microcuenca La Valencia los resultados obtenidos presentan un comportamiento similar en cuanto a la exactitud del pico máximo simulado; pero subestimando el valor del volumen total, llegando a una diferencia de hasta un 43%. Por esta razón al utilizar el HEC-HMS en esta cuenca se puede esperar reproducir la mancha máxima de inundación de manera confiable, mas no así el tiempo que el agua permanecerá en la zona.

En este caso el tiempo al pico, al igual que el caso anterior, tuvo una precisión en el orden de +/- 2% de la duración del evento.

En resumen, el HEC-HMS obtuvo muy buenos resultados para la modelación de cuencas de alta pendiente. Si se necesita utilizar estos resultados como hidrograma de entrada aguas arriba de un río de baja pendiente, puede llegar a generar un alto grado de incertidumbre en cuanto a tiempos de inundación se refiere.



- **WinHSPF**

El principal problema que se presentó con este modelo fue la incapacidad de simular los eventos disponibles para la microcuenca La Valencia, ya que estos tienen una duración de apenas 7 horas, lo que representa una serie de 7 datos para este modelo que trabaja a nivel horario. Debido a esto se descarta la posibilidad de realizar la simulación de eventos cortos.

En cuanto a la cuenca del Río Boconó se obtuvo una muy buena calibración del pico máximo, la cual quedó validada al obtener un resultado similar con el evento utilizado con este fin.

El volumen total simulado obtenido tanto en la calibración como en la validación para la cuenca del Río Boconó se encuentra por debajo del observado alrededor de un 60%, lo que genera un grado de incertidumbre muy alto en cuanto a duración de la inundación se refiere. Este modelo permite el análisis de sedimentos, por lo que podría reducirse esta diferencia utilizando esta capacidad para simular el volumen sólido.

El tiempo al pico simulado en el WinHSPF para la cuenca del Río Boconó tuvo una precisión de tan solo 3.5% de la duración del evento.

- **EVENTO**

Observando la Tabla 22 se puede observar claramente que las calibraciones alcanzadas para los picos máximos son muy buenas, con diferencias en porcentaje muy cercanas a 0%, pero en el proceso de validación se obtuvieron diferencias de 93% y 28% para la cuenca del Río Boconó y la microcuenca La Valencia respectivamente, resultado que descarta a este modelo como opción para estas cuencas.

En la Tabla 23 se presenta una comparación de los tres modelos en cuanto a la facilidad de manejo del programa, otorgándole una puntuación a cada uno según la siguiente escala comparativa:

- 1: Dificil
- 2: Intermedio
- 3: Sencillo

En el primer aspecto los modelos WinHSPF y HEC-HMS ofrecen la facilidad de introducir datos utilizando las herramientas de *Copiar y Pegar* de Windows, adicionalmente el HEC-HMS permite rellenar datos faltantes por varios métodos. Por otro lado en el modelo EVENTO solo se pueden introducir los datos uno a uno, y si se comete algún error se deben introducir todos nuevamente.

Tabla 23. Comparación de facilidad de uso los modelos seleccionados

Facilidad en...	Puntuación		
	WinHSPF	HEC-HMS	EVENTO
<b>Calibración</b>	1	3	2
<b>Introducción de datos</b>	2	3	1
<b>Manejo y visualización de resultados</b>	3	2	1
<b>Manejo general</b>	1	3	2

En manejo y visualización de resultados, el modelo EVENTO es muy limitado; ya que estos son presentados en un archivo de texto sin formato, donde grafica únicamente el hidrograma simulado utilizando caracteres de texto. El HEC-HMS permite ver los resultados en forma tabulada y gráfica, pudiendo combinar libremente los diferentes componentes como precipitación, hidrogramas de diferentes subcuencas y otros. El WinHSPF utiliza el programa GenSCn para presentar los resultados, el cual ofrece bastante flexibilidad, pudiendo presentar en forma tabulada o gráfica los datos y resultados, permitiendo combinar libremente las diferentes series de tiempo, tanto de forma tabulada como gráfica.

En cuanto al manejo, el programa HEC-HMS es el más intuitivo de los tres, ya que sus menús están muy bien ordenados, permitiendo visualizar claramente los pasos necesarios para realizar la modelación y encontrar las herramientas requeridas muy fácilmente. Ofrece también mayor facilidad a la hora de cambiar parámetros, datos o la esquematización de la cuenca. En el otro extremo está el modelo EVENTO, en el cual se tiene que editar el archivo de datos en un procesador de textos, para lo cual se requiere estudiar la estructura del archivo.

Para la calibración el que ofrece más ventajas es el HEC-HMS que incluye la función de autocalibración, en el cual se pueden escoger los parámetros que se desean ajustar y el método a utilizar. El WinHSPF y el EVENTO no cuentan con un algoritmo de autocalibración, lo que resulta especialmente problemático en el caso del WinHSPF por el número de parámetros que se requiere ajustar.

Basándose en la asignación de puntajes descrita en la Tabla 23, se pueden ordenar los tres modelos según su facilidad como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Modelos ordenados según la facilidad de uso

Modelo	Puntaje
HEC-HMS	11
WinHSPF	7
EVENTO	6

## **Capítulo 9**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **9.1 CONCLUSIONES**

Debido a que en Venezuela no se cuenta con herramientas de pronóstico de inundaciones que alimenten un sistema de alarma temprana, que permita a las autoridades actuar a tiempo minimizando las pérdidas humanas y económicas; surge la necesidad de crear un programa de prevención de desastres. Una parte importante de dicho programa, es la referida a la modelación hidrológica, la cual permite transformar la precipitación, obtenida por medio de algún método de pronóstico meteorológico, en escurrimiento; información primordial para determinar los posibles efectos de dicha precipitación, permitiendo a los organismos de protección civil tomar decisiones oportunamente.

Actualmente existe una gran cantidad de modelos hidrológicos disponibles, cada uno con características propias que lo hacen más adecuado que otros para ciertas condiciones en particular. En el presente trabajo se realizó una revisión de los principales modelos hidrológicos existentes, para seleccionar el que mejor se adapte a las condiciones físicas y a la disponibilidad de datos de las cuencas de Venezuela.

Al estar este trabajo enfocado en proporcionar información a organizaciones de protección civil para el sistema de alarma temprana y la toma de decisiones en cuanto a prevención de desastres, se tomó la decisión de centrar la búsqueda en la modelación de eventos extremos.

La recopilación de datos hidrometeorológicos en Venezuela para la modelación de eventos es una tarea difícil, larga y frustrante; ya que son muy pocas las cuencas debidamente instrumentadas y en estas es difícil obtener la información, ya sea porque la serie es muy corta, porque los registros se perdieron o porque el intervalo de tiempo de la información disponible es muy grande. Es por esta razón que es muy importante que el modelo seleccionado no requiera una gran cantidad de tipos distintos de datos.

Inicialmente se consideraron seis modelos: WinHSPF, HEC-HMS, EVENTO, TETIS, HBV y SUSHI; de los cuales, luego de comparar sus capacidades, por distintas razones se eliminaron tres, quedando para ser aplicados a las cuencas utilizadas el WinHSPF, el HEC-HMS y el EVENTO.

Por razones de disponibilidad de información, las dos cuencas consideradas en este trabajo, son pequeñas y de alta pendiente, debido a las velocidades de flujo que se presentan y a la pendiente del terreno, el volumen total simulado no es relevante, ya que el agua tenderá siempre a escurrir sin dejar áreas inundadas. Pero, si se considera que, en su gran mayoría, las cuencas de alta pendiente pasan a ser o desembocan a un río de baja pendiente, el volumen total, en caso de requerir la información en estas zonas bajas, toma relevancia nuevamente.

Como se tiene pensado implementar el modelo seleccionado en la mayor cantidad posible de cuencas del país, una gran cantidad de personas estarán involucradas en su manejo, por lo que la facilidad de uso del modelo seleccionado es importante, permitiendo reducir el tiempo necesario para enseñar a las personas responsables de las distintas cuencas a utilizar el modelo correctamente, a la vez que reduce las probabilidades de cometer errores durante su utilización.

Luego de realizado el análisis de resultados se puede concluir que la mejor opción entre los tres modelos seleccionados es el HEC-HMS. Se llegó a esta afirmación basándose en las siguientes consideraciones:

- El modelo HEC-HMS, dio buenos resultados tanto en el proceso de calibración como en el de validación para ambas cuencas, especialmente en cuanto al caudal pico máximo se refiere.
- A su vez cumple con la restricción de información requerida, ya que puede trabajar con tan solo la información básica para la modelación hidrológica, es decir precipitación, escorrentía y datos muy generales acerca de la morfología de la cuenca.
- En cuanto a la facilidad de uso resulto ser el mejor de los tres, quedando mejor situado en 3 de las 4 categorías consideradas, acumulando un puntaje total de 12, 5 por encima del WinHSPF; destacándose su interfaz gráfica de usuario muy agradable y sencilla para su manejo y aprendizaje.
- El modelo EVENTO fue descartado por obtener resultados no satisfactorios en el proceso de validación, habiendo obtenido un desempeño muy distinto al registrado en la calibración.
- El modelo WinHSPF fue descartado, debido a su incapacidad de modelar eventos de corta duración con intervalos de tiempo menores a una hora, capacidad importante para simular eventos cortos de alta intensidad, potenciales generadores de grandes desastres. Este problema podría ser superado utilizando la versión para MS-DOS de este modelo, la cual si permite trabajar con intervalos menores a una hora, pero sin las ventajas que ofrece la versión bajo Windows en cuanto a facilidad de manejo se refiere.

EN CONCLUSIÓN, EL MODELO HEC-HMS ES EL MÁS APROPIADO DE LOS MODELOS PRE-SELECCIONADOS PARA SER UTILIZADO COMO PARTE DE UN PROGRAMA DE PREVENCIÓN DE DESASTRES EN CUENCAS DE ALTA PENDIENTE VENEZOLANAS.

Al momento de utilizar el modelo HEC-HMS se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El modelo HEC-HMS logró simular con muy buena aproximación el pico máximo de los eventos considerados en este estudio, por lo que se puede esperar tener una muy buena aproximación de la mancha de inundación generada por un evento estudiado con este modelo.
- Este modelo subestimó el volumen total escurrido al simular los eventos utilizados, debido a esto se puede decir que se tendrá una gran incertidumbre sobre el tiempo que permanecerá inundada la zona correspondiente a la mancha de inundación. Este problema puede estar relacionado con el hecho de que este modelo considera agua pura, sin tomar en cuenta el caudal sólido debido al arrastre de sedimentos.
- Según los resultados obtenidos el tiempo al pico presenta una incertidumbre de hasta un 2% de la duración del evento, que equivale a unas 2 horas en un evento de unos 4 días de duración, por lo que se puede tomar simplemente como una referencia.
- Está claro que es muy difícil que un solo modelo sea la mejor opción en todo el país, ya que según las características de cada cuenca puede existir otro modelo que se adapte mejor. Al haberse trabajado solo con cuencas pequeñas de alta pendiente, los resultados aquí alcanzados, solo son aplicables a estas condiciones particulares.

En cuencas muy pequeñas el tiempo de respuesta lluvia-escorrentía es muy corto, por lo que, implementar un sistema de alarma temprana en este tipo de cuencas, no sería lo más adecuado; o en todo caso no daría los resultados esperados, si no se acompaña con un programa de gestión de cuenca que mejore las condiciones de éstas frente a una crecida extrema.

## 9.2 RECOMENDACIONES

Para el cálculo de la mancha de inundación se recomienda usar el modelo HEC-RAS, ya que al pertenecer a la familia del HEC-HMS el traspaso de la información necesaria de un paquete al otro es muy sencillo y automatizado, minimizando los posibles errores humanos.

Para complementar este trabajo, puede realizarse un análisis para determinar si utilizando otro método de cálculo de pérdida y/o de tránsito en el modelo escogido (HEC-HMS) se puede mejorar los resultados obtenidos con los métodos empleados (onda cinemática y número de curva del SCS), especialmente en la calibración del volumen total escurrido.

Para mejorar la simulación del tiempo al pico, se puede discretizar la cuenca en estudio en un mayor número de subcuencas y/o reducir el intervalo de tiempo utilizado en la modelación. Cualquiera de estas opciones supone el requerimiento de un mayor volumen de información para poder llevar a cabo la simulación.

También puede considerarse el uso del modelo HSPF en su versión bajo MS-DOS, el cual trabaja con intervalos de tiempo menores a una hora, lo que le permite trabajar con cuencas pequeñas y/o eventos cortos.

El modelo HSPF, en sus versiones bajo MS-DOS y bajo Windows, tiene la capacidad de modelar el volumen sólido debido al arrastre de sedimentos. Puede realizarse pruebas para determinar si al utilizar este componente del modelo mejora el ajuste del volumen total generado con el observado. Se debe tener en cuenta que, tanto el modelado de sedimentos como el uso de intervalos de tiempo menores, suponen la necesidad de un volumen de información mucho mayor al requerido durante el uso de este modelo en el presente trabajo.

Dado que en este trabajo se utilizaron cuencas pequeñas de alta pendiente y que, cada modelo se adapta mejor a ciertas circunstancias y características físicas de la cuenca, sería deseable realizar el mismo trabajo utilizando datos de cuencas de baja pendiente y/o mayor tamaño a las aquí consideradas; para de este modo, seleccionar el modelo que mejor se adapte a las condiciones de este tipo de cuencas.

Como es sabido, los datos hidrometeorológicos son la base imprescindible de la modelación hidrológica; sin los cuales todo este trabajo se perdería. Es por esto que es importante extender y mejorar tanto la red de estaciones hidrometeorológicas del país, como el sistema de recopilación, procesamiento, almacenamiento y distribución de la información generada por dicha red; con el fin de generar la mayor cantidad de información posible de este tipo de datos y ponerla a disposición de quien la requiera. Esta mejora representa un gran salto hacia adelante para el país, ya que en la actualidad se pierde mucho dinero y tiempo en búsqueda y procesamiento de datos.

## BIBLIOGRAFIA

- Singh Vijay P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications.
- Wurbs Ralph A., 1995. Water Management Models – A guide to software, Prentice Hall PTR.
- Ponce Victor M., 1989. Engineering Hydrology – Principles and Practices, Prentice Hall.
- Oberto Livia R., 2006. Evaluación de la aplicación del modelo Lluvia-Escorrentía TopModel a la Cuenca del Embalse Yacambú, CIDIAT.
- Hydrocomp, 1979. WinHSPF Workshop – Training Materials.
- Singh Jaswinder, 2004. Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed using WinHSPF and SWAT, Illinois State Water Survey.
- Neitsch S.L., 2005. Soil and water assessment tool - Theoretical documentation Version 2005, Grassland, soil and water research laboratory - Agricultural Research Service.
- Torres-Benites Elibeth, 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México, Hidrociencias- Campus Montecillo - Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- HEC-HMS, 2005. Hidrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual Version 3.0, US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.
- HEC-HMS, 2000. Hidrologic Modeling System (HEC-HMS) Technical Reference Manua, US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.
- HEC-HMS, 2005. Hidrologic Modeling System (HEC-HMS) Quick Start Guide Version 3.0, US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.
- Azagra Esteban, 1999. Regional Hydraulic Model for the City of Austin.
- EPA, 2001. Better Assessment Science Integrating point and Nonpoin Sources – BASINS version 3.0, EPA.
- Beven Keith, 1998. TOPMODEL User Notes - Windows Version 97.01, Centre for Research on Environmental Systems and Statistics, Institute of Environmental and Biological Sciences, Lancaster University, Lancaster.

Canalejo Ana Castiella, 2000. Estudio de aplicabilidad del modelo hidrológico Topmodel para la prevision de avenidas en tiempo real en las cuencas de la comunidad autónoma vasca, Departamento de Geodinámica, Universidad del País Vasco, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Universidad Pública de Navarra.

Schaake John C., 1970. Deterministic urban runoff model, Urban Water Systems Institute, 1970

Velez J, 2004. Manual del usuario-programa TETIS v. 6, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia

Velez J. , 2004. Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v. 6, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia

Velez J., 2005. TETIS: A Catchment Hydrological Distributed Conceptual Model, European Geosciences Union, Vol.7

Velez J., 2006. Recursos hídricos en la comunidad autónoma del país vasco usando modelación distribuida y calibración automática, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Ciudad Guayana, Venezuela.

Liu Z., 2005. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment, European Geosciences Union, Vol.4, pag. 347-364

Todini E., 2002. Application of the rainfall-runoff model TOPKAPI for the entire basin of the Po river as part of the European project EFFS, European Geophysical Society

Melone F., 2005. Review and selection of hydrological models – Integration of hydrological models and meteorological inputs, RISK AWARE, INTEREG IIIB CADSES, Europe Union.

US-ACE, 1994. Engineering and Design, Flood-Runoff Análisis, U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-1417

Chow Ven Te, 1994. Hidrología aplicada, McGrawe-Hill Interamericana.

Duque Roberto, 1981. Modelo de drenaje urbano y su aplicación, CIDIAT, Serie Hidrología H-10



## WEBGRAFIA

Página Hydrocomp dedicada al WinHSPF, <http://www.hydrocomp.com/HSPFinfo.htm>

Página USDA dedicada al SWAT, <http://ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=9793>

Página principal de la HEC, <http://www.hec.usace.army.mil/software/>

Página de la EPA dedicada a BASINS, <http://www.epa.gov/waterscience/basins/basinsv3.htm>

Página del modelo HBV [http://www.smhi.se/foretag/m/hbv\\_demo/html/welcome.html](http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html)

Página de la USGS dedicada la topmodel, [http://smig.usgs.gov/cgi-bin/SMIC/model\\_home\\_pages/model\\_home?selection=topmodel](http://smig.usgs.gov/cgi-bin/SMIC/model_home_pages/model_home?selection=topmodel)

Página de la UPV dedicada al TETIS, <http://lluvia.dihma.upv.es/miembrosd.php?language=&id=1>

Página de la UNIBO dedicada al TOPKAPI, <http://www.geomin.unibo.it/Strutture/Hydro/topkapi/default.htm>

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

# ANEXO A



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

## Tablas de Cálculo de Precipitación Efectiva

## A1. Método del número de curva (CN) del SCS

Tabla A1.a) Valores del número de curva (CN) para los complejos suelo-cobertura  
Condición de humedad antecedente II (CHA = II).

Uso de la tierra	Cobertura		Grupo de Suelo			
	Práctica cultural	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Rastrojo o barbecho	-----	-----	77	86	91	94
Cultivos alineados o en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras rectas	Buena	67	78	85	89
	En curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
	En curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	En curvas de nivel y Terrazas	Mala	66	74	80	82
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	En curvas de nivel y Terrazas	Buena	62	71	78	81
	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
	Hileras rectas	Buena	63	75	83	87
	En curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
	En curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
Cultivos densos de Leguminosas o forraje en rotación.	En curvas de nivel y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	En curvas de nivel y Terrazas	Buena	59	70	78	81
	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
	Hileras rectas	Buena	58	72	81	85
	En curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
Pastizales Naturales o Pastos de pastoreo	En curvas de nivel	Buena	55	69	78	83
	En curvas de nivel y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	En curvas de nivel y Terrazas	Buena	51	67	76	80
	-----	Mala	68	79	86	89
	-----	Regular	49	69	79	84
Pasto de corte	-----	Buena	39	61	74	80
	En curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
	En curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	En curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
Bosques	-----	Buena	30	58	71	78
	-----	Mala	45	66	77	83
	-----	Regular	36	60	73	79
Caseríos o Patios	-----	Buena	25	55	70	77
	-----	-----	59	74	82	86
Caminos de tierra	-----	-----	72	82	87	89
Caminos asfaltados	-----	-----	74	84	90	92

Tabla A2.b) Número de curva para la condición de humedad  
antecedente I y III (CHA=I y CHA=III)

CN para CHA= II	CN para las condiciones		CN para CHA= II	CN para las condiciones	
	CHA = I	CHA = III		CHA = I	CHA = III
100	100	100	62	42	79
99	97	100	61	41	78
98	94	99	60	40	78
97	91	99	59	39	77
96	89	99	58	38	76
95	87	98	57	37	75
94	85	98	56	36	75
93	83	98	55	35	74
92	81	97	54	34	73
91	80	97	53	33	72
90	78	96	52	32	71
89	76	96	51	31	70
88	75	95	50	31	70
87	73	95	49	30	69
86	72	94	48	29	68
85	70	94	47	28	67
84	68	93	46	27	66
83	67	93	45	26	65
82	66	92	44	25	64
81	64	92	43	25	63
80	63	91	42	24	62
79	62	91	41	23	61
78	60	90	40	22	60
77	59	89	39	21	59
76	58	89	38	21	58
75	57	88	37	20	57
74	55	88	36	19	56
73	54	87	35	18	55
72	53	86	34	18	54
71	52	86	33	17	53
70	51	85	32	16	52
69	50	84	31	16	51
68	48	84	30	15	50
67	47	83			
66	46	82	25	12	30
65	45	82	20	9	22
64	44	81	15	7	13
63	43	80	5	2	0

## A2. Método del índice constante e inicial de pérdida

Tabla A2.a) Pérdidas de precipitación por intercepción y depresiones del terreno

<b>Áreas dedicadas a la Agricultura (Linsley, Kohler, and Paulhus 1975)</b>		
<b>Cultivo</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Intercepción (mm)</b>
Maíz	1.8	0.762
Algodón	1.2	8.380
Tabaco	1.2	1.780
Granos pequeños	0.9	4.064
Pradera	0.3	2.032
Alfalfa	0.3	2.794
<b>Áreas Forestales (Viessman et al. 1977)</b>		
10-20% precipitación total, máximo 0.5 in.		
<b>Almacenamiento en depresiones (Horton 1935)</b>		
Áreas dedicadas a la Agricultura	12.7 - 38.1 mm.	
Bosques/pastizal	12.7 - 38.1 mm.	
<b>Pérdidas superficiales totales</b>		
Áreas urbanas		
Áreas abiertas	2.54 - 12.7 mm.	
Áreas impermeables	2.54 - 5.08 mm.	

Tomado de US-ACE, 1994

Tabla A2.b) Grupos de suelos y valores del índice de infiltración potencial

<b>Grupo de Suelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rango <math>f_c</math> (mm/hr)</b>
A	Arena profunda, arena gruesa no compactada profunda, limo aglomerado.	7.62 - 11.43
B	Arena gruesa no compactada poco profunda, arena francosa	3.81 - 7.62
C	Arcilla francosa, arena francosa poco profunda, suelos con bajo contenido orgánico y usualmente con alto contenido de arcilla.	1.27 - 3.81
D	Suelos que se hinchan significativamente cuando se humedecen, arcillas muy plásticas y cierto tipo de suelos salinos.	0.00 - 1.27

Tomado de HEC-HMS, 2000

### A3. Modelo de infiltración de Green y Ampt

Tabla A3.a) Estimación de clases de texturas de suelo (Rawls, et al., 1982)

Clase	Porosidad, $f$ (cm <sup>3</sup> /cm)	Conductividad hidráulica, $K$ , saturado (cm/hr)	Succión del frente húmedo (cm)
Arena	0.437	21.00	10.6
Franco-arenoso	0.437	6.11	14.2
Areno-francoso	0.453	2.59	22.2
Franco	0.463	1.32	31.5
Limo-francoso	0.501	0.68	40.4
Areno-arcillo-francoso	0.398	0.43	44.9
Arcillo-francoso	0.464	0.23	44.6
Limo-arcillo-francoso	0.471	0.15	58.1
Areno-arcilloso	0.430	0.12	63.6
Limo-arcilloso	0.479	0.09	64.7
Arcilla	0.475	0.06	71.4

www.bdigital.ula.ve *Tomado de HEC-HMS, 2000*

# **ANEXO B**



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

## B1. Precipitación Cuenca alta del Río Boconó

Tabla B1.a) Evento del 1 al 4 de Junio de 1971

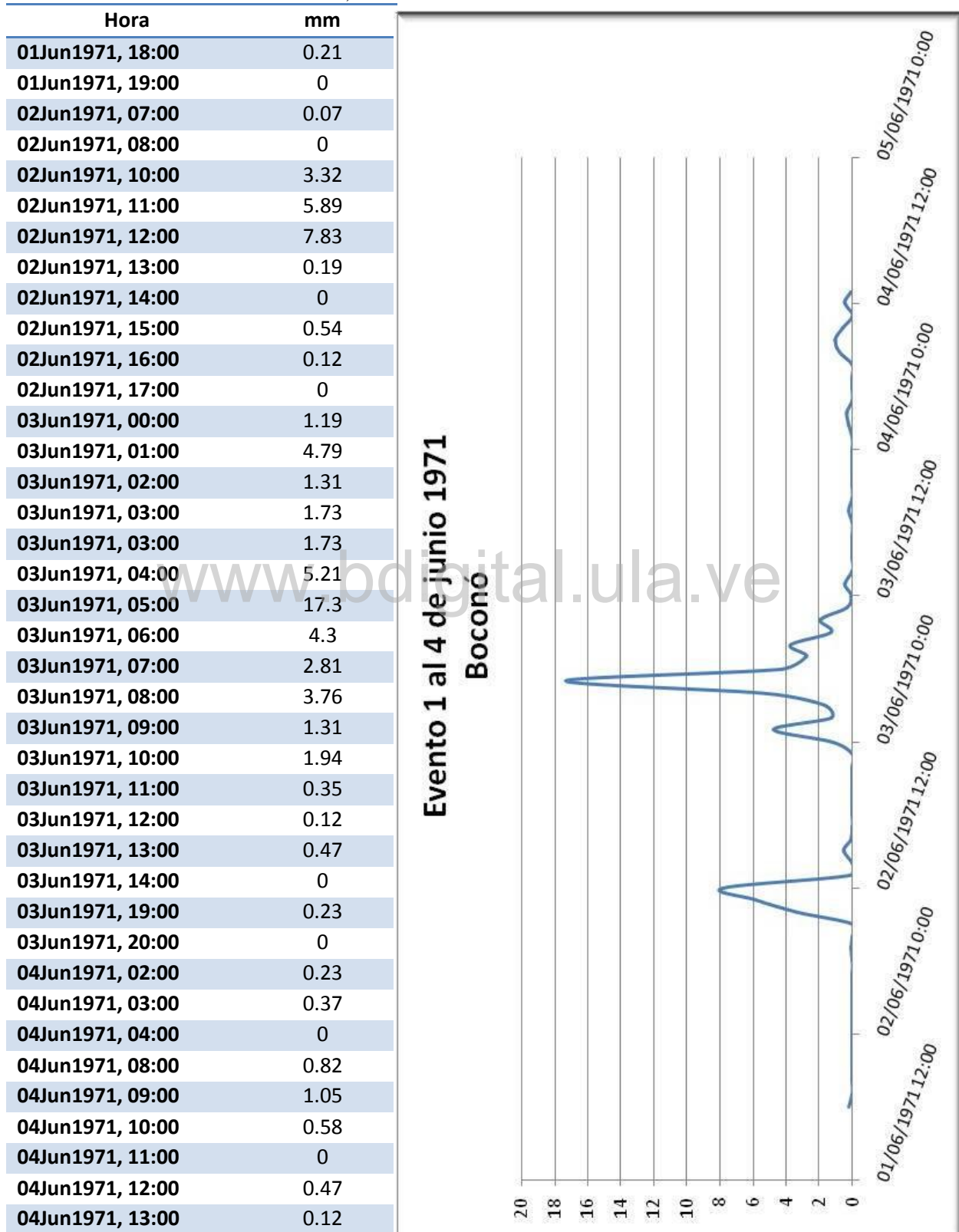
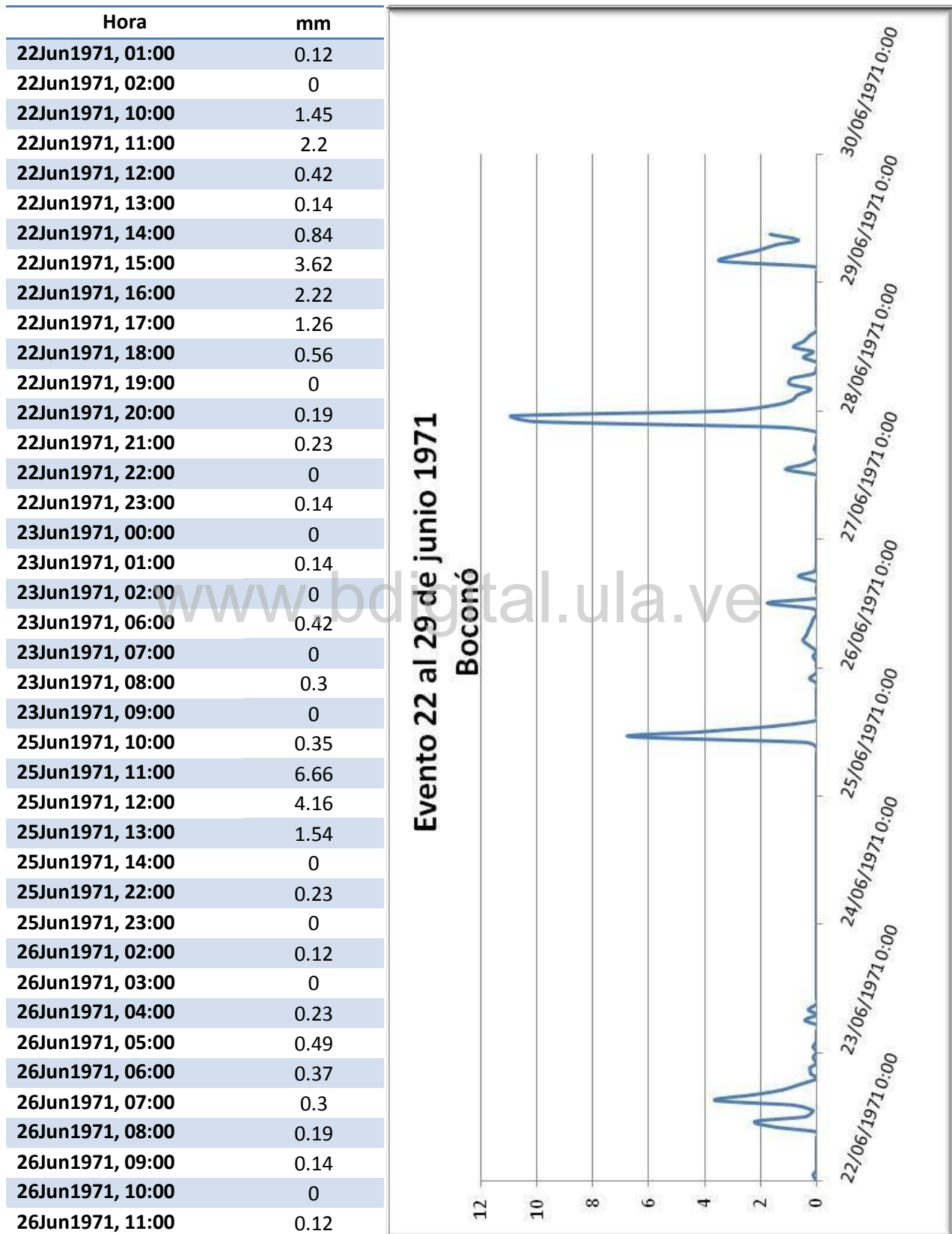




Tabla B1.b) Evento del 22 al 29 de Junio de 1971



*Tabla B1.b) Evento del 22 al 29 de Junio de 1971 (Continuación)*

<b>Hora</b>	<b>mm</b>
26Jun1971, 12:00	1.75
26Jun1971, 13:00	0
26Jun1971, 17:00	0.63
26Jun1971, 18:00	0.07
26Jun1971, 19:00	0
27Jun1971, 13:00	1.1
27Jun1971, 14:00	0.47
27Jun1971, 15:00	0
27Jun1971, 17:00	0.07
27Jun1971, 18:00	0
27Jun1971, 21:00	1.26
27Jun1971, 22:00	10.1
27Jun1971, 23:00	10.89
28Jun1971, 00:00	3.34
28Jun1971, 01:00	1.54
28Jun1971, 02:00	0.91
28Jun1971, 03:00	0.68
28Jun1971, 04:00	0.19
28Jun1971, 05:00	0.94
28Jun1971, 06:00	0.89
28Jun1971, 07:00	0.12
28Jun1971, 08:00	0
28Jun1971, 10:00	0.47
28Jun1971, 11:00	0.12
28Jun1971, 12:00	0.82
28Jun1971, 13:00	0.47
28Jun1971, 14:00	0.23
28Jun1971, 15:00	0
29Jun1971, 04:00	3.44
29Jun1971, 05:00	2.85
29Jun1971, 06:00	2.1
29Jun1971, 07:00	1.45
29Jun1971, 08:00	0.65
29Jun1971, 09:00	1.66

## B2. Precipitación Microcuenca La Valencia

Tabla B2.a) Evento del 22 de Noviembre 1981

Hora	mm
22Nov1981, 12:15	0.1
22Nov1981, 12:20	0.1
22Nov1981, 12:25	0.3
22Nov1981, 12:30	0.4
22Nov1981, 12:35	0.4
22Nov1981, 12:40	1
22Nov1981, 12:45	2.7
22Nov1981, 12:50	1.7
22Nov1981, 12:55	0.8
22Nov1981, 13:00	0.7
22Nov1981, 13:05	0.7
22Nov1981, 13:10	0.9
22Nov1981, 13:15	0.8
22Nov1981, 13:20	0.7
22Nov1981, 13:25	0.7
22Nov1981, 13:30	0.8
22Nov1981, 13:35	0.8
22Nov1981, 13:40	1.1
22Nov1981, 13:45	0.7
22Nov1981, 13:50	0.7
22Nov1981, 13:55	0.5
22Nov1981, 14:00	0.5
22Nov1981, 14:05	0.4
22Nov1981, 14:10	0.3
22Nov1981, 14:15	0.2
22Nov1981, 14:20	0.1
22Nov1981, 14:25	0.1
22Nov1981, 14:30	0.1

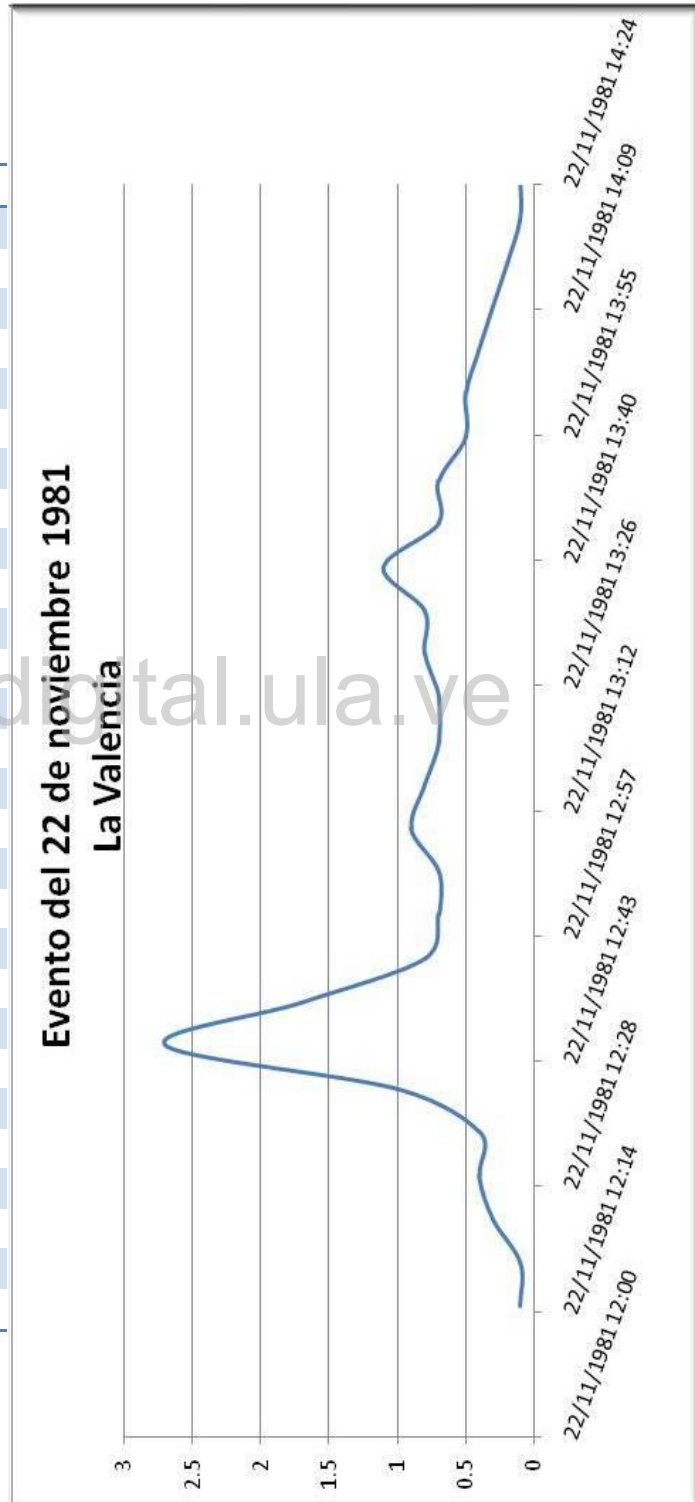
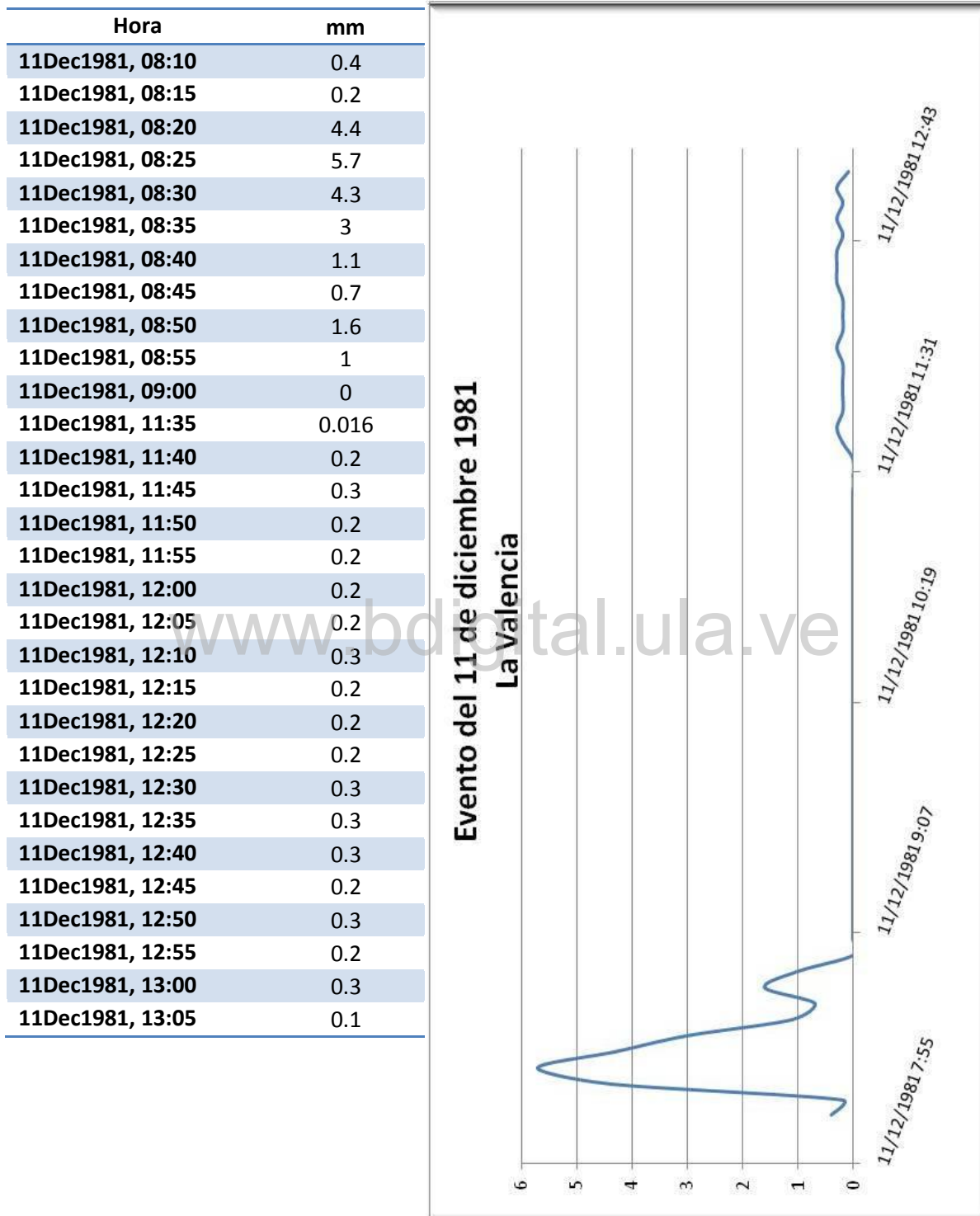


Tabla B2.b) Evento del 11 de Diciembre 1981



### B3. Caudales Cuenca del Río Boconó

Tabla B3.a) Caudales del 1 al 5 de Junio 1971

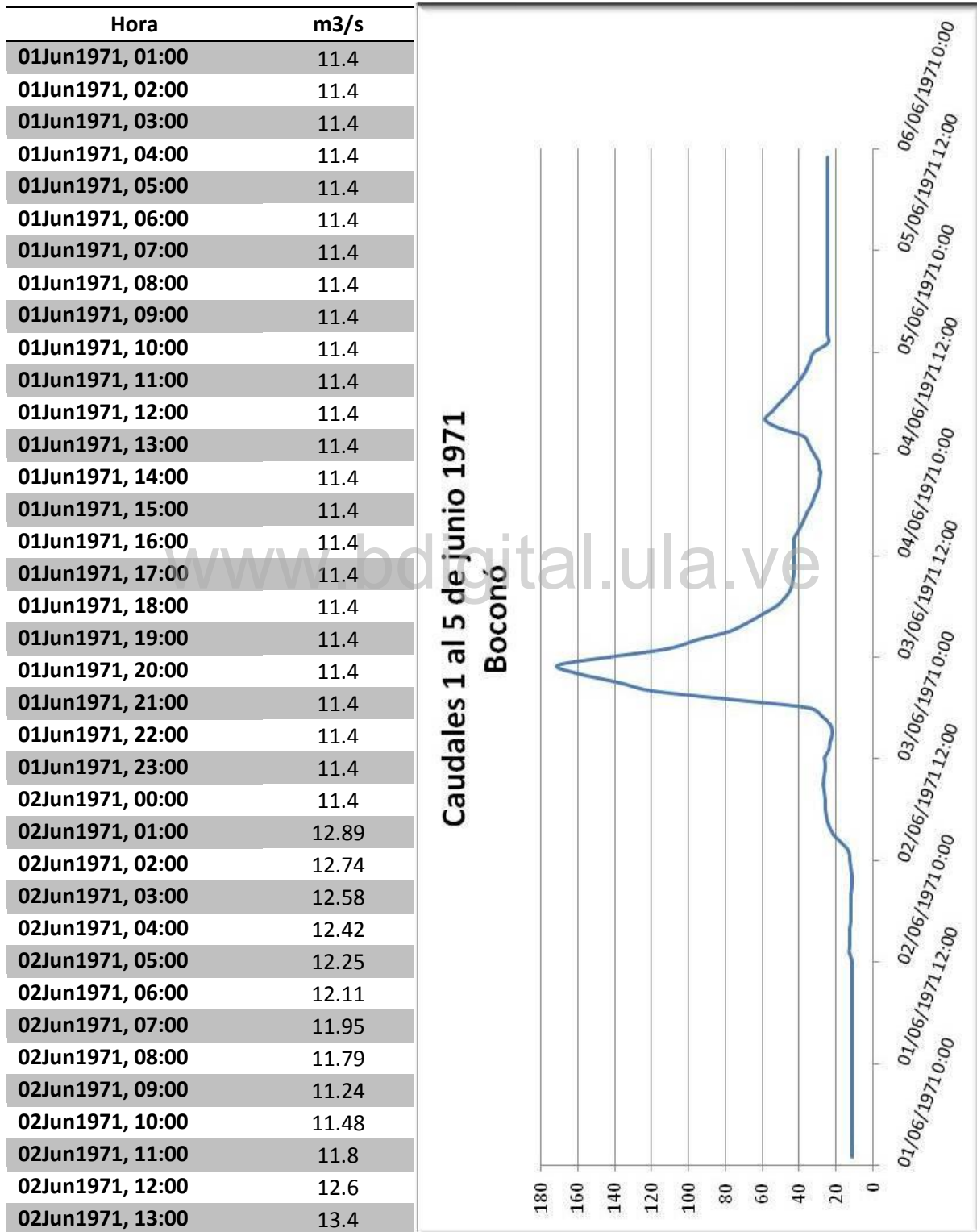


Tabla B3.a) Caudales del 1 al 5 de Junio 1971 (continuación)

Hora	m3/s	Hora	m3/s
02Jun1971, 14:00	16.84	04Jun1971, 07:00	31.71
02Jun1971, 15:00	21.51	04Jun1971, 08:00	29.93
02Jun1971, 16:00	24.26	04Jun1971, 09:00	29.36
02Jun1971, 17:00	25.46	04Jun1971, 10:00	28.79
02Jun1971, 18:00	25.8	04Jun1971, 11:00	29.72
02Jun1971, 19:00	26.14	04Jun1971, 12:00	32.17
02Jun1971, 20:00	26.49	04Jun1971, 13:00	34.89
02Jun1971, 21:00	26.96	04Jun1971, 14:00	37.93
02Jun1971, 22:00	26.83	04Jun1971, 15:00	51.02
02Jun1971, 23:00	26.05	04Jun1971, 16:00	58.42
03Jun1971, 00:00	26.29	04Jun1971, 17:00	55.01
03Jun1971, 01:00	24.3	04Jun1971, 18:00	50.63
03Jun1971, 02:00	23.31	04Jun1971, 19:00	46.32
03Jun1971, 03:00	22.32	04Jun1971, 20:00	42.45
03Jun1971, 04:00	23.61	04Jun1971, 21:00	38.73
03Jun1971, 05:00	27.58	04Jun1971, 22:00	35.98
03Jun1971, 06:00	34.13	04Jun1971, 23:00	33.85
03Jun1971, 07:00	79.99	05Jun1971, 00:00	32.07
03Jun1971, 08:00	120.25	05Jun1971, 01:00	24.64
03Jun1971, 09:00	137.75	05Jun1971, 02:00	24.64
03Jun1971, 10:00	160.53	05Jun1971, 03:00	24.64
03Jun1971, 11:00	170.91	05Jun1971, 04:00	24.64
03Jun1971, 12:00	143.24	05Jun1971, 05:00	24.64
03Jun1971, 13:00	111.81	05Jun1971, 06:00	24.64
03Jun1971, 14:00	94.95	05Jun1971, 07:00	24.64
03Jun1971, 15:00	78.09	05Jun1971, 08:00	24.64
03Jun1971, 16:00	68.96	05Jun1971, 09:00	24.64
03Jun1971, 17:00	60.17	05Jun1971, 10:00	24.64
03Jun1971, 18:00	52.55	05Jun1971, 11:00	24.64
03Jun1971, 19:00	47.95	05Jun1971, 12:00	24.64
03Jun1971, 20:00	45.02	05Jun1971, 13:00	24.64
03Jun1971, 21:00	43.5	05Jun1971, 14:00	24.64
03Jun1971, 22:00	42.74	05Jun1971, 15:00	24.64
03Jun1971, 23:00	42.84	05Jun1971, 16:00	24.64
04Jun1971, 00:00	42.74	05Jun1971, 17:00	24.64
04Jun1971, 01:00	42.74	05Jun1971, 18:00	24.64
04Jun1971, 02:00	42.74	05Jun1971, 19:00	24.64
04Jun1971, 03:00	40.21	05Jun1971, 20:00	24.64
04Jun1971, 04:00	37.93	05Jun1971, 21:00	24.64
04Jun1971, 05:00	35.71	05Jun1971, 22:00	24.64
04Jun1971, 06:00	33.5	05Jun1971, 23:00	24.64

Tabla B3.b) Caudales del 22 al 29 de Junio 1971

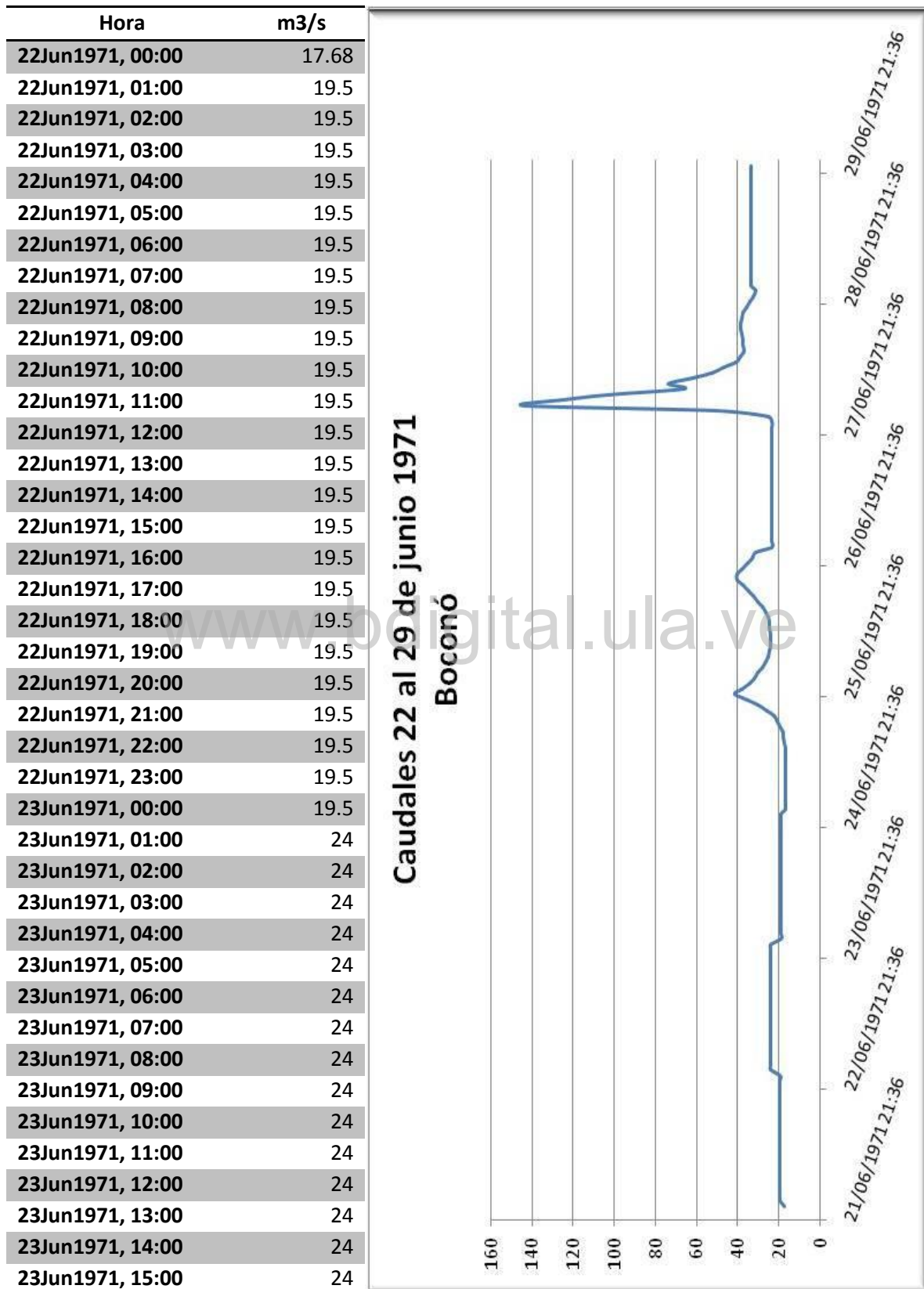


Tabla B3.b) Caudales del 22 al 29 de Junio 1971 (continuación)

Hora	m3/s	Hora	m3/s
23Jun1971, 16:00	24	25Jun1971, 08:00	17.07
23Jun1971, 17:00	24	25Jun1971, 09:00	17.07
23Jun1971, 18:00	24	25Jun1971, 10:00	17.07
23Jun1971, 19:00	24	25Jun1971, 11:00	17.07
23Jun1971, 20:00	24	25Jun1971, 12:00	17.07
23Jun1971, 21:00	24	25Jun1971, 13:00	17.48
23Jun1971, 22:00	24	25Jun1971, 14:00	17.88
23Jun1971, 23:00	24	25Jun1971, 15:00	18.29
24Jun1971, 00:00	24	25Jun1971, 16:00	19.6
24Jun1971, 01:00	18.89	25Jun1971, 17:00	20.98
24Jun1971, 02:00	18.89	25Jun1971, 18:00	22.37
24Jun1971, 03:00	18.89	25Jun1971, 19:00	25.93
24Jun1971, 04:00	18.89	25Jun1971, 20:00	30.4
24Jun1971, 05:00	18.89	25Jun1971, 21:00	35.57
24Jun1971, 06:00	18.89	25Jun1971, 22:00	41.73
24Jun1971, 07:00	18.89	25Jun1971, 23:00	37.93
24Jun1971, 08:00	18.89	26Jun1971, 00:00	34.39
24Jun1971, 09:00	18.89	26Jun1971, 01:00	32.17
24Jun1971, 10:00	18.89	26Jun1971, 02:00	30.13
24Jun1971, 11:00	18.89	26Jun1971, 03:00	28.13
24Jun1971, 12:00	18.89	26Jun1971, 04:00	26.64
24Jun1971, 13:00	18.89	26Jun1971, 05:00	25.5
24Jun1971, 14:00	18.89	26Jun1971, 06:00	24.55
24Jun1971, 15:00	18.89	26Jun1971, 07:00	24.18
24Jun1971, 16:00	18.89	26Jun1971, 08:00	24.13
24Jun1971, 17:00	18.89	26Jun1971, 09:00	24.39
24Jun1971, 18:00	18.89	26Jun1971, 10:00	24.64
24Jun1971, 19:00	18.89	26Jun1971, 11:00	24.9
24Jun1971, 20:00	18.89	26Jun1971, 12:00	25.16
24Jun1971, 21:00	18.89	26Jun1971, 13:00	26.27
24Jun1971, 22:00	18.89	26Jun1971, 14:00	28.22
24Jun1971, 23:00	18.89	26Jun1971, 15:00	30.37
25Jun1971, 00:00	18.89	26Jun1971, 16:00	32.55
25Jun1971, 01:00	17.07	26Jun1971, 17:00	35.02
25Jun1971, 02:00	17.07	26Jun1971, 18:00	37.68
25Jun1971, 03:00	17.07	26Jun1971, 19:00	40.28
25Jun1971, 04:00	17.07	26Jun1971, 20:00	40.38
25Jun1971, 05:00	17.07	26Jun1971, 21:00	37.93
25Jun1971, 06:00	17.07	26Jun1971, 22:00	35.57
25Jun1971, 07:00	17.07	26Jun1971, 23:00	33.26



Tabla B3.b) Caudales del 22 al 29 de Junio 1971 (continuación)

Hora	m3/s	Hora	m3/s
27Jun1971, 00:00	31.36	28Jun1971, 16:00	38.16
27Jun1971, 01:00	23.36	28Jun1971, 17:00	38.53
27Jun1971, 02:00	23.36	28Jun1971, 18:00	38.7
27Jun1971, 03:00	23.36	28Jun1971, 19:00	38.26
27Jun1971, 04:00	23.36	28Jun1971, 20:00	37.51
27Jun1971, 05:00	23.36	28Jun1971, 21:00	35.84
27Jun1971, 06:00	23.36	28Jun1971, 22:00	34.18
27Jun1971, 07:00	23.36	28Jun1971, 23:00	32.7
27Jun1971, 08:00	23.36	29Jun1971, 00:00	31.36
27Jun1971, 09:00	23.36	29Jun1971, 01:00	33.5
27Jun1971, 10:00	23.36	29Jun1971, 02:00	33.5
27Jun1971, 11:00	23.36	29Jun1971, 03:00	33.5
27Jun1971, 12:00	23.36	29Jun1971, 04:00	33.5
27Jun1971, 13:00	23.36	29Jun1971, 05:00	33.5
27Jun1971, 14:00	23.36	29Jun1971, 06:00	33.5
27Jun1971, 15:00	23.36	29Jun1971, 07:00	33.5
27Jun1971, 16:00	23.36	29Jun1971, 08:00	33.5
27Jun1971, 17:00	23.36	29Jun1971, 09:00	33.5
27Jun1971, 18:00	23.36	29Jun1971, 10:00	33.5
27Jun1971, 19:00	23.36	29Jun1971, 11:00	33.5
27Jun1971, 20:00	23.36	29Jun1971, 12:00	33.5
27Jun1971, 21:00	23.36	29Jun1971, 13:00	33.5
27Jun1971, 22:00	23.36	29Jun1971, 14:00	33.5
27Jun1971, 23:00	23.36	29Jun1971, 15:00	33.5
28Jun1971, 00:00	23.36	29Jun1971, 16:00	33.5
28Jun1971, 01:00	25.41	29Jun1971, 17:00	33.5
28Jun1971, 02:00	51.4	29Jun1971, 18:00	33.5
28Jun1971, 03:00	143.65	29Jun1971, 19:00	33.5
28Jun1971, 04:00	124.57	29Jun1971, 20:00	33.5
28Jun1971, 05:00	102.75	29Jun1971, 21:00	33.5
28Jun1971, 06:00	66.37	29Jun1971, 22:00	33.5
28Jun1971, 07:00	73.95	29Jun1971, 23:00	33.5
28Jun1971, 08:00	61.93		
28Jun1971, 09:00	52.78		
28Jun1971, 10:00	46.39		
28Jun1971, 11:00	40.71		
28Jun1971, 12:00	38.81		
28Jun1971, 13:00	37.04		
28Jun1971, 14:00	37.42		
28Jun1971, 15:00	37.79		

#### B4. Caudales Microcuenca La Valencia

Tabla B4.a) Caudales del 22 de Noviembre 1981

Hora	m3/s
22Nov1981, 12:00	0.00264
22Nov1981, 12:05	0.00264
22Nov1981, 12:10	0.00264
22Nov1981, 12:15	0.00264
22Nov1981, 12:20	0.0026767
22Nov1981, 12:25	0.0027133
22Nov1981, 12:30	0.00275
22Nov1981, 12:35	0.0031833
22Nov1981, 12:40	0.0036167
22Nov1981, 12:45	0.00405
22Nov1981, 12:50	0.0049933
22Nov1981, 12:55	0.0059367
22Nov1981, 13:00	0.00688
22Nov1981, 13:05	0.0100067
22Nov1981, 13:10	0.0131333
22Nov1981, 13:15	0.01626
22Nov1981, 13:20	0.01738
22Nov1981, 13:25	0.0185
22Nov1981, 13:30	0.01962
22Nov1981, 13:35	0.0226267
22Nov1981, 13:40	0.0256333
22Nov1981, 13:45	0.02864
22Nov1981, 13:50	0.0312533
22Nov1981, 13:55	0.0338667
22Nov1981, 14:00	0.03648
22Nov1981, 14:05	0.039
22Nov1981, 14:10	0.039
22Nov1981, 14:15	0.03713
22Nov1981, 14:20	0.03611
22Nov1981, 14:25	0.03509
22Nov1981, 14:30	0.03407
22Nov1981, 14:35	0.0327433
22Nov1981, 14:40	0.0314167
22Nov1981, 14:45	0.03009
22Nov1981, 14:50	0.0287
22Nov1981, 14:55	0.02731
22Nov1981, 15:00	0.02592
22Nov1981, 15:05	0.0245867

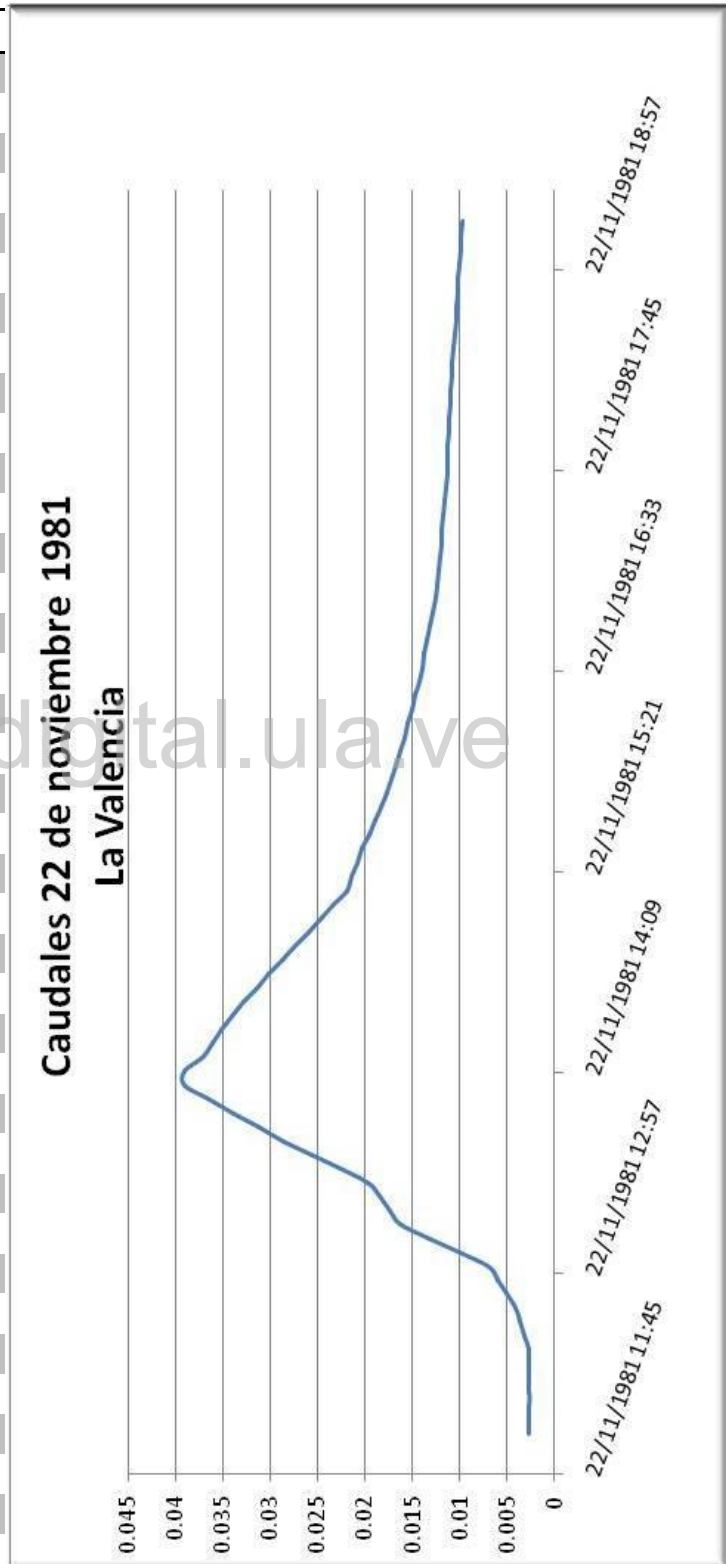


Tabla B4.a) Caudales del 22 de Noviembre 1981 (Continuación)

Hora	m3/s	Hora	m3/s
22Nov1981, 15:10	0.0232533	22Nov1981, 18:15	0.01096
22Nov1981, 15:15	0.02192	22Nov1981, 18:20	0.0108567
22Nov1981, 15:20	0.0213633	22Nov1981, 18:25	0.0107533
22Nov1981, 15:25	0.0208067	22Nov1981, 18:30	0.01065
22Nov1981, 15:30	0.02025	22Nov1981, 18:35	0.01053
22Nov1981, 15:35	0.0195767	22Nov1981, 18:40	0.01041
22Nov1981, 15:40	0.0189033	22Nov1981, 18:45	0.01029
22Nov1981, 15:45	0.01823	22Nov1981, 18:50	0.01021
22Nov1981, 15:50	0.0177067	22Nov1981, 18:55	0.01013
22Nov1981, 15:55	0.0171833	22Nov1981, 19:00	0.01005
22Nov1981, 16:00	0.01666	22Nov1981, 19:05	0.0099533
22Nov1981, 16:05	0.0162667	22Nov1981, 19:10	0.0098567
22Nov1981, 16:10	0.0158733	22Nov1981, 19:15	0.00976
22Nov1981, 16:15	0.01548		
22Nov1981, 16:20	0.01508		
22Nov1981, 16:25	0.01468		
22Nov1981, 16:30	0.01428		
22Nov1981, 16:35	0.0139933		
22Nov1981, 16:40	0.0137067		
22Nov1981, 16:45	0.01342		
22Nov1981, 16:50	0.0131433		
22Nov1981, 16:55	0.0128667		
22Nov1981, 17:00	0.01259		
22Nov1981, 17:05	0.01241		
22Nov1981, 17:10	0.01223		
22Nov1981, 17:15	0.01205		
22Nov1981, 17:20	0.0119433		
22Nov1981, 17:25	0.0118367		
22Nov1981, 17:30	0.01173		
22Nov1981, 17:35	0.0116		
22Nov1981, 17:40	0.01147		
22Nov1981, 17:45	0.01134		
22Nov1981, 17:50	0.0112767		
22Nov1981, 17:55	0.0112133		
22Nov1981, 18:00	0.01115		
22Nov1981, 18:05	0.0110867		
22Nov1981, 18:10	0.0110233		

Tabla B4.a) Caudales del 11 de Diciembre 1981

Hora	m3/s
11Dec1981, 08:00	0.00138
11Dec1981, 08:05	0.0047633
11Dec1981, 08:10	0.0081467
11Dec1981, 08:15	0.01153
11Dec1981, 08:20	0.04577
11Dec1981, 08:25	0.08001
11Dec1981, 08:30	0.11425
11Dec1981, 08:35	0.125
11Dec1981, 08:40	0.14181
11Dec1981, 08:45	0.15862
11Dec1981, 08:50	0.161
11Dec1981, 08:55	0.162
11Dec1981, 09:00	0.14624
11Dec1981, 09:05	0.13592
11Dec1981, 09:10	0.12561
11Dec1981, 09:15	0.11529
11Dec1981, 09:20	0.10717
11Dec1981, 09:25	0.0990567
11Dec1981, 09:30	0.09094
11Dec1981, 09:35	0.0881233
11Dec1981, 09:40	0.0853067
11Dec1981, 09:45	0.08249
11Dec1981, 09:50	0.07645
11Dec1981, 09:55	0.07041
11Dec1981, 10:00	0.06437
11Dec1981, 10:05	0.06145
11Dec1981, 10:10	0.05853
11Dec1981, 10:15	0.05561
11Dec1981, 10:20	0.0534567
11Dec1981, 10:25	0.0513033
11Dec1981, 10:30	0.04915
11Dec1981, 10:35	0.0471567
11Dec1981, 10:40	0.0451633
11Dec1981, 10:45	0.04317
11Dec1981, 10:50	0.0444467
11Dec1981, 10:55	0.0457233
11Dec1981, 11:00	0.047
11Dec1981, 11:05	0.0432367
11Dec1981, 11:10	0.0394733
11Dec1981, 11:15	0.03571

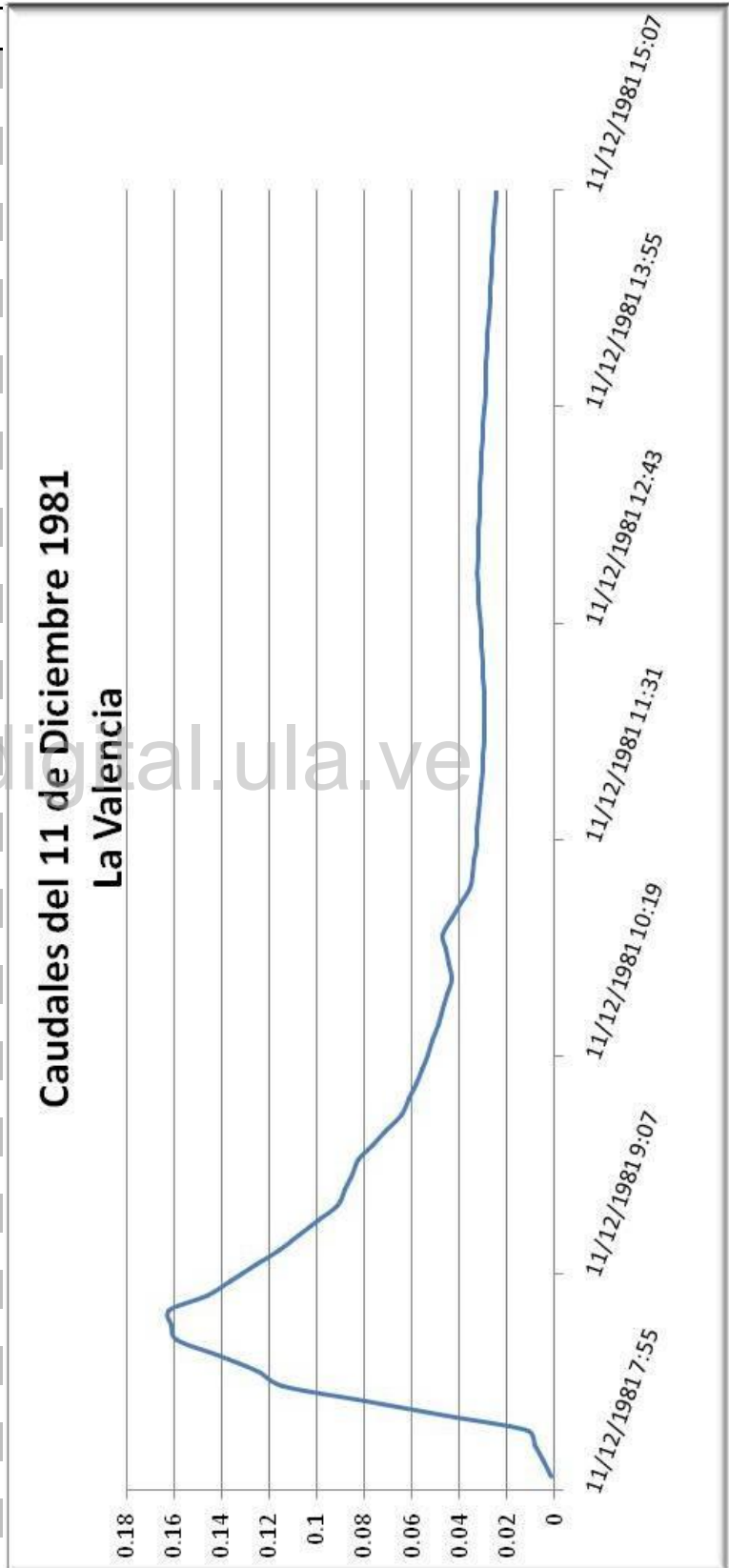


Tabla B4.a) Caudales del 11 de Diciembre 1981 (Continuación)

Hora	m3/s	Hora	m3/s
11Dec1981, 11:20	0.0347933	11Dec1981, 13:50	0.0298867
11Dec1981, 11:25	0.0338767	11Dec1981, 13:55	0.0295433
11Dec1981, 11:30	0.03296	11Dec1981, 14:00	0.0292
11Dec1981, 11:35	0.03236	11Dec1981, 14:05	0.0289367
11Dec1981, 11:40	0.03176	11Dec1981, 14:10	0.0286733
11Dec1981, 11:45	0.03116	11Dec1981, 14:15	0.02841
11Dec1981, 11:50	0.0307733	11Dec1981, 14:20	0.0280433
11Dec1981, 11:55	0.0303867	11Dec1981, 14:25	0.0276767
11Dec1981, 12:00	0.03	11Dec1981, 14:30	0.02731
11Dec1981, 12:05	0.0298467	11Dec1981, 14:35	0.0269533
11Dec1981, 12:10	0.0296933	11Dec1981, 14:40	0.0265967
11Dec1981, 12:15	0.02954	11Dec1981, 14:45	0.02624
11Dec1981, 12:20	0.02977	11Dec1981, 14:50	0.02589
11Dec1981, 12:25	0.03	11Dec1981, 14:55	0.02554
11Dec1981, 12:30	0.03023	11Dec1981, 15:00	0.02519
11Dec1981, 12:35	0.03062	11Dec1981, 15:05	0.02485
11Dec1981, 12:40	0.03101	11Dec1981, 15:10	0.02451
11Dec1981, 12:45	0.0314	11Dec1981, 15:15	0.02417
11Dec1981, 12:50	0.0318		
11Dec1981, 12:55	0.0322		
11Dec1981, 13:00	0.0326		
11Dec1981, 13:05	0.0323567		
11Dec1981, 13:10	0.0321133		
11Dec1981, 13:15	0.03187		
11Dec1981, 13:20	0.0317133		
11Dec1981, 13:25	0.0315567		
11Dec1981, 13:30	0.0314		
11Dec1981, 13:35	0.03101		
11Dec1981, 13:40	0.03062		
11Dec1981, 13:45	0.03023		

# ANEXO C

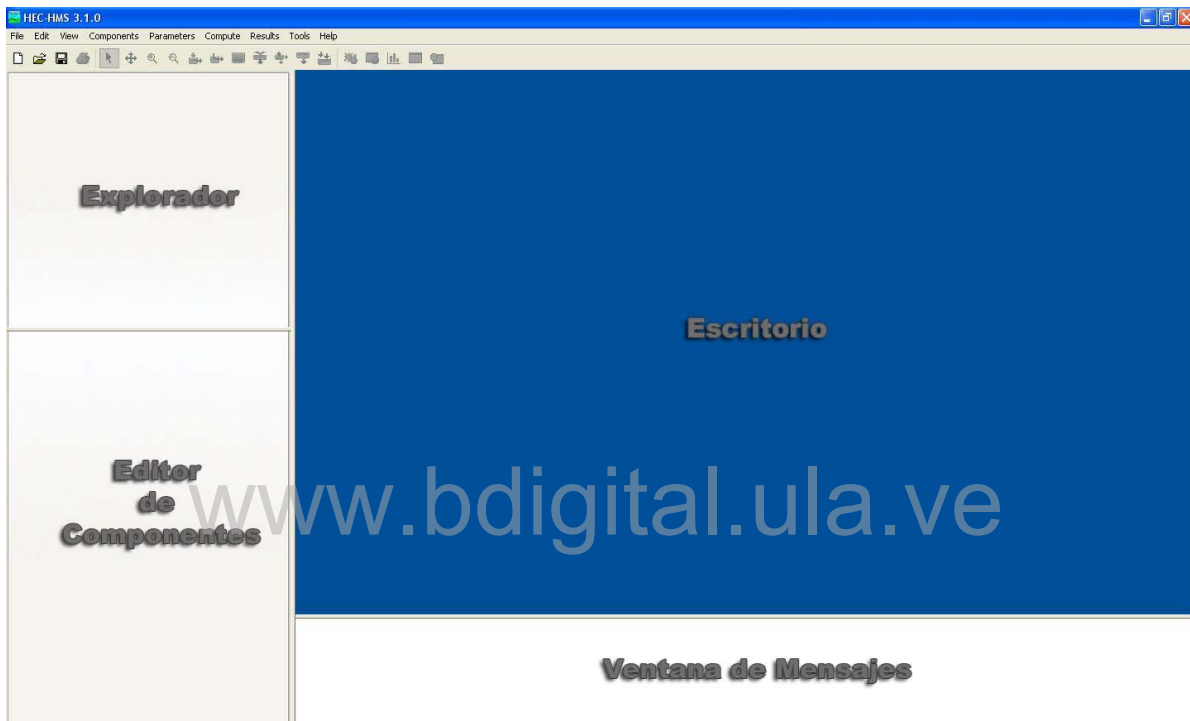
[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**Uso de los Modelos**

## C.1 MODELACION CON EL MODELO HEC-HMS

En este punto se presenta la descripción de cómo se realizó el modelado de la cuenca del Río Boconó con el modelo HEC-HMS, esta se realiza a manera de un manual rápido para que el lector pueda familiarizarse con el programa, e incluso seguir estos pasos para utilizar este por primera vez.

Para comenzar, al ejecutar el programa del modelo HEC-HMS se tiene la pantalla principal, la cual está dividida en cuatro secciones, como se muestra en la Figura 1.



*Figura 1. Ventana principal del modelo HEC-HMS*

En el Explorador se pueden visualizar en forma de árbol los componentes del proyecto, las corridas realizadas y los resultados. En el escritorio se puede ver el esquema de la cuenca y las diferentes ventanas de gráficos y tablas, ya sea de los resultados o de los datos. En el editor de componentes se pueden modificar los valores de los datos del componente activo en el explorador. La ventana de mensajes muestra los errores, advertencias, notas y otros mensajes generados por el programa. A medida que se avance con el modelado de la cuenca se tendrá más clara la idea de cada una de estas secciones.

Un proyecto en el modelo HEC-HMS requiere al menos cuatro componentes de los mostrados en la Figura 2



Figura 2. Componentes de un proyecto del modelo HEC-HMS

El “Basin Model Manager” o Administrador de modelos de cuenca es el componente que contiene la información física de la cuenca. En este componente se definen las subcuencas, ríos, canales, reservorios, etc; se especifican los métodos que se utilizarán y los parámetros de cada uno.

El “Meteorologic Model Model” o Administrador de modelos meteorologicos es el componente que maneja la información meteorológica para la simulación. Aquí se especifica la manera en que se introducirán los datos de lluvia, evapotranspiración y derretido de nieve, así como que información corresponde a cada subcuenca.

En el “Control Specification Manager” o Administrador de especificaciones de control se definen el inicio y final de la simulación, así como el intervalo con el que se realizarán los cálculos.

Los últimos tres son los que manejan los datos necesarios por el modelo para realizar la modelación.

- **Representación física de la cuenca**


Para empezar se debe crear un nuevo proyecto pulsando en el botón “*Create a New Project*” , que abre una ventana donde se le da un nombre al proyecto, una pequeña descripción, y se escoge el sistema de unidades.



Figura 3. crear nuevo proyecto en el modelo HEC-HMS

Luego se necesita insertar un modelo de cuenca, para esto en el menú *Components > Basin Model Manager > New..* se introducen el nombre de la cuenca y una breve descripción





Figura 4. crear nuevo modelo de cuenca en el modelo HEC-HMS

Para ver la ventana de del modelo de cuenca se debe hacer clic en el signo “+” al lado de “Basins Models” en el Explorador, y luego en el icono de la cuenca que acabamos de crear.

Se puede añadir una imagen de fondo para el proyecto en el menú *View > Background Maps* pudiendo utilizarse cinco formatos: USGS Grafico digital de línea (\*.dlg), AutoCad (\*.dxf), Imagen georeferenciada (\*.img), Mapa HMS (\*.map) y ESRI Shapefile (\*.shp).

Para la esquematización de la cuenca se cuenta con los elementos descritos en la Tabla 25.

Tabla 25. Elementos disponibles en el modelo HEC-HMS

Elemento	icono	Descripción
Subcuenca		representación física de la cuenca
cauce		Representación de los cauces de agua
Reservorio		Elementos con entrada, almacenamiento y salida de agua
Unión		Combina el flujo de dos o mas elementos en una sola salida
División		Modela una toma de agua del cauce.
Fuente		Introduce un flujo a la cuenca, ya sea constante o variable.
Estanque		Utilizado para representar la salida de la cuenca. Puede tener varias entradas, pero no tiene salidas.

En la Figura 17 se muestra la esquematización de la cuenca del Río Boconó en el modelo HEC-HMS. Esta esquematización se se deduce de la división de subcuencas, como se presenta en la Figura 18, donde cada una de esta está subdividida a su vez en vertientes.

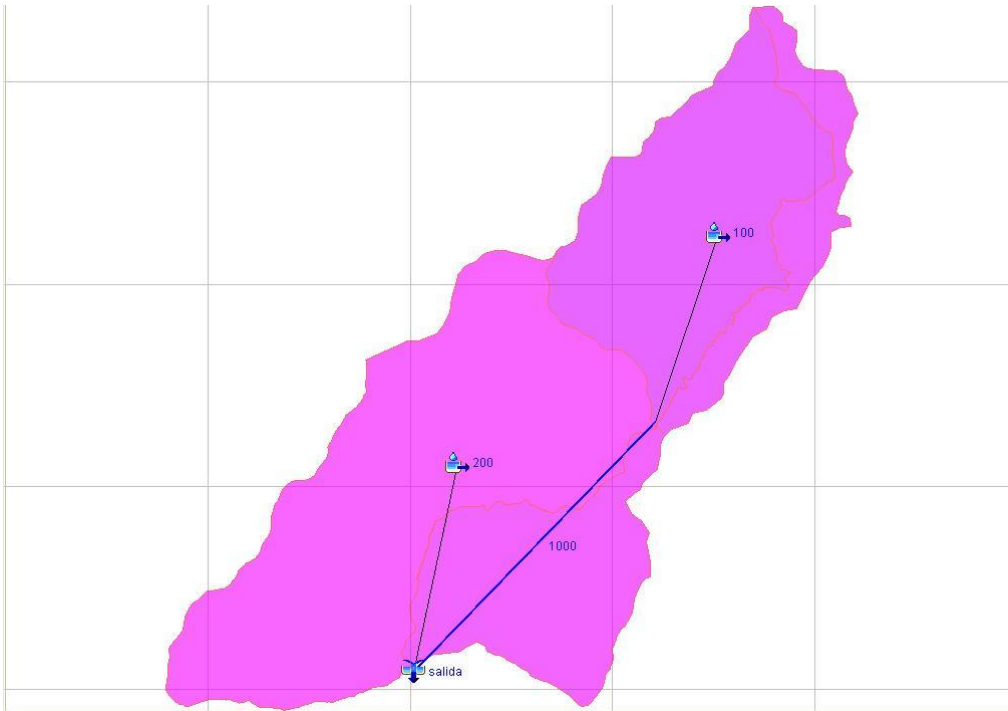


Figura 5. Esquematización Río Boconó en el modelo HEC-HMS

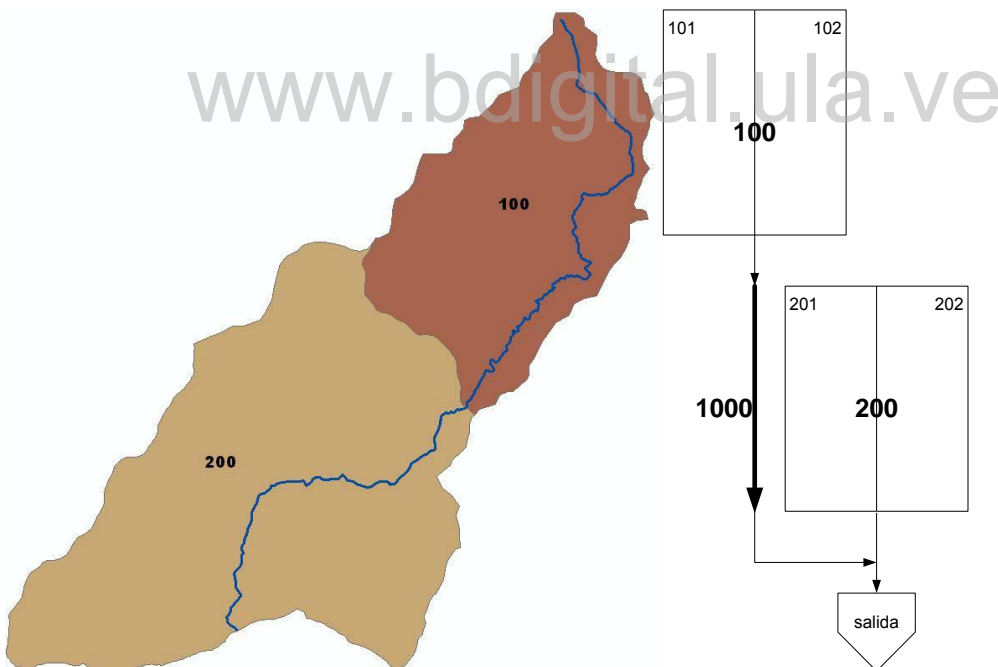


Figura 6. Esquematización Río Boconó para el HEC-HMS

Después se puede elegir el método de cálculo que se utilizará para cada uno de los elementos, para esto se hace clic sobre el elemento, ya sea en el explorador o en el escritorio, para que aparezcan sus propiedades en el editor de componentes.

Para este caso se escogió el método del número de curva del SCS para el cálculo de pérdidas, el de la onda cinemática para la transformación de precipitación en escorrentía y el caudal base se asumirá constante.

Al escoger un método aparecerán en la parte superior las lengüetas correspondientes a este. En este caso tendremos las lengüetas que se muestran en la Figura 7. Como para este método se divide cada subcuenca en dos vertientes, se tiene un juego “Plane – Loss” para cada una y una lengüeta para el canal principal. Adicionalmente se puede añadir información sobre canales colectores en las vertientes, como no se cuenta con esta información dejaremos en blanco estas dos lengüetas, entonces el programa las obviara.

Figura 7. Propiedades Subcuenca Río Boconó

Los datos utilizados para cada subcuenca se obtuvieron utilizando el modelo digital de elevaciones y el mapa de ríos de la cuenca con el programa ArcGIS 9.1. Estos datos se resumen en la Tabla 17.

En la lengüeta correspondiente a los datos del canal se tiene la opción “route upstream” (transitar desde aguas arriba), esta se refiere a si se quiere que se realice el cálculo desde el borde de la subcuenca aguas arriba hasta la salida de la subcuenca (“yes”) o desde el primer punto de concentración identificado en el canal (“no”). En este caso se elige “no”.

En la lengüeta de pérdidas (“loss”) se tiene el campo “Initial abstraction” que se refiere a la pérdidas iniciales. Para este caso se deja en cero.

Tabla 1. Datos de cada subcuenca de la cuenca del Río Boconó para el modelo HEC-HMS

<b>Subcuenca</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Área (km <sup>2</sup> )	173.32	327.58
<b>Vertiente 1</b>		
Longitud (m)	5938	1744.14
Pendiente (m/m)	0.455	0.4
Rugosidad	0.35	0.35
% área total	77.3	22.7
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Vertiente 2</b>		
Longitud (m)	7627.69	2974.70
Pendiente (m/m)	0.458	0.377
Rugosidad	0.35	0.35
% área total	71.94	28.06
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Canal</b>		
Longitud (m)	22561.71	30896.92
Pendiente (m/m)	0.0137	0.0192
Forma	Rectangular	Rectangular
Base (m)	15	15
Rugosidad	0.035	0.035

El HEC-HMS no permite una entrada de agua en las subcuencas a parte de la precipitación. Así que, en el caso de tener una subcuenca aguas arriba de otra, se debe realizar el tránsito de la primera por un canal con las mismas características del canal principal del segundo y juntar las aguas de los dos a la salida de este. En el caso que una subcuenca entre en otra a la mitad de esta se utiliza el mismo artificio pero modificando la longitud del canal a la que le resta para llegar al final de la subcuenca que recibe las aguas. Siguiendo esta lógica se introdujo para simulación del Río Boconó el segmento de escorrentía descrito en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos del canal utilizado para modelar parte del río Boconó en el modelo HEC-HMS

<b>Elemento</b>	<b>1000</b>
Longitud (m)	30896.92
Pendiente (m/m)	0.0192
Forma	Rectangular
Base (m)	15
Rugosidad	0.035

También se utilizó una unión a la salida de la cuenca para unir el flujo proveniente de la subcuenca 100 y del canal 1000.

- **Información meteorológica**

La información meteorológica con la que se cuenta para la simulación de la cuenca del Río Boconó se presenta en el Anexo B, donde se tiene la precipitación media de Thiessen para la cuenca y caudales medidos durante los eventos escogidos.

Para introducir los datos de precipitación en el menú *Componentes > Time-Series Data Manager* se escoge el tipo de datos que se desea introducir, en este caso precipitación y luego se hace clic en “New”, emergerá una nueva ventana para introducir un nombre y una descripción, como se muestra en la Figura 8. Al apretar el botón “OK” aparecerá en el explorador un nuevo elemento dentro la categoría “Time-series Data” como se muestra en la Figura 9.

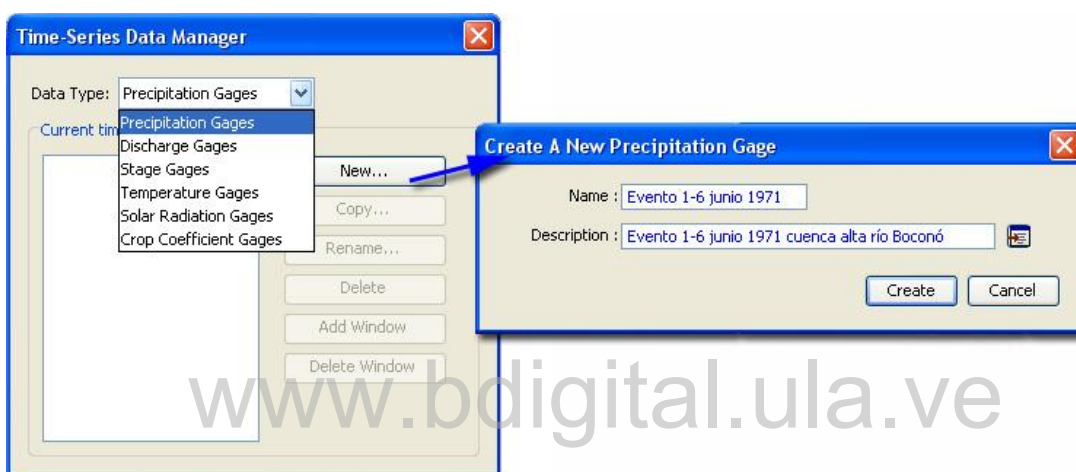


Figura 8. Creación de nuevo registro de datos para el Río Boconó en el HEC-HMS

Siguiendo un procedimiento similar se introduce los datos de caudal observados durante el evento para la estación Boconó.

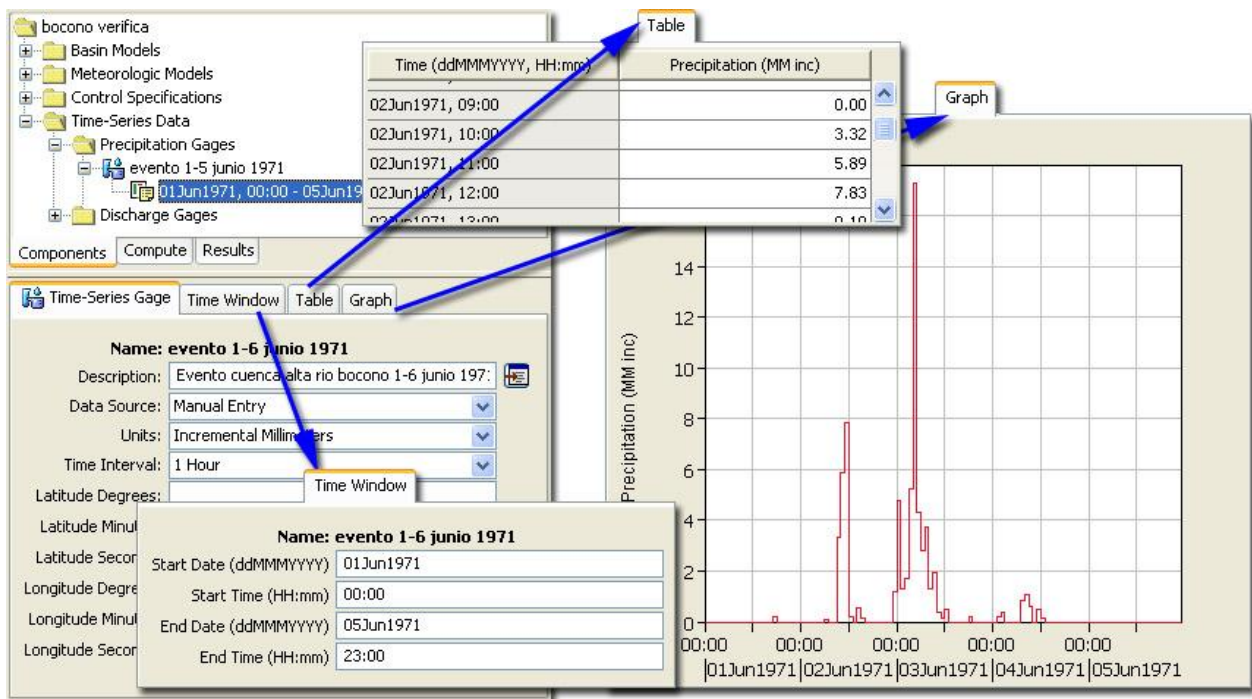


Figura 9. Introducción de datos de precipitación para el Río Boconó en el HEC-HMS

- **Modelo Meteorológico**

El siguiente paso consiste en determinar cómo utilizará el modelo la información meteorológica introducida. Primero se debe crear un nuevo modelo meteorológico en *Componentes > Meteorologic Model Manager > New...* donde se puede darle un nombre y una pequeña descripción, como se muestra en la Figura 10.

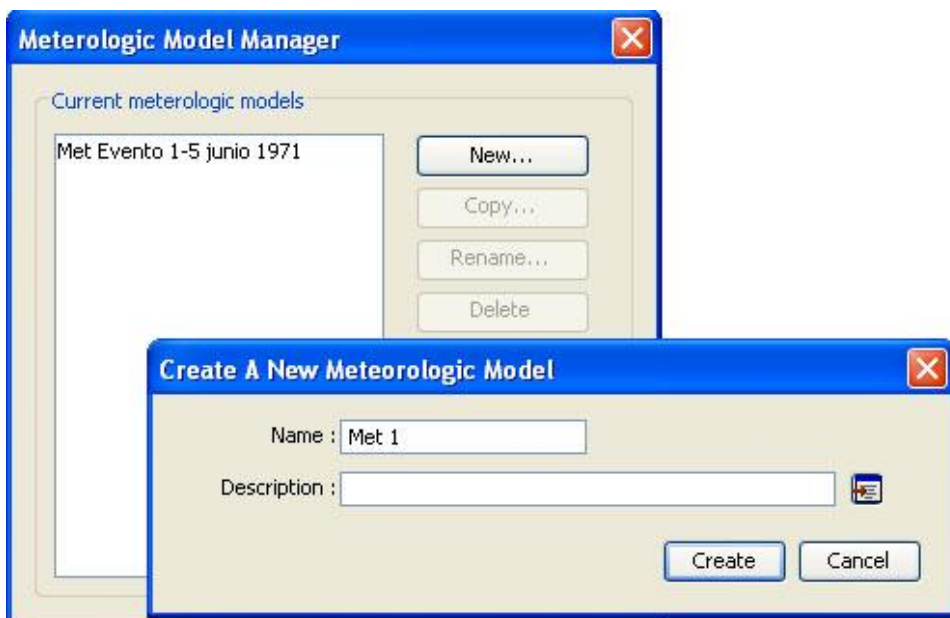


Figura 10. Creación del modelo meteorológico para el Río Boconó en el HEC-HMS



Una vez creado el modelo meteorológico debe ser configurado, entonces se hace clic en el explorador en el icono del modelo recién creado y en el editor de componentes se podrá escoger el método que se desea utilizar, en este caso se usó un hidrograma especificado, no se utilizará registro de evapotranspiración ni nieve y se usará el sistema métrico de unidades. En la pestaña “Basins” se escoge que este modelo se utilizara en la cuenca del Río Boconó. En Opciones se deja todo como esta por defecto.

Después en el explorador se hace clic en el icono del método seleccionado y en el editor de componentes se selecciona la serie de tiempo correspondiente al evento en estudio para todas las subcuencas, como se muestra en la Figura 11.

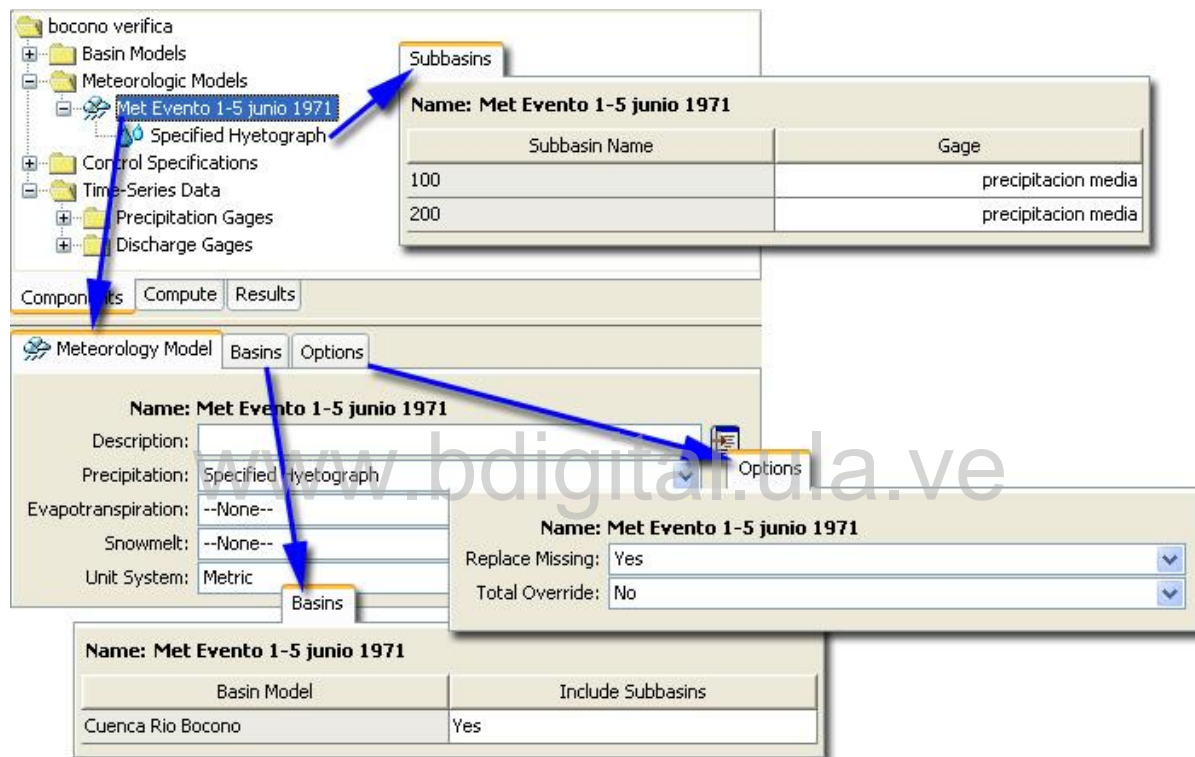


Figura 11. Configuración del modelo meteorológico del Río Boconó en el HEC-HMS

Para que el modelo pueda comparar el hidrograma simulado con el observado se debe indicar en el elemento que representa la salida de la cuenca, que los datos de la estación Boconó corresponden a este punto. Para esto se hace clic en el icono de la union que representa la salida de la cuenca y en el campo “Observed Flow” en la pestaña de opciones en el editor de componentes se escoge la estación Boconó, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Propiedades del elemento estanque de la salida de la cuenca del Río Boconó

- **Corrida del modelo**

Para correr el modelo primero se necesita crear un conjunto de especificaciones de control, para esto en *Components > Control specifications* se hace clic en “New” y se introduce un nombre y una pequeña descripción, como se muestra en la Figura 13. Después en el explorador se selecciona el icono del componente que se acaba de crear, el cual se encuentra en la categoría “Control Specifications” como se muestra en la Figura 14, y en el área del editor de componentes se introduce la fecha y hora que se desea para el inicio y final de la corrida y el intervalo de tiempo que se requiere.

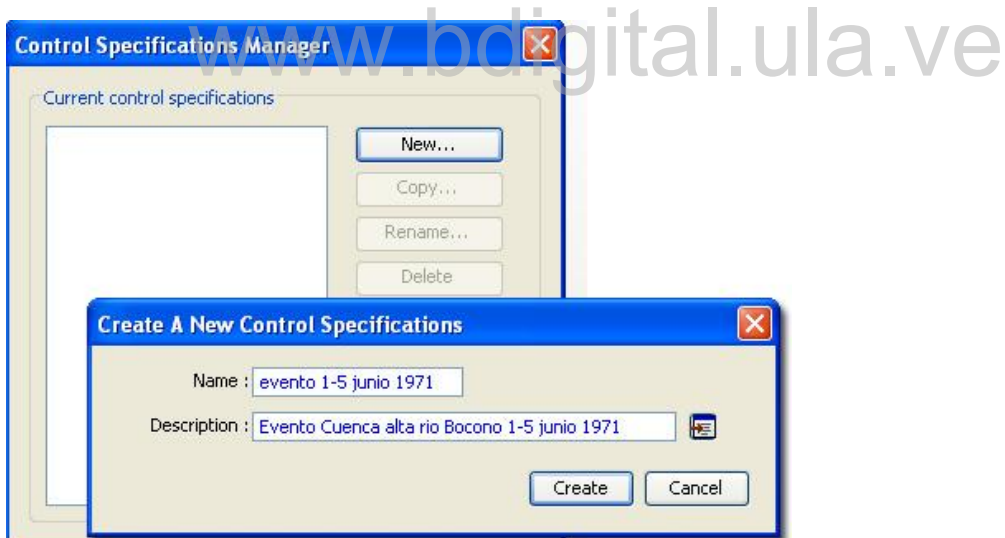


Figura 13. Creación de un nuevo conjunto de especificaciones de control para la corrida de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS



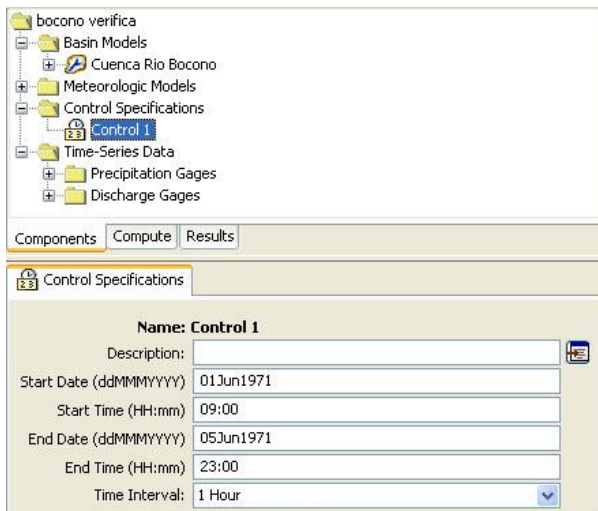


Figura 14. Especificaciones para la corrida de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS

Luego se debe crear una corrida en *Compute > Create Simulation Run*, se le da el nombre y se presiona el boton “Next”, se escoge la cuenca en la que deseamos realizar la corrida y luego “Next”, se escoge el modelo meteorológico y “Next” y por ultimo se escoge el conjunto de especificaciones de control de corrida y otra vez “Next”, este proceso se muestra en la Figura 15.

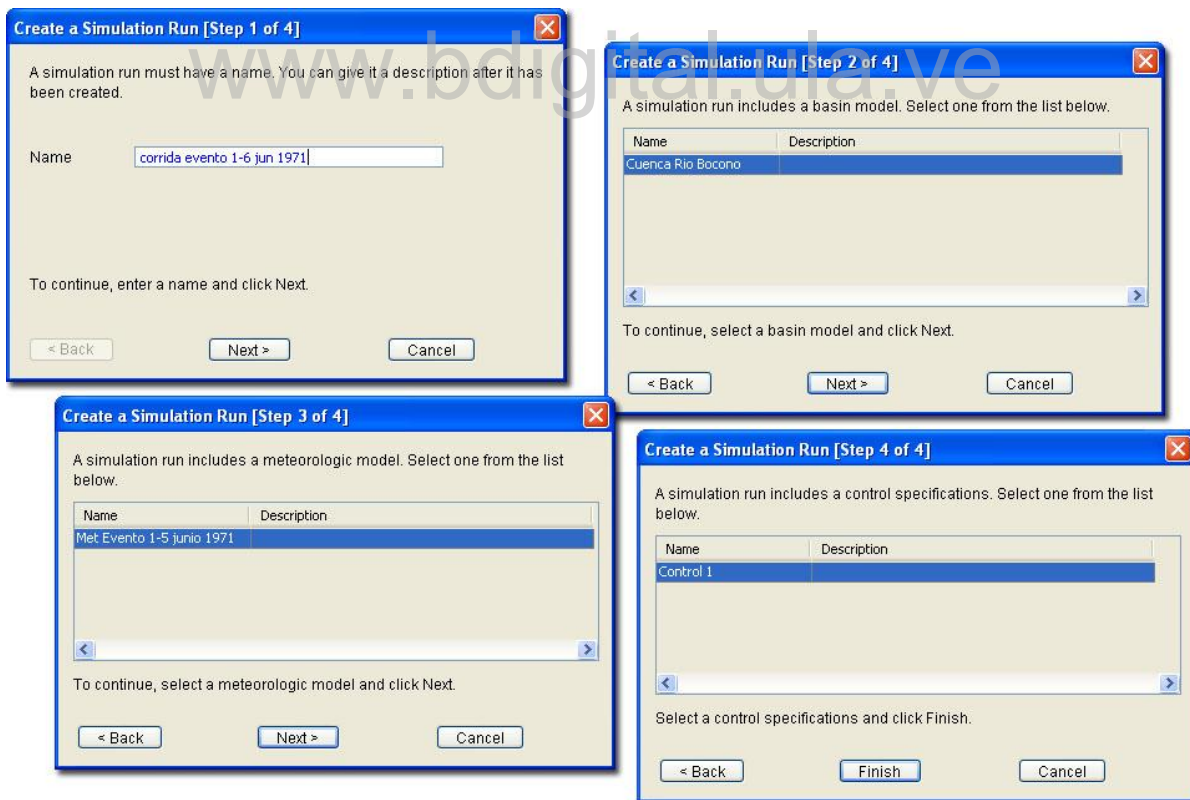


Figura 15. Especificaciones para la corrida de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS

Entonces en *Compute > Select Run* se escoge la corrida que se acaba de crear, y por último se hace clic en *Compute > Compute [corrida1]* para que empiecen los cálculos, entonces aparecerá una barra de progreso como se muestra en la Figura 16, y si llega a 100% quiere decir que terminó la simulación sin errores.

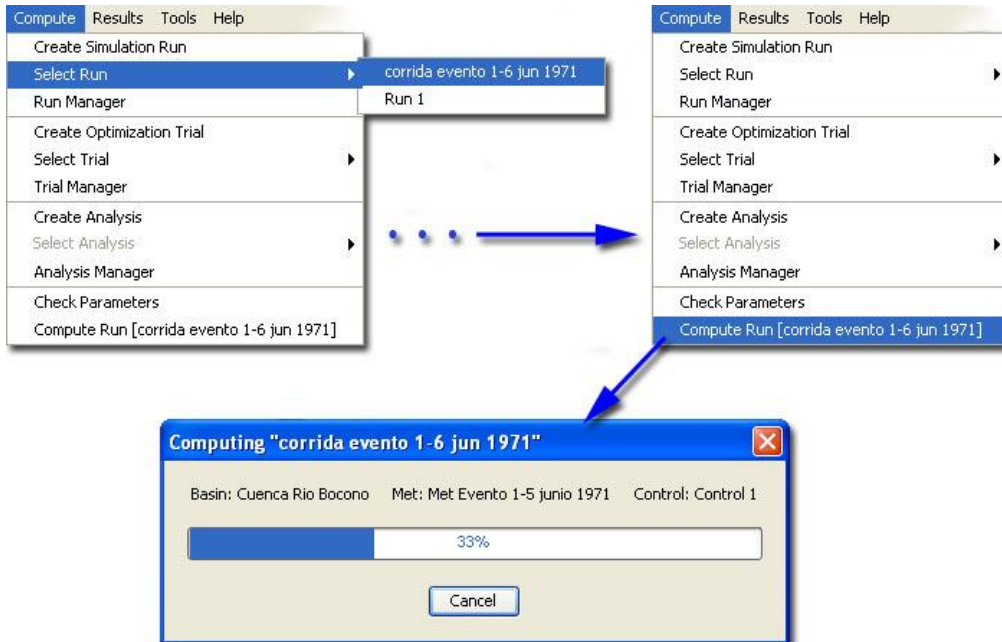


Figura 16. Corrida de la simulación de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS

### • *Primeros Resultados*

Para poder ver los resultados de la simulación se debe seleccionar la pestaña “Results” del explorador, como se muestra en la Figura 19 y luego se escogen los resultados que se desean visualizar.

En la Figura 19 se puede observar que los resultados obtenidos con los valores utilizados para esta primera simulación no son aceptables, ya que tanto el pico máximo como el volumen total de agua producida están muy por debajo de los valores observados.

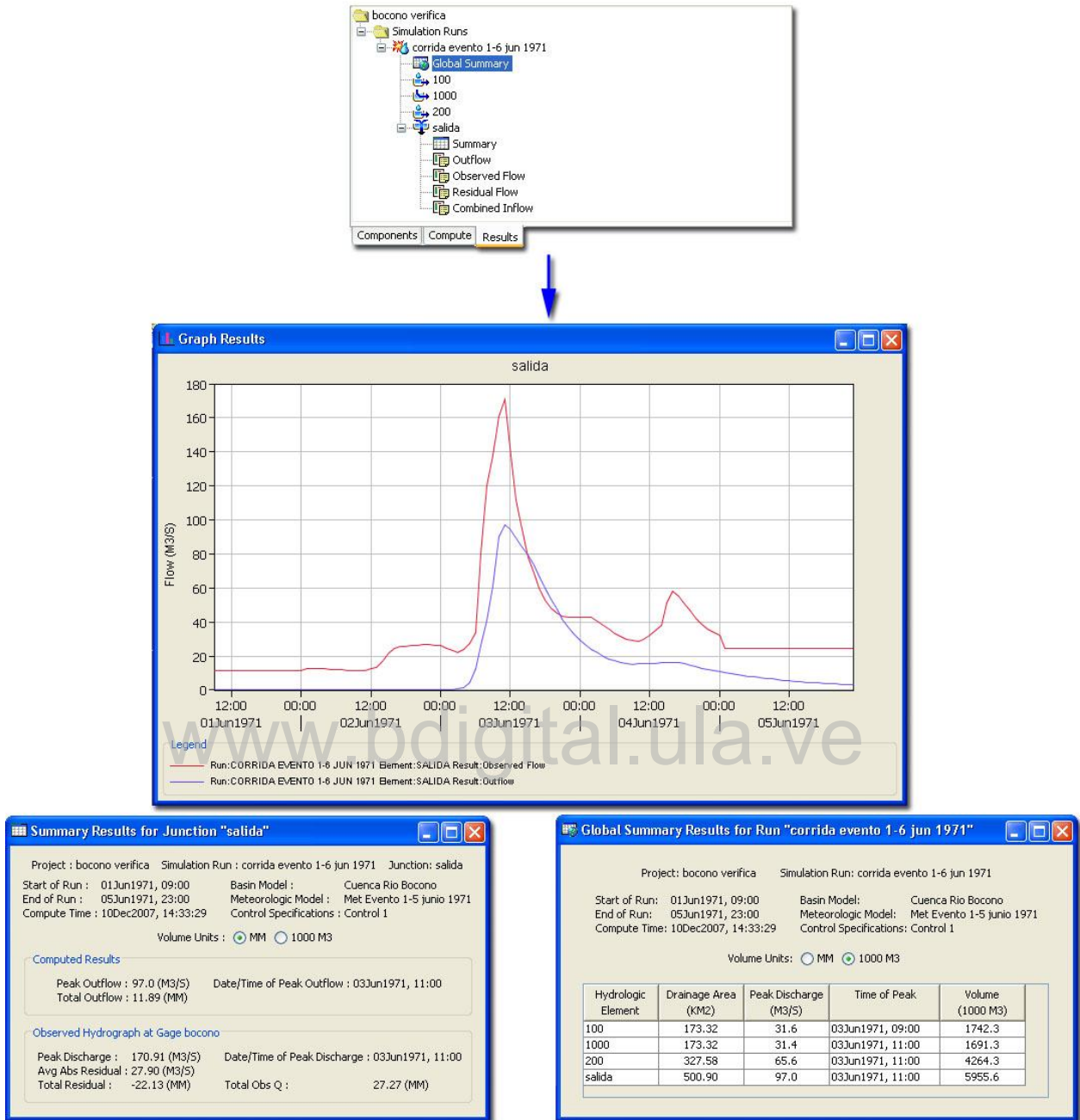


Figura 17. Resultados de la simulación de la cuenca del Río Boconó en el HEC-HMS

• **Calibración**

Para realizar la calibración del modelo para la cuenca se puede utilizar el método manual o la función de optimización incluida en el modelo HEC-HMS.

Para realizar el proceso de calibración automática se debe crear una nueva corrida de optimización en *Compute > Create Optimizacion Trial*, entonces el programa mostrará las ventanas que se presentan en la Figura 18, donde primero se le da un nombre, luego se escoge en que corrida se basará la optimización y por último en que punto de la cuenca se realizara esta.



*Figura 18. Creación de corrida de optimización en el HEC-HMS para la cuenca del Río Boconó*

Después se debe configurar la optimización que se quiere realizar, para esto, en la pestaña “compute” del explorador se busca la categoría “Optimization Trials” y dentro de esta el icono “objective function” de la optimización que se acaba de crear, tal como se muestra en la Figura 19. En el editor de componentes se puede escoger el método que se utilizará para la optimización, que tipo de optimización se desea y las fechas de inicio y final de esta.

Como en este caso lo que interesa es una buena calibración del pico máximo, se debe escoger un tipo de optimización que busque mejorar la aproximación Simulado – observado de este.

Para añadir los parámetros que serán optimizados se hace clic derecho en el icono de la optimización que se está configurando y en el menú que aparece se escoge “Add Parameter” entonces se tendrá un nuevo objeto en el árbol del explorador para este nuevo parámetro, como se muestra en la Figura 19 y la Figura 20. En el editor de componentes se escoge el elemento, que parámetro de este y el rango en que se podrá mover su valor durante la optimización. En este caso se escogió los números de curva y coeficientes de Manning para todas las vertientes.

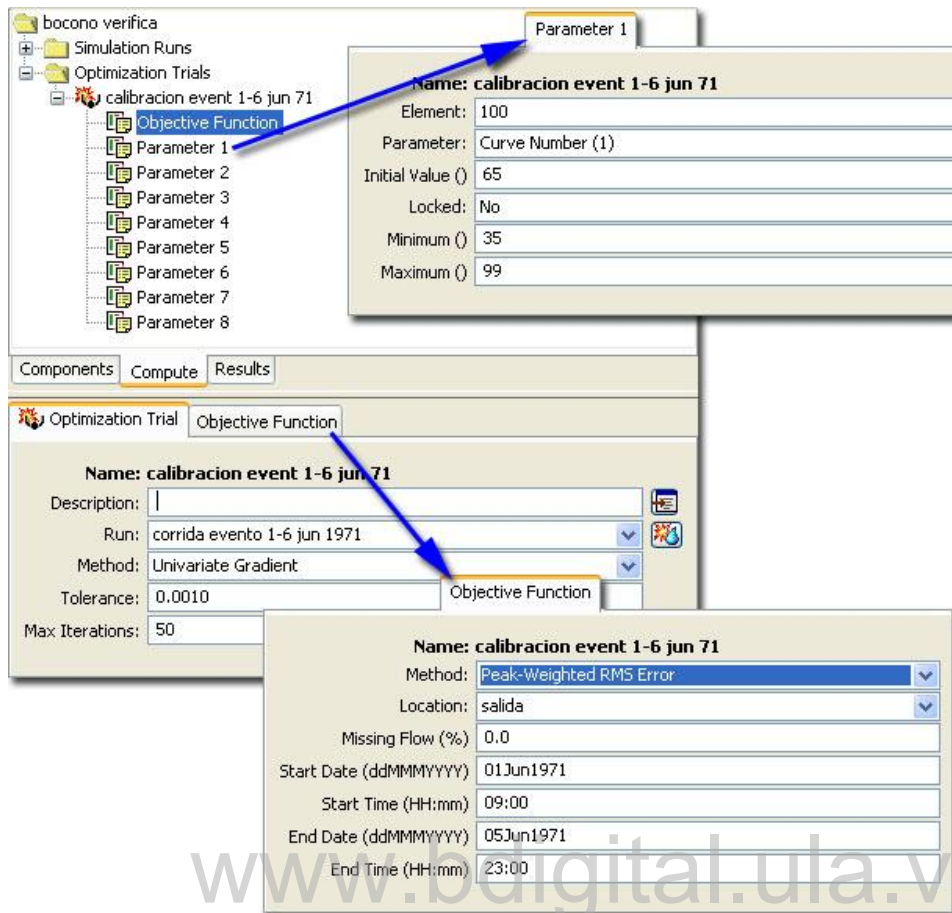


Figura 19. Configuración de la corrida de optimización de la cuenca del Río Bocono en el HEC-HMS

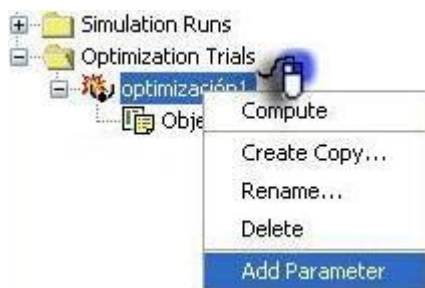



Figura 20. Añadir parámetros a optimizar en el HEC-HMS para la cuenca del Río Boconó

Una vez escogidos todos los parámetros a optimizar se hace clic en el icono  para que comiencen los cálculos, entonces aparecerá una barra de progreso que, si todo está bien, llegará a 100% al finalizar, entonces nos vamos a la pestaña “Results” para ver los resultados, como se muestra en la Figura 20.

En la Figura 20 se presentan algunos de los resultados que ofrece el HEC-HMS.

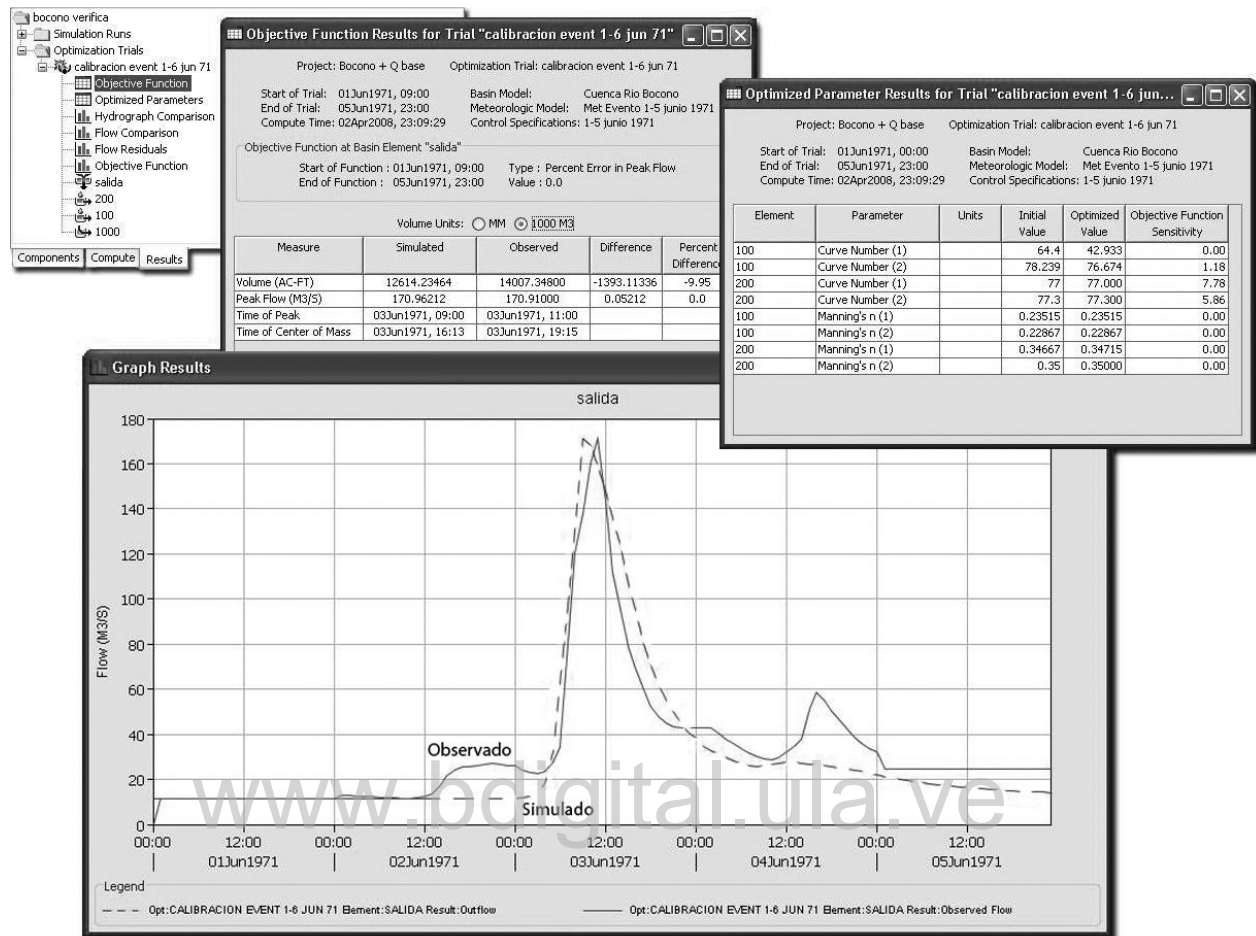


Figura 21. Resultados de la optimización en el HEC-HMS para la cuenca del Río Boconó

## C.2 MODELACION CON EL MODELO WinHSPF

Al ser la versión del WinHSPF parte del BASINS 4, este saca partido de las características de los diferentes programas que lo acompañan dentro de esta recopilación.

Primero se necesita preparar las bases de datos con la información meteorológica para el proyecto. Para esto se utiliza el programa WDMUtil, presentado en la Figura 22. Dentro de un archivo de manejo de datos de cuencas hidrológicas (WDM de sus siglas en ingles: Watershed Data Management) se pueden almacenar varias series de tiempo cada una identificada por un numero de serie de datos (DSN por sus siglas en ingles: Data Set Number), estas a su vez se pueden identificar con un Escenario, una locación, tipo de dato (Precipitación, temperatura, vaporación, etc) y estación a la que pertenece.



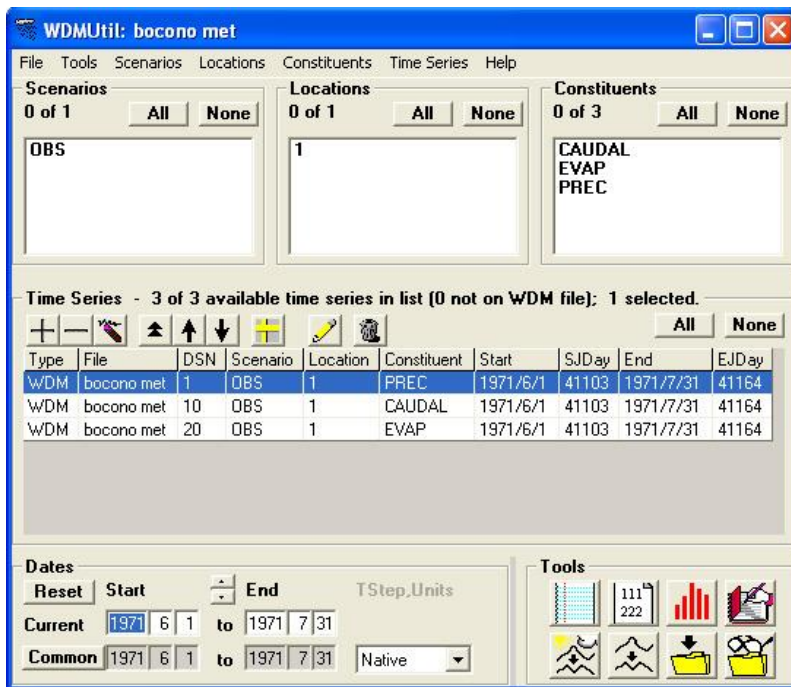


Figura 22. Manejador de bases de datos WDMUtil

Para crear una nueva base de datos se hace clic en *File > New* y para crear una nueva serie de tiempo en *Time Series > NewTime Series* en la ventana emergente se introducen todos los datos y se hace clic en OK luego se presiona el botón “List/Edit time Series” y se introducen los valores, como se muestra en la Figura 23.

Para este proyecto se creó una serie con la precipitación media en la cuenca y otra con la evapotranspiración media de la cuenca, las dos en el escenario OBS, como se muestra en la Figura 23.

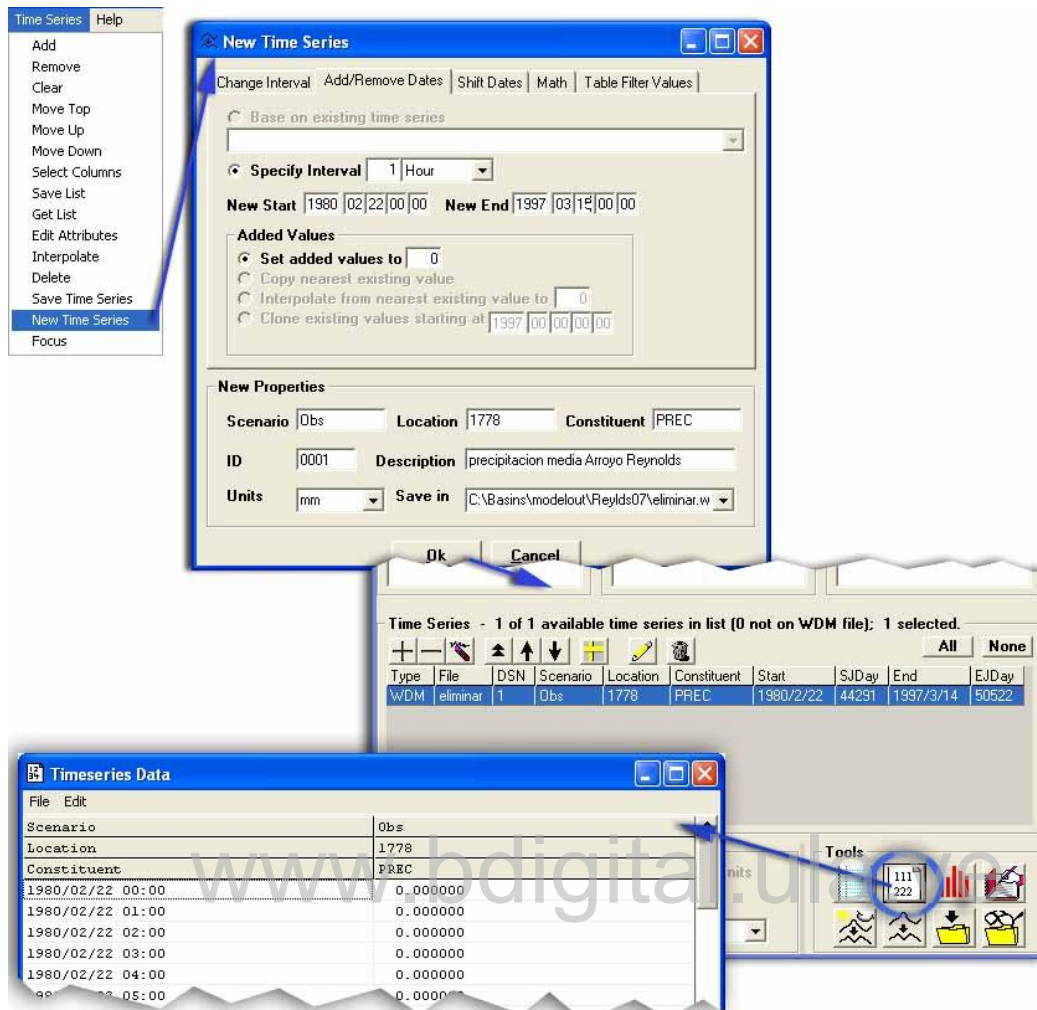


Figura 23. Crear una nueva serie de tiempo en WDMUtil

Para realizar la descripción física de la cuenca se utiliza el sistema de información geográfica MapWindow GIS 4.3, el cual al instalarse el BASINS 4 se instala junto con los complementos que lo enlazan al resto de las aplicaciones del BASINS 4. Entonces al ejecutar el icono BASINS 4 se abre el MapWindow y presenta la ventana que se observa en la Figura 24, donde se selecciona “Build BASINS Project” para iniciar la construcción de un nuevo proyecto.





Figura 24. Pantalla de inicio BASINS 4

En el caso de estar trabajando con una cuenca dentro de los Estados Unidos de Norte América (EUA), basta con seleccionarla del mapa y el programa bajara de bases de datos gubernamentales a través de Internet toda la información que solicitemos, como límites, ríos, tipos de suelos, DEM, etc.

En el caso en estudio la cuenca se encuentra en Venezuela, por lo que se necesita tener la información necesaria de antemano. Así que se presiona “Build” sin seleccionar alguna cuenca, como se muestra en la Figura 25. Al mensaje de confirmación que aparece le decimos “Si”, se selecciona un nombre y la proyección que se utilizará y se tendrá un proyecto vacío para trabajar en MapWindow.

Utilizando el icono  se puede añadir las capas de información que se tiene de la cuenca, en la Figura 27 se muestra un ejemplo del MapWindow usado para el BASINS 4.

Una vez que se tiene toda la información de nuestra cuenca cargada se utiliza la herramienta de delineación de cuencas del MapWindow, como se muestra en la Figura 27, para generar las tablas de atributos que servirán para que el programa le pase la información necesaria al modelo WinHSPF. Esta herramienta está dividida en dos métodos, el automático y el manual. El método manual requiere que se especifique que capa contiene los límites de las subcuencas, el modelo de elevación digital (DEM) y los ríos. En el caso del método automático, el programa delimitará la cuenca, sus subcuencas y los ríos en base al DEM.

En este caso se utilizó el método manual ya que se cuenta con toda la información necesaria. Una vez especificados los archivos requeridos se presionan en orden los botones “Delineate Subbasin” (Delimitación de subcuencas), “Calculate Subbasin Parameters” (Cálculo de parámetros de subcuencas) y “Define Stream Network and Outlets” (Definir red hídrica y salidas de flujo).

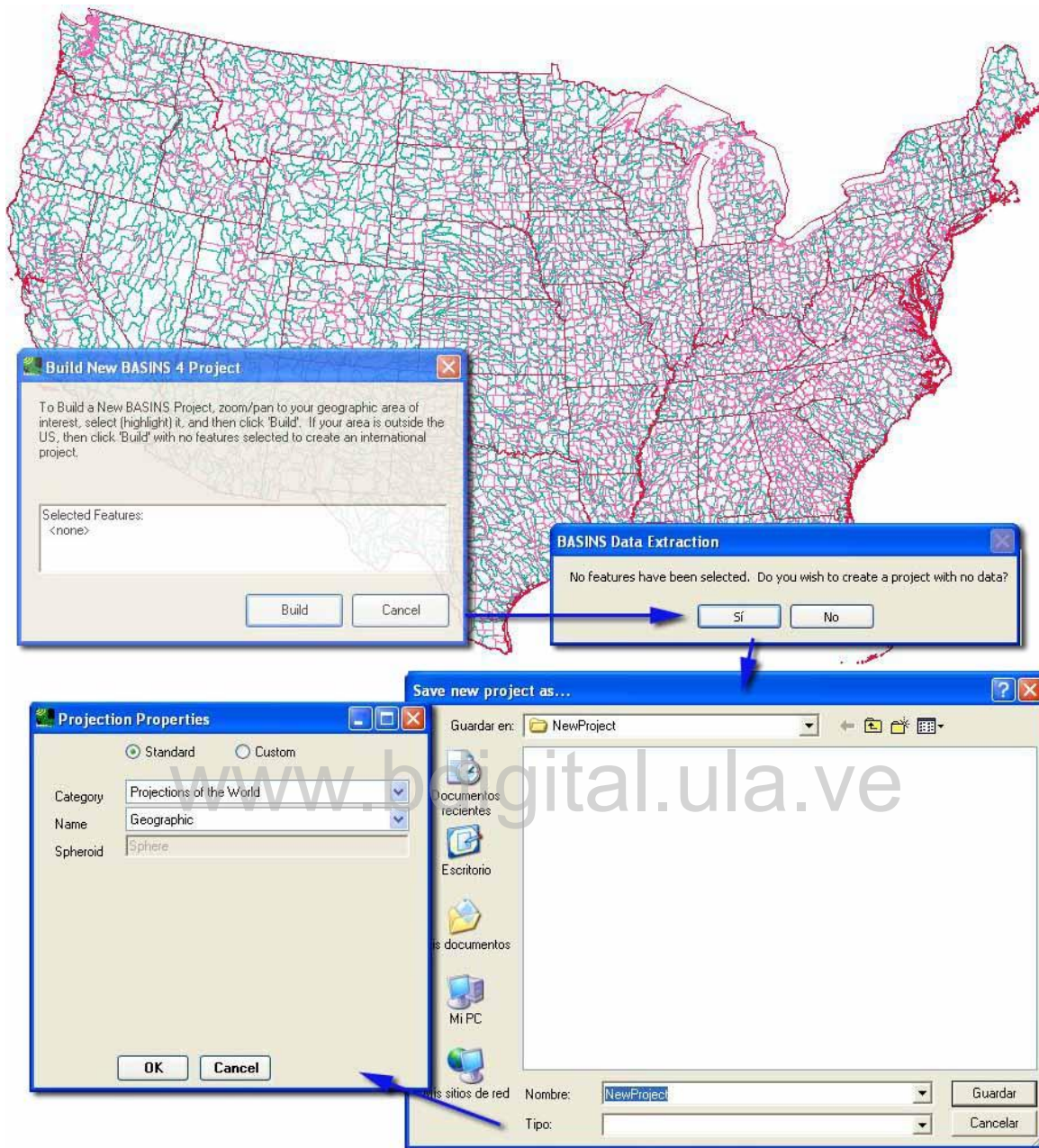
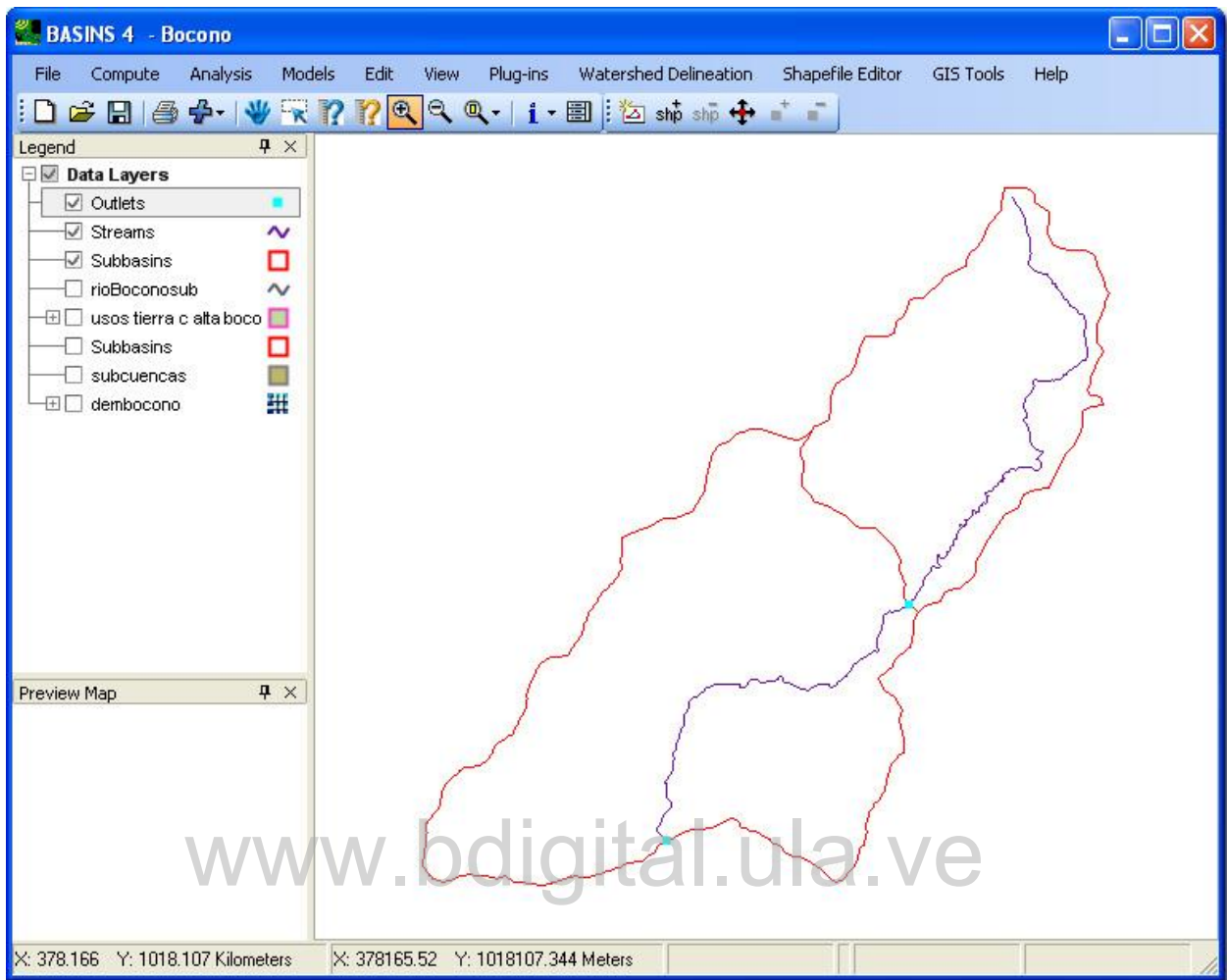


Figura 25. Construcción nuevo proyecto de BASINS 4



*Figura 26. Utilizando el MapWindow para el BASINS 4*

Cuando ya se tiene toda esta información procesada en el MapWindow se debe pasar al WinHSPF, para esto se tiene el complemento de enlace para el MapWindow mostrado en la Figura 28. Esta herramienta se encuentra en el menú *Models > WinHSPF* donde se deben especificar las capas correspondientes a la delimitación de subcuencas, ríos, uso de suelos y fuentes. También se puede especificar la impermeabilidad para cada tipo de uso de suelo, así como en que campo se encuentra la información necesaria para ríos, subcuencas y fuentes.

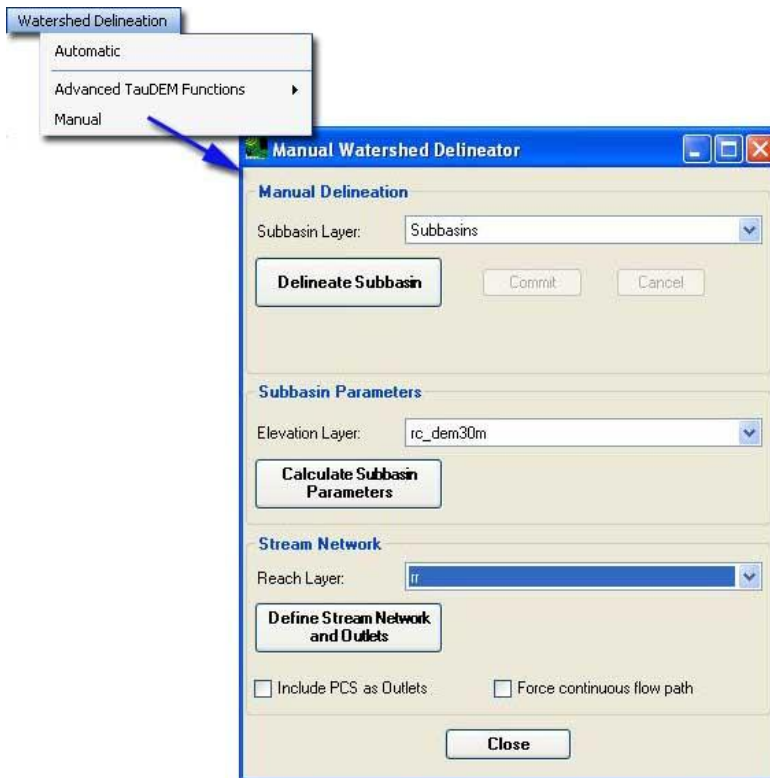


Figura 27. Herramienta de delineación manual de MapWindow

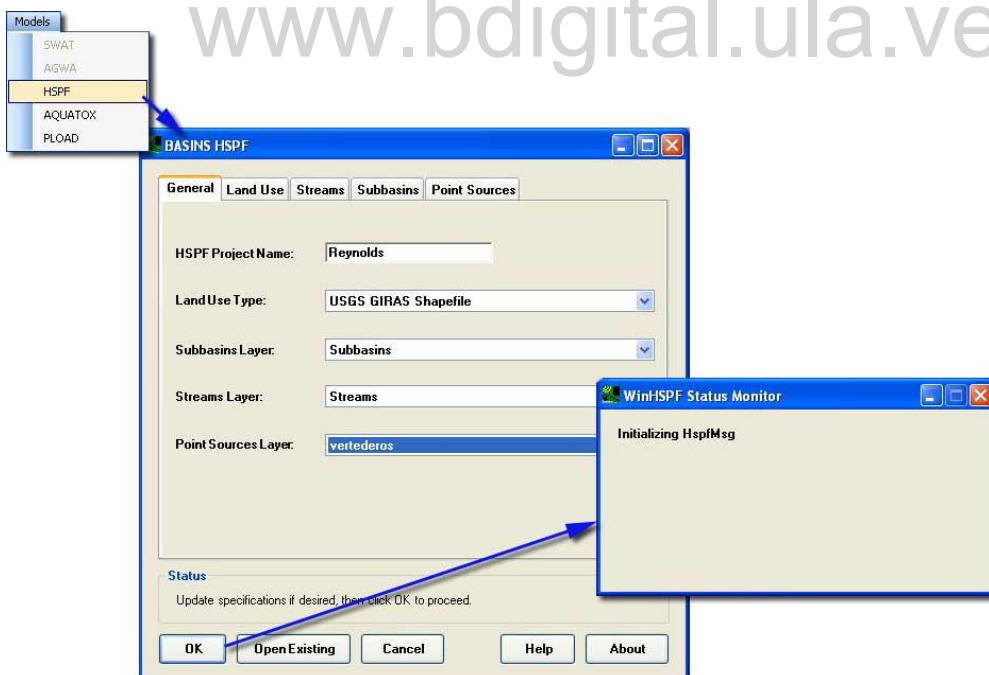


Figura 28. Complemento del BASINS 4 de enlace entre MapWindow y WinHSPF

Una vez pasado el control al WinHSPF este pide especificar la base de datos meteorológica de la cuenca y darle un nombre al archivo que contendrá la base de datos con la información generada por el modelo, el nombre del archivo que contiene la descripción

física de la cuenca ya aparece automáticamente en la casilla correspondiente. También se debe escoger si se quiere que se represente toda la cuenca con un solo segmento por cada tipo de uso de suelo (“Grouped”) o que sea un segmento para cada subcuenca, por cada tipo de uso de suelo (“Individual”). Al aceptar todo lo introducido en el paso anterior pedirá identificar que registros de la base de datos se utilizarán y a que tipo pertenece. Luego como se observa en la Figura 28 se pasa a la ventana principal del programa donde se puede ver la representación esquemática de la cuenca.

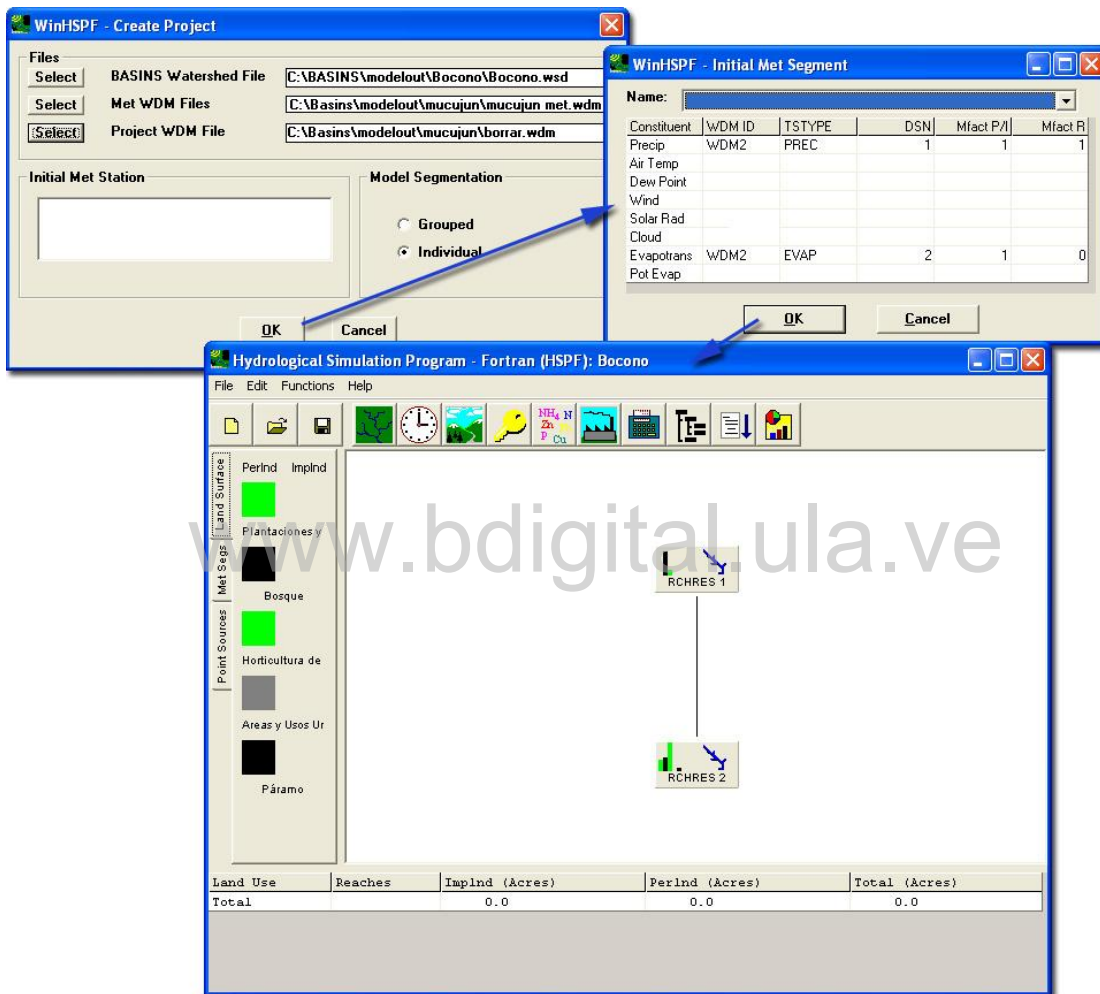


Figura 29. Inicio de un proyecto en el WinHSPF

La ventana principal está dividida en tres partes como se muestra en la Figura 30: el esquema de la cuenca, una barra vertical y una tabla auxiliar. En la barra vertical muestra los elementos pertenecientes a tres categorías: tipos de usos de suelo, segmentos meteorológicos y fuentes puntuales. La tabla auxiliar muestra la información correspondiente al elemento seleccionado en la barra vertical para el o los segmentos seleccionados en el esquema de la cuenca.



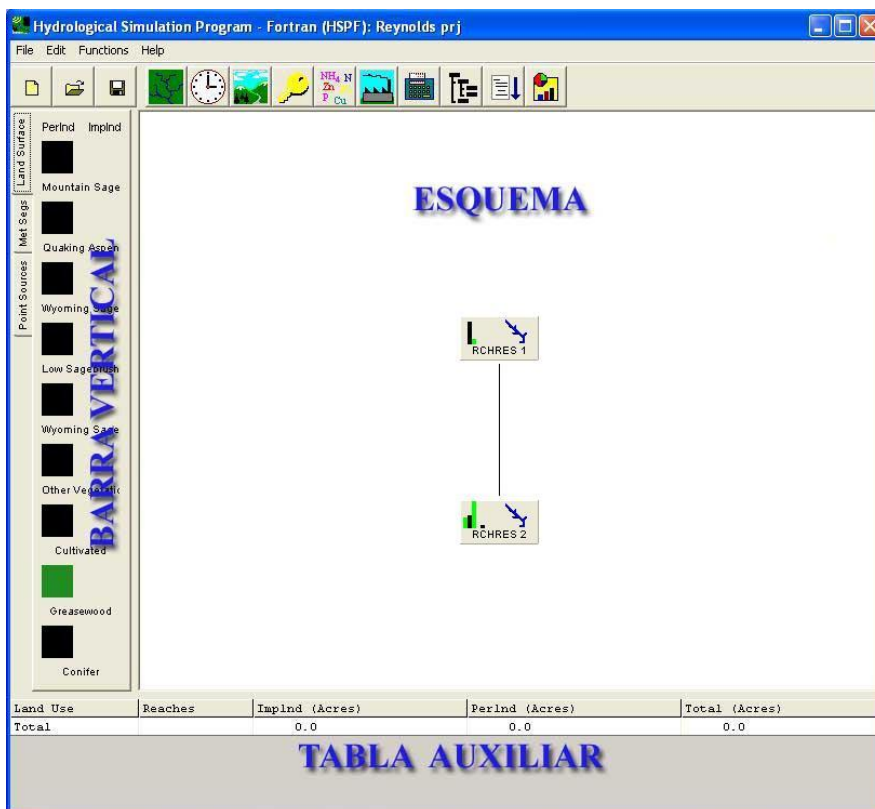
















Figura 30. Ventana principal del WinHSPF

En la parte superior se tiene la barra de tareas donde se tienen los iconos descritos en la Tabla 3:

Tabla 3. Iconos de la barra de tareas del WinHSP

icono	Descripción
	Editor de propiedades de ríos y canales.
	Tiempo de simulación y Datos meteorológicos.
	Editor de Usos de tierra.
	Tarjetas de Control.
	Selección de contaminantes.
	Propiedades de Fuentes puntuales.
	Editor de datos de entrada.
	Administrador de la salida del modelo.
	Corrida.
	Visor de salida del modelo (GenScn)

Se escoge el tiempo de simulación haciendo clic en el icono  y luego, utilizando el administrador de la salida del modelo () se selecciona la información que interesa obtener.

Para correr el modelo se hace clic en el icono  y luego se pasa al programa GenScn para ver los resultados haciendo clic en el icono .

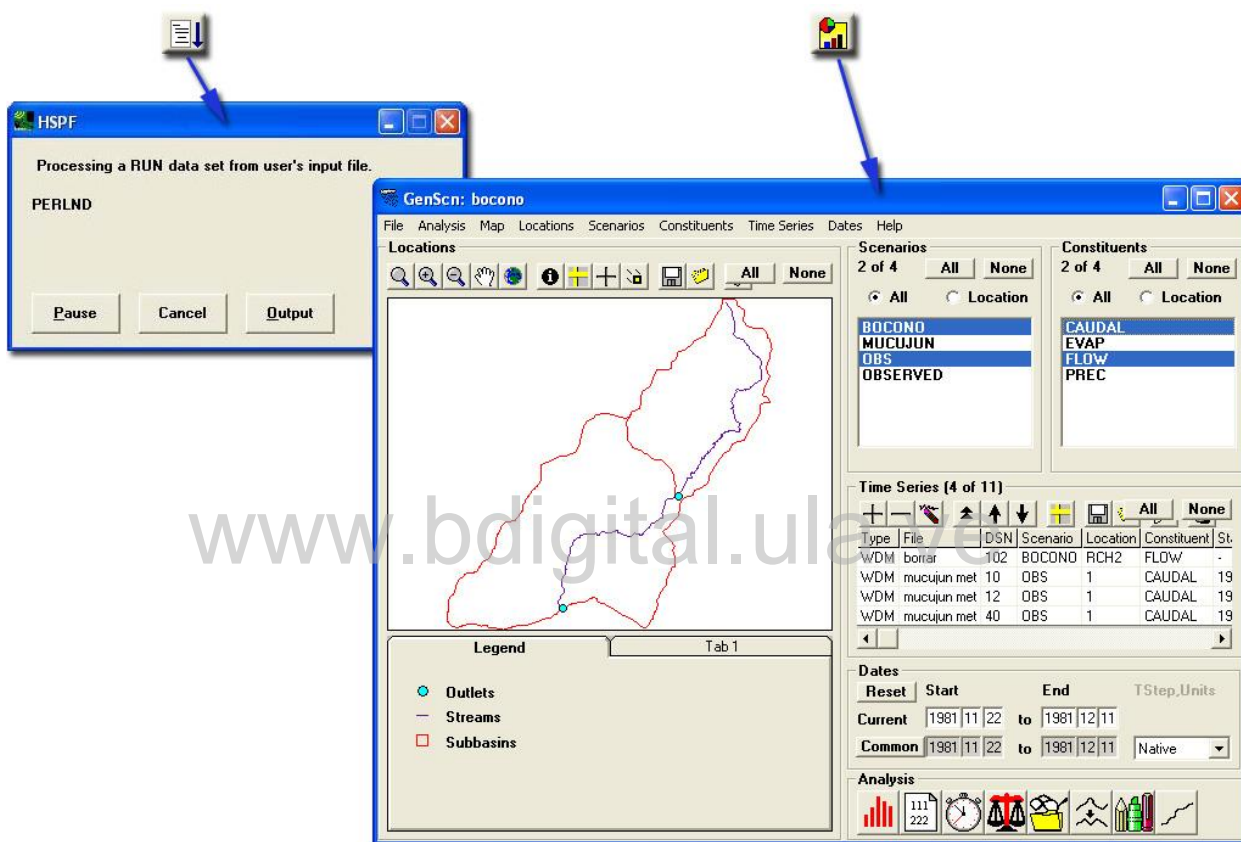


Figura 31. Corrida del Modelo WinHSPF y enlace con el programa GenScn

Como se muestra en la Figura 32 en el programa GenScn se pueden visualizar los resultados de manera gráfica o tabulada, además de poder realizar distintos análisis de estos, como el cálculo de coeficientes de correlación, medias, residuales, etc.

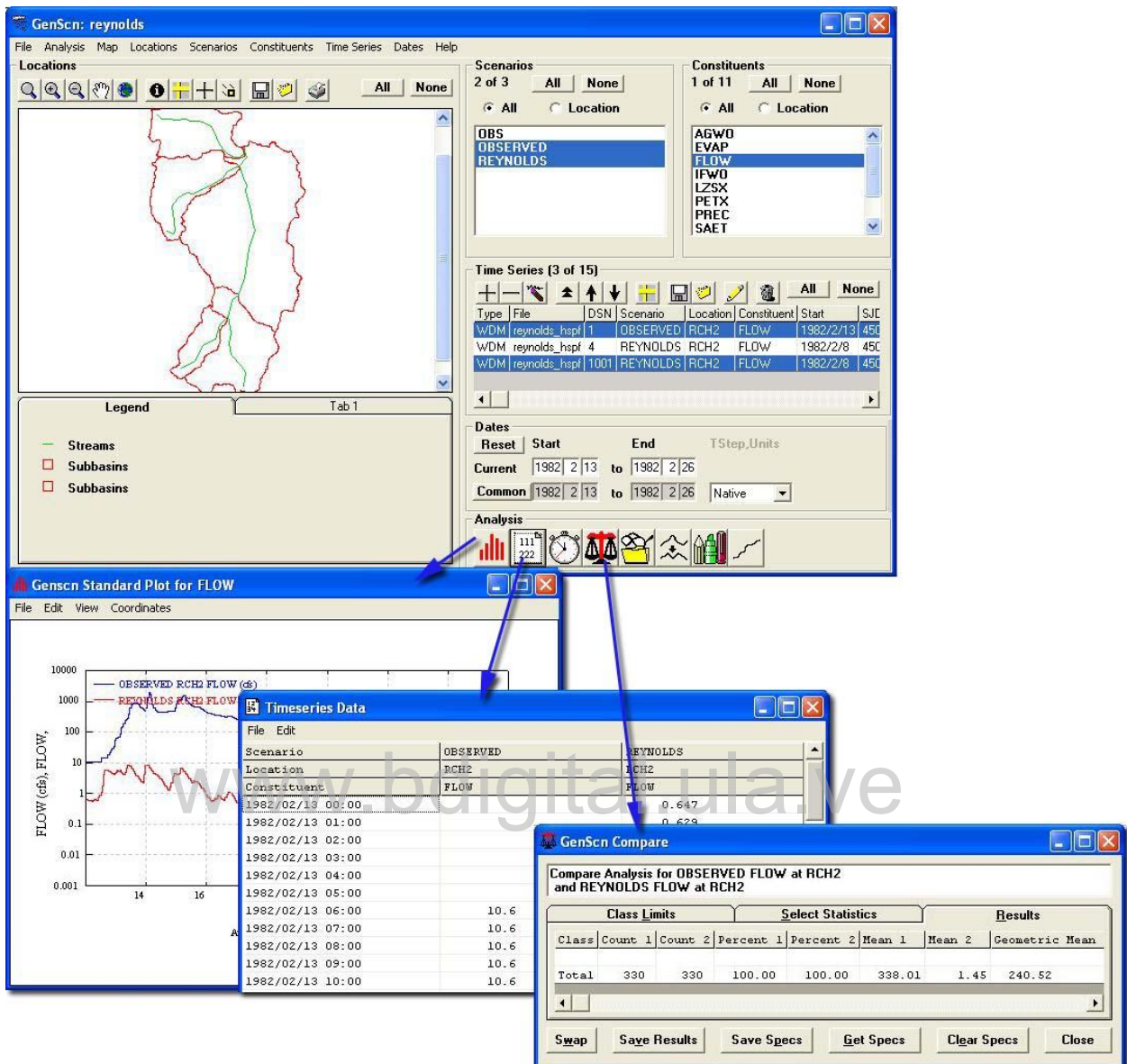


Figura 32. Corrida del Modelo WinHSPF y enlace con el programa GenScn

En la Figura 29 se observa una comparación entre los caudales observados y los generados por el modelo. Lo que salta a la vista es que existe una gran diferencia en la magnitud de los caudales, siendo los generados muy pequeños en comparación con los observados.



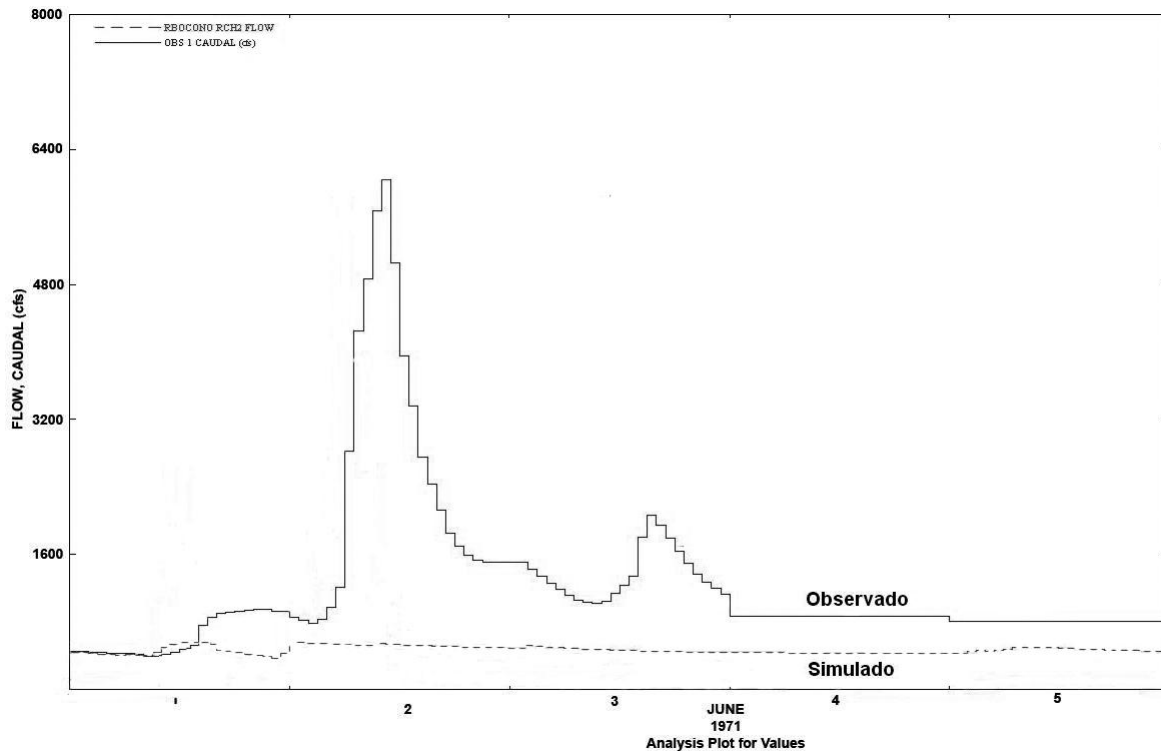


Figura 33. Salida del modelo WinHSPF para la cuenca del Río Boconó

- **Calibración**

Este modelo no cuenta con un módulo de autocalibración, por lo que se procedió a realizar la calibración manualmente por ensayo y error. Debido a que se tiene una gran cantidad de parámetros (17 en nuestro caso, solo en la parte de simulación hidráulica) este procedimiento dura varias horas. Al final se llegó al resultado presentado en la Figura 30.

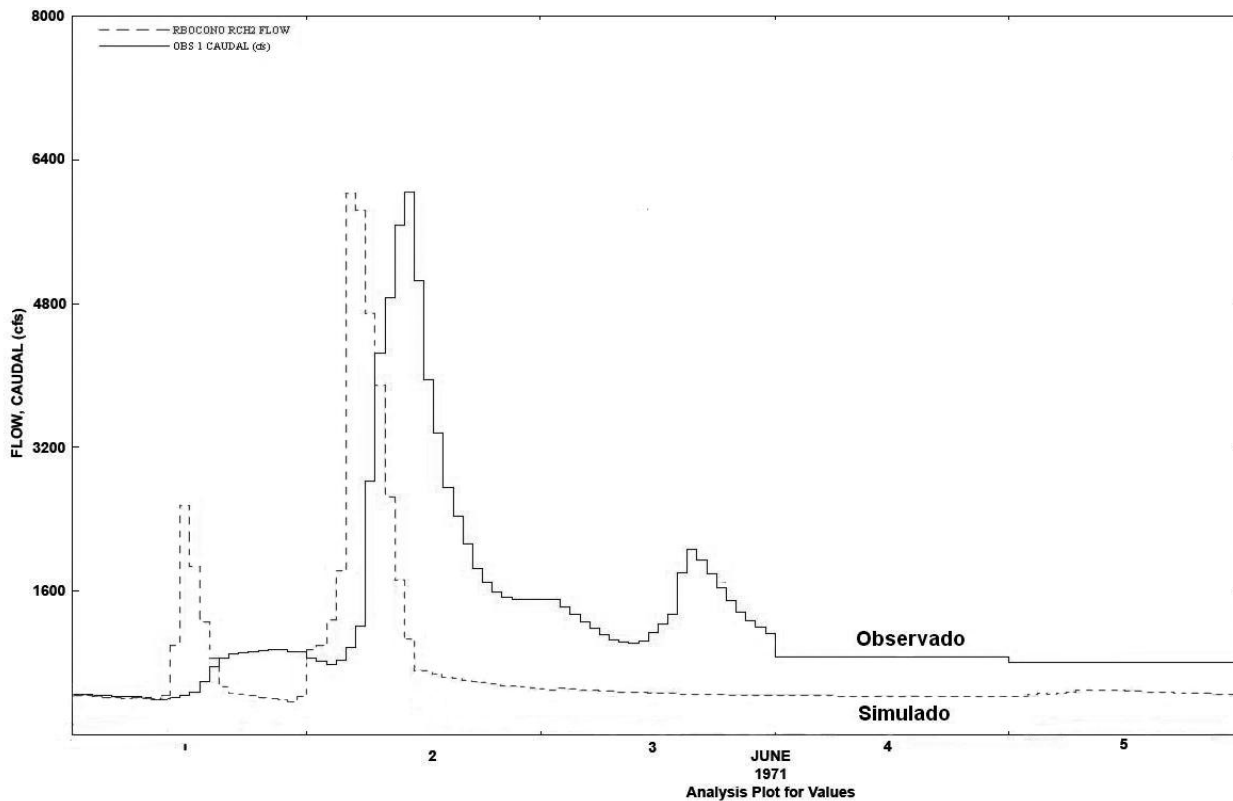


Figura 34. Salida del modelo WinHSPF para la cuenca del Río Boconó después de la calibración

### C.3 MODELACION CON EL MODELO EVENTO

El modelo EVENTO trabaja bajo entorno MS-DOS, y consta de dos ejecutables. El primero es el programa de introducción de datos (EVENDAT.EXE) y el segundo el modelo propiamente dicho (EVENTOC.EXE). En la Figura 35 Se presenta la pantalla de bienvenida del programa de introducción de datos.



Figura 35. Pantalla de bienvenida del modelo EVENTO

Lo primero que pide el programa es especificar el nombre del archivo de datos que se desea crear, y luego pide los datos de la cuenca.

- **Representación física de la cuenca**

La cuenca se divide en segmentos para ser modelada, en la Figura 32 Se presenta la esquematización de la cuenca y los datos de cada segmento se presentan en la Tabla 20

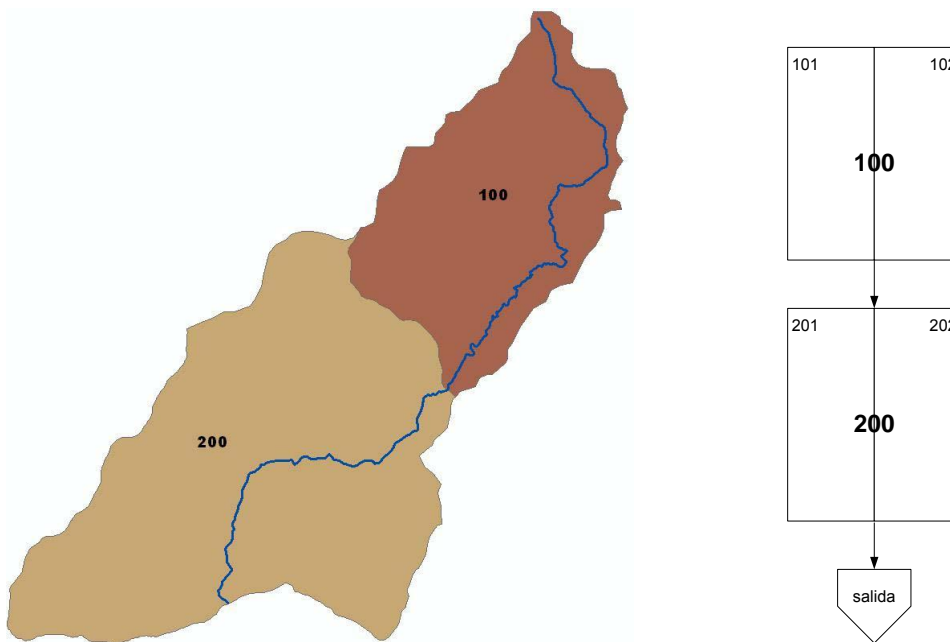


Figura 36. Esquematización de la cuenca del Río Boconó en el modelo EVENTO

Tabla 4. Datos de cada subcuenca de la cuenca del Río Boconó para el modelo EVENTO

<b>Subcuenca</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Área (km <sup>2</sup> )	173.32	327.58
<b>Vertiente 1– segmento tipo 1:</b>	<b>101</b>	<b>102</b>
Longitud (m)	5938	1744.14
Pendiente (m/m)	0.455	0.4
Rugosidad	0.35	0.35
Fac. ponderación	0.5	0.5
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Vertiente 2– segmento tipo 1:</b>	<b>201</b>	<b>202</b>
Longitud (m)	7627.69	2974.70
Pendiente (m/m)	0.458	0.377
Rugosidad	0.35	0.35
Fac. ponderación	0.5	0.5
NC	65	65
% impermeabilidad	0	0
<b>Canal– segmento tipo 2:</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
Longitud (m)	22561.71	30896.92
Pendiente (m/m)	0.0137	0.0192
Forma	Rectangular	Rectangular
Base (m)	15	15
Rugosidad	0.035	0.035

En la Figura 37 Se presentan las diferentes pantallas de la sección de introducción de datos geomorfológicos.

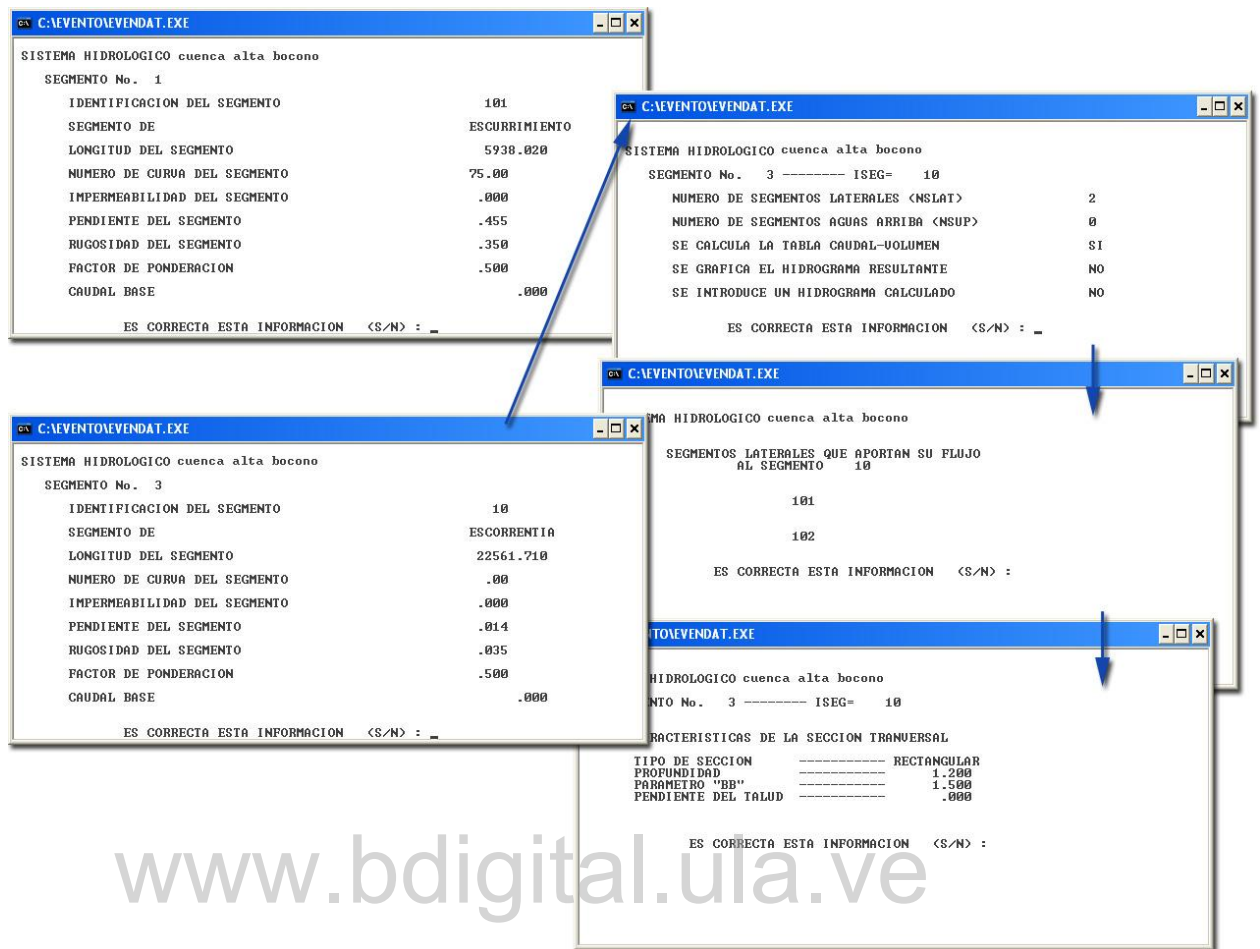


Figura 37. Pantallas de introducción de datos geomorfológicos en el modelo EVENTO

- **Información meteorológica**

Para introducir la precipitación se debe especificar el número de puntos de hietograma que se introducirá (máximo 48) y luego se introducen los pares de datos uno a uno, donde el tiempo está dado en minutos desde el inicio del evento y la precipitación en mm/h.

En la Figura 38 se muestra la pantalla de confirmación de datos de precipitación introducidos.

Precipitación (mm)	Velocidad (m/s)
3060.00	1.73
3120.00	5.21
3180.00	17.30
3240.00	4.30
3300.00	2.81
3360.00	3.76
3420.00	1.31
3480.00	1.94
3540.00	.35
3600.00	.12
3660.00	.47
3960.00	.00
4020.00	.23
4380.00	.00
4440.00	.23
4500.00	.37
4740.00	.00
4800.00	.82
4860.00	1.05
4920.00	.58
4980.00	.00
5040.00	.47

ES CORRECTA ESTA INFORMACION <S/N> : \_

Figura 38. Pantallas de confirmación de datos de precipitación en el modelo EVENTO

- *Corrida del modelo*

Para correr el modelo se debe ejecutar el archivo EVENTOC.EXE en el que pedirá el nombre del archivo con los datos de la cuenca que se desea modelar y un nombre para el archivo de salida. Durante la ejecución del modelo puede ser que el programa pida modificar algún parámetro según los criterios que presenta el programa en pantalla. Al finalizar simplemente se cierra el programa.

En la figura Figura 39 se presenta una pantalla de la corrida del modelo donde se pide modificar algunos parámetros.

```

C:\> EVENTOC.EXE
CE = .1446
ISEG= 111 DT= .42026 NDX= 30 NORH= 1025
SEGMENTO --- 112
SPP = 26.60834
PT1 = 3.84821
CE = .1446

ISEG= 112 DT= .29557 NDX= 30 NORH= 1456
SEGMENTO --- 11

IMPOSIBLE CUMPLIR CON 50 ORDENADAS EN EL HIDROGRAMA Y CON UN "NDX" MAYOR DE
5
LOS VALORES CARCTERISTICOS PARA EL SEGMENTO 11 SON:
DT = .21522 NDX = 4 NORH = 1998

HAY DOS POSIBILIDADES PARA RESOLVER EL PROBLEMA
1.- INCREMENTAR "DT" PARA DISMINUIR "NORH" O
2.- DISMINUIR LA PROFUNDIDAD PARA INCREMENTAR "NDX"
SELECCIONE LA OPCION DESEADA
DAR 1 PARA INCREMENTAR "DT"
DAR 2 PARA DISMINUIR LA VELOCIDAD "UMAX"
OPCION ---

```

Figura 39. Pantallas de corrida del modelo EVENTO

- *Primeros Resultados*

El modelo presenta los resultados en un archivo de texto sin formato, en el cual grafica el hidrograma final y los intermedios utilizando caracteres de texto ordenados de forma tal que cumplen esta función. En la Figura 40 se presenta un ejemplo de esta salida.

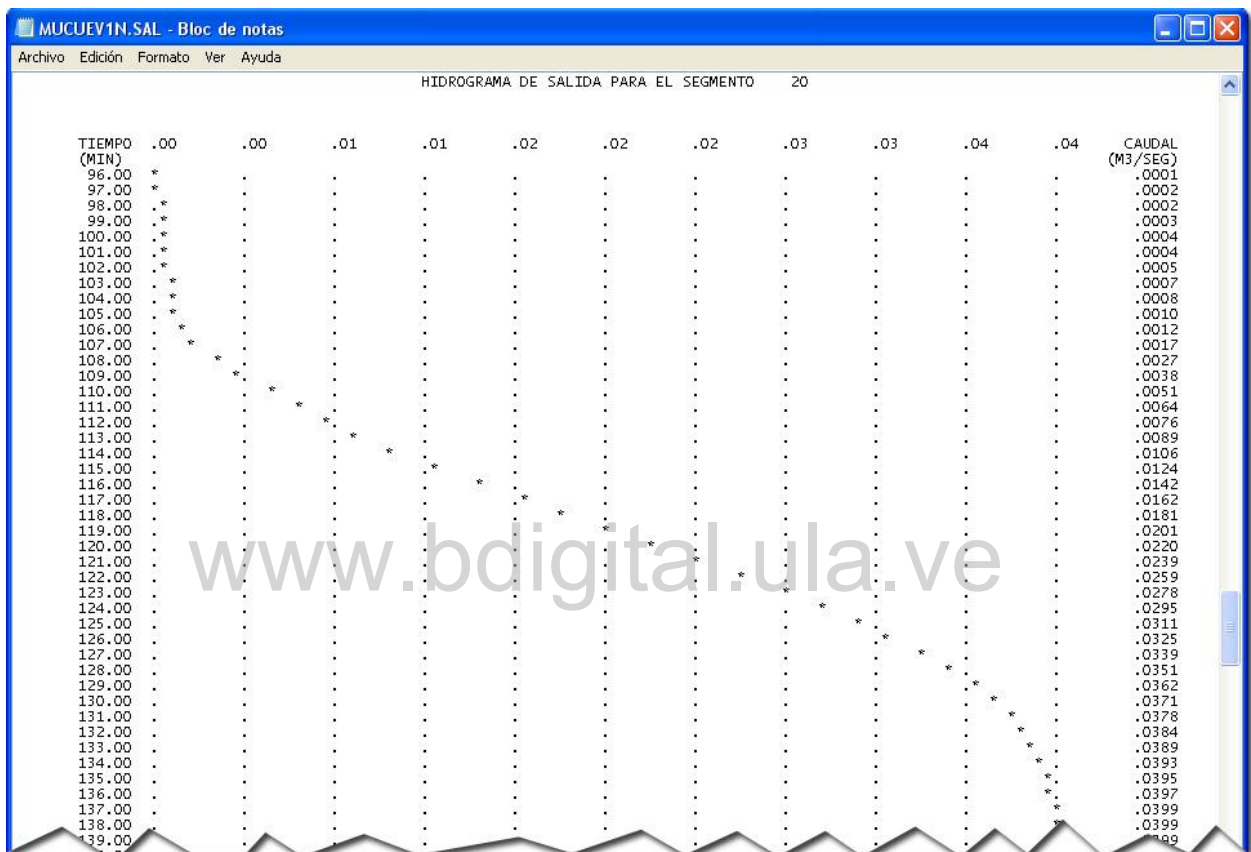


Figura 40. Archivo de salida del modelo EVENTO

El modelo EVENTO no permite introducir el hidrograma observado, por lo que no es posible compararlos directamente en la salida del programa. Es por esta razón que se llevaron los datos de la salida y el hidrograma observado a MS Excel. En la Figura 33 se presenta la salida de la primera corrida.



Figura 41. Salida de la primera corrida del modelo EVENTO para la cuenca del Río Boconó

- **Calibración**

La calibración del modelo EVENTO se debe realizar por ensayo y error, ya que no cuenta con una rutina de auto-calibración. Luego de llevar a cabo este proceso se llegó al resultado presentado en la Figura 34.

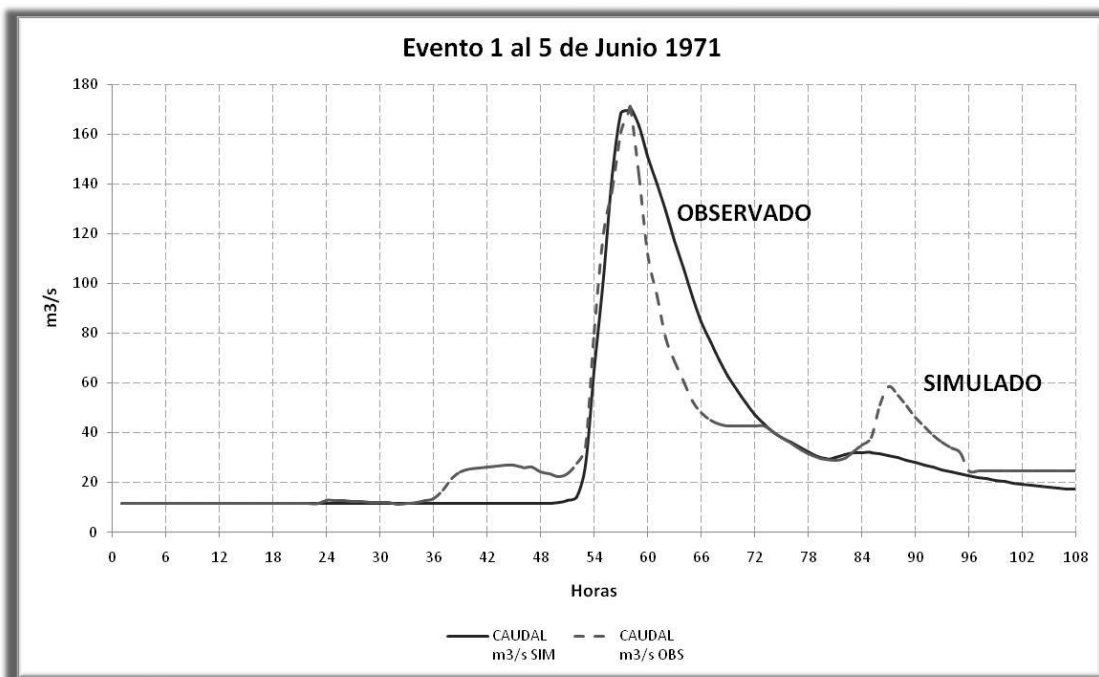


Figura 42. Resultado de la calibración del modelo EVENTO para el Río Boconó



# **ANEXO D**



**Ejemplo Archivos de Entrada**

**D1. Ejemplo de archivo de entrada para el modelo EVENTO**

cuenta alta BOCONO Evento 1

```

6 38 7140.000 60.000 0.001
1020.00 1080.00 1800.00 1860.00 1980.00 2040.00 2100.00 2160.00
2220.00 2280.00 2340.00 2400.00 2820.00 2880.00 2940.00 3000.00
3060.00 3120.00 3180.00 3240.00 3300.00 3360.00 3420.00 3480.00
3540.00 3600.00 3660.00 3960.00 4020.00 4380.00 4440.00 4500.00
4740.00 4800.00 4860.00 4920.00 4980.00 5040.00 5100.00
.00 .21 .00 .07 .00 3.32 5.89 7.83
.19 .00 .54 .12 .00 1.19 4.79 1.31
1.73 5.21 17.30 4.30 2.81 3.76 1.31 1.94
.35 .12 .47 .00 .23 .00 .23 .37
.00 .82 1.05 .58 .00 .47 .12
101 1 5938.020 65.00 .000 .455 .350 .500 .000
102 1 1744.140 65.00 .000 .400 .350 .500 .000
10 2 22561.710 .00 .000 .014 .035 .500 .000
2 0 1 0 0
101 102
1 2.000 15.000 .000
201 1 7627.690 65.00 .000 .458 .350 .500 .000
202 1 2974.700 65.00 .000 .377 .350 .500 .000
20 2 30896.920 .00 .000 .019 .035 .500 .000
2 1 1 1 0
201 202
10 0
1 2.200 15.000 .000

```

**D2. Ejemplo de archivos de entrada para el modelo HEC-HMS***Archivo Bocono.hms*

Project: Bocono + Q base

Description:

Version: 3.1.0

DSS File Name: Bocono+\_Q\_base.dss

End:

Precipitation: Met Evento 1-5 junio 1971

FileName: Met\_Evento\_1\_5\_junio\_1971.met

Description:

End:

Basin: Cuenca Rio Bocono

FileName: Cuenca\_Rio\_Bocono.basin

Description:

End:

Control: 1-5 junio 1971

FileName: 1\_5\_junio\_1971.control

Description:

End:

Control: 22-29 junio 1979

FileName: 22\_29\_junio\_1979.control

Description: evento cuenca alta rio bocono 22-29 juni 1971

End:

ProjectSettings:

Default Unit System: Metric

Default Canopy Method: None

Default Surface Method: None

Default Loss Method: Initial+Constant

Default Transform Method: Clark

Default Baseflow Method: None

Default Erosion Method: None

Default Route Method: Kinematic Wave

Default Precip Method: Specified Average

Default Evapotrans Method: Undefined Evapotranspiration

Default Snow Method: Undefined

End:

*Archivo 1\_5\_junio\_1971.control*

Control: 1-5 junio 1971  
Last Modified Date: 10 December 2007  
Last Modified Time: 22:42:43  
Start Date: 1 June 1971  
Start Time: 00:00  
End Date: 5 June 1971  
End Time: 23:00  
Time Interval: 60  
End:

*Archivo Bocono.basin*

Basin: Cuenca Rio Bocono  
Last Modified Date: 3 April 2008  
Last Modified Time: 04:18:37  
Version: 3.1.0  
Unit System: Metric  
Missing Flow To Zero: No  
Enable Flow Ratio: No  
Allow Blending: No  
Compute Local Flow At Junctions: No  
End:

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

Subbasin: 100  
Canvas X: 375209.3896093617  
Canvas Y: 1042488.6507921986  
Area: 173.32  
Downstream: 1000

Canopy 1: None

Canopy 2: None

Surface 1: None

Surface 2: None

LossRate 1: SCS  
Percent Impervious Area: 0.0  
Curve Number: 42.933

LossRate 2: SCS  
Percent Impervious Area: 0.0  
Curve Number: 76.674

Transform: Kinematic Wave

Plane: 1  
Length: 5938.02  
Slope: 0.455  
Mannings N: 0.23383  
Percent of Area: 77  
Number of Increments: 5

Plane: 2  
Length: 1744.14  
Slope: 0.4  
Mannings N: 0.22959  
Percent of Area: 23  
Number of Increments: 5

Channel: Main  
Length: 22561.71  
Slope: 0.0137  
Mannings N: 0.035  
Shape: Rectangle  
Width: 15  
Number of Increments: 5

Baseflow: None

Erosion: None  
End:

Subbasin: 200

.  
. .  
. .  
. .

End:

www.bdigital.ula.ve

### D3. Ejemplo de archivos de entrada para el modelo HEC-HMS

Los Archivos de entrada de este modelo se guardan en formato Binario, por lo que aquí se presentan algunos datos obtenidos con el programa.

Source ID	Source Description	Target ID	Target Description	Area (Acres)
PERLND 101	Plantaciones y Agric	RCHRES 1		0 32
PERLND 102	Bosque	RCHRES 1		0 35406
PERLND 103	Horticultura de piso	RCHRES 1		0 7391
PERLND 201	Plantaciones y Agric	RCHRES 2		0 14866
PERLND 204	Areas y Usos Urbano	RCHRES 2		0 410
PERLND 202	Bosque	RCHRES 2		0 18941
PERLND 205	Páramo	RCHRES 2		0 3276
PERLND 203	Horticultura de piso	RCHRES 2		0 43454

Reach ID	Description	Length (mi)	Delta H (ft)	DownstreamID	N Exits	Lake Flag
1		0	19.15	5720	2	1 0
2		0	14.02	1499	0	1 0

#### PWAT-PARM1

OpNum	Description	CSNOFG	RTOPFG	UZFG	VCSFG	VUZFG	VNNFG	VIFWFG	VIRCFG
101	Plantaciones y Agric	0	1	1	1	0	0	0	0
102	Bosque	0	1	1	1	0	0	0	0
103	Horticultura de piso	0	1	1	1	0	0	0	0
201	Plantaciones y Agric	0	1	1	1	0	0	0	0
202	Bosque	0	1	1	1	0	0	0	0
203	Horticultura de piso	0	1	1	1	0	0	0	0
204	Areas y Usos Urbano	0	1	1	1	0	0	0	0
205	Páramo	0	1	1	1	0	0	0	0
		VLEFG	IFFCFG	HWTFG	IRRGFG	IFRDFG			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			
		1	1	0	0	0			

#### PWAT-PARM2

OpNum	Description	FOREST	LZSN	INFILT	LSUR	SLSUR	KVARY	AGWRC
101	Plantaciones y Agric	1	5	0.5	150	0.310491	0	0.98
102	Bosque	1	5	0.5	150	0.310491	0	0.98
103	Horticultura de piso	1	5	0.5	150	0.310491	0	0.98
201	Plantaciones y Agric	1	5	0.5	150	0.370286	0	0.98
202	Bosque	1	5	0.5	150	0.370286	0	0.98
203	Horticultura de piso	1	5	0.5	150	0.370286	0	0.98
204	Areas y Usos Urbano	1	5	0.5	150	0.370286	0	0.98
205	Páramo	1	5	0.5	150	0.370286	0	0.98

## PWAT-PARM3

OpNum	Description	PETMAX	PETMIN	INFEXP	INFILD	DEEPFR	BASETP	AGWETP
101	Plantaciones y Agric	40	35	2	2	0	0.02	0
102	Bosque	40	35	2	2	0	0.02	0
103	Horticultura de piso	40	35	2	2	0	0.02	0
201	Plantaciones y Agric	40	35	2	2	0	0.02	0
202	Bosque	40	35	2	2	0	0.02	0
203	Horticultura de piso	40	35	2	2	0	0.02	0
204	Areas y Usos Urbano	40	35	2	2	0	0.02	0
205	Páramo	40	35	2	2	0	0.02	0

## PWAT-PARM4

OpNum	Description	CEPSC	UZSN	NSUR	INTFW	IRC	LZETP
101	Plantaciones y Agric	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
102	Bosque	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
103	Horticultura de piso	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
201	Plantaciones y Agric	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
202	Bosque	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
203	Horticultura de piso	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
204	Areas y Usos Urbano	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1
205	Páramo	0.1	0.08	0.2	10	0.84	0.1

## HYDR-PARM1

OpNum	Description	VCONFIG	AUX1FG	AUX2FG	AUX3FG	ODFVF1	ODFVF2	ODFVF3
1	0	0	1	1	1	4	0	0
2	0	0	1	1	1	4	0	0
		ODFVF4	ODFVF5	ODGTF1	ODGTF2	ODGTF3	ODGTF4	ODGTF5
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
		FUNCT1	FUNCT2	FUNCT3	FUNCT4	FUNCT5		
		1	1	1	1	1		
		1	1	1	1	1		

## HYDR-PARM2

OpNum	Description	FTBW	FTBUCI	LEN	DELTH	STCOR	KS	DB50
1	0	0	1	19.15	5720	3.2	0.5	0.01
2	0	0	2	14.02	1499	3.2	0.5	0.01