



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN UNA CUENCA USANDO UN
MODELO HIDROLÓGICO DE PARÁMETROS DISTRBUIDOS Y UN MODELO
HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL EN VOLUMENES FINITOS CON UN MÓDULO
HIDROLÓGICO.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JORGE IVÁN JUÁREZ DEHESA

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D. F., JUNIO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gracia Sánchez Jesús

Secretario: Dr. Escalante Sandoval Carlos Agustín

Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

1^{er.} Suplente: Dr. Domínguez Mora Ramón

2^{do.} Suplente: Dra. Reyes Chávez Lilia

Posgrado de la Facultad de Ingeniería, México, Distrito Federal

TUTOR DE TESIS:

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

FIRMA

Dedicatorias

Este trabajo es la culminación de una etapa relevante de mi vida, y se lo dedico a:

Mi madre por su entrega, gran parte de quien soy es por ella

Mis abuelos Alicia y Pedro, por su amor y cuidados

Mis hermanas Yurel y Larisa, por motivarme

Edith Bonilla, gracias por llegar a mi vida

México, D.F., Junio de 2014

Agradecimientos

Expreso mi mayor gratitud a la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez y al Dr. Ramón Domínguez Mora, por la confianza brindada, el tiempo y la dedicación para concluir este trabajo.

Al Dr. José Luis Aragón Hernández, le expresó un especial agradecimiento por todo el tiempo y ayuda que me brindo para poder llevar a cabo este trabajo, sin su apoyo no se hubiera alcanzado esta meta.

Al Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval y a la Dra. Lilia Reyes Chávez, por todas las enseñanzas dentro y fuera del salón de clases, por la dedicación que pusieron para que fuera mejor cada día, a ambos muchas gracias.

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez por los consejos y pláticas que sostuvimos dentro y fuera del aula, en las cuales me dejó muchas enseñanzas.

A mi segunda familia, Sixta Mendoza, Luis Dávila y Pedro Nuñez, GRACIAS MUCHAS GRACIAS, por todo lo que vivimos en esta aventura llamada maestría, muchas gracias por las risas, por las pláticas, por los buenos y malos momentos que vivimos, ustedes siempre serán una parte importante de mi vida.

A Edith Bonilla, gracias por llegar a mi vida, por enseñarme y darme tantas cosas en este tiempo, vamos por un segundo que juntos...

Al CONACYT por la beca que me otorgó en el periodo de mis estudios de maestría.

México, D.F., Junio de 2014

Índice

Introducción.....	I
Planteamiento del Problema.....	II
Hipótesis.....	III
Objetivos	III
1 Conceptos de Hidrología	1
1.1 Cuenca hidrológica	1
1.2 Precipitación.....	1
1.3 Esguerrimiento	2
1.4 Hidrograma	2
1.5 Pérdidas.....	5
1.6 Infiltración	6
1.7 Procesamiento del terreno con un SIG.....	7
2 Antecedentes	11
2.1 Modelos hidrológicos	12
2.1.1 Clasificación de los modelos hidrológicos.....	12
2.1.2 Modelos concentrados frente a modelos distribuidos	15
2.2 Modelos hidráulicos	17
2.2.1 Ecuaciones fundamentales de la hidráulica que utilizan los modelos hidráulicos	19
2.3 Nuevos métodos de obtención de parámetros	20
2.4 Modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en los últimos años.	24
2.4.1 Modelo MIKE SHE	24
2.4.2 Modelo SAC-SMA	25
2.4.3 Modelo DBSIM.....	26
2.4.4 Modelo TOPMODEL.....	26
2.4.5 Modelo MIKE 11	27
2.4.6 Modelo TETIS.....	27
3 Metodología.....	28
3.1 Modelo MPE	28
3.1.1 Modelación y Datos de Entrada en MPE.....	29

3.1.2	Métodos empleados en el Modelo Pronóstico de Escurrimiento (MPE)	29
3.1.3	Modelo de producción del escurrimiento. método de número de curva.	31
3.1.4	Pérdidas por evapotranspiración (Factor de olvido).....	32
3.1.5	Modelo de transferencia de escurrimiento método de Clark modificado	33
3.1.6	Calibración	36
3.2	Modelo Iber.....	36
3.2.1	Módulo hidrodinámico.....	37
3.2.2	Fricción de Fondo	37
3.2.3	Infiltración en Iber	37
4	Medio Físico	41
4.1	Ubicación del sitio en estudio.....	41
4.2	Hidrología de la cuenca del Grijalva	42
4.3	Localización de la cuenca Peñitas	42
4.4	Edafología y cobertura vegetal	43
4.5	Infraestructura hidráulica de la cuenca Peñitas	45
4.6	Selección de las tormentas de Análisis	46
5	Aplicación	48
5.1	Aplicación del modelo MPE	48
5.1.1	Información inicial	48
5.1.2	Precipitación	50
5.1.3	Escurrimiento	52
5.2	Aplicación del Modelo Iber.....	57
5.2.1	Creación de la geometría en la interfaz de Iber.....	58
5.2.2	Asignación de parámetros y atributos	63
5.2.3	Asignación de la lluvia.....	66
5.2.4	Asignación de pérdidas.....	68
5.2.5	Generación de la malla de cálculo	70
5.2.6	Cálculo en Iber	71
6	Análisis de resultados.....	72
6.1	Resultados del MPE	72
6.2	Resultados de Iber	73
6.2.1	Resultados de Iber primer etapa	73

6.2.2	Resultados Iber segunda etapa.....	76
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	86
7.1	Conclusiones del estudio.....	86
7.2	Recomendaciones	87
7.2.1	Recomendaciones para los usuarios.....	87
7.2.2	Recomendaciones para los desarrolladores	89
7.3	Líneas de investigación futuras	89
8	Bibliografía	91

Introducción

En este apartado se da un previo de las razones por las que se realizó el presente trabajo y se exponen las hipótesis y los objetivos que se tienen.

La gestión de los recursos hídricos es uno de los principales retos con los que se enfrenta la ingeniería en la actualidad, su manejo y el diseño de grandes obras de infraestructura, van de la mano con el crecimiento de las necesidades que demanda la población, por lo que es necesario mirar este gran reto de una manera integral, para dar soluciones oportunas y factibles.

La generación de nuevos métodos, teorías y el desarrollo en sistemas informáticos (que engloban recopilación de información más confiable, *hardware* y *software*) son parte de la respuesta a las necesidades de hoy día. Como parte de esa respuesta es necesario hacer la validación de las nuevas herramientas con las que se cuentan para garantizar que los resultados obtenidos son confiables.

El presente trabajo se propuso hacer la adecuación y posible validación como modelo lluvia escurrimiento del modelo hidráulico Iber, el cual fue desarrollado por el Instituto FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) de Barcelona, España y que es un modelo de flujo bidimensional basado en volúmenes finitos que tiene implementado un módulo hidrológico.

Para la validación se hizo una comparación con el Modelo de Producción de Escurrimiento (MPE), desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM que es un modelo de parámetros distribuidos que ha sido previamente calibrado con varias cuencas de México, además fue implementado en el estudio “Comparación entre métodos para estimar avenidas de diseño empleando datos hidrométricos y climatológicos”, que utilizó como sitio de estudio la cuenca propia del proyecto Chicoasén II (Palacios,2013) , y se ha demostrado que reproduce las avenidas medidas con buenos resultados.

El sitio de estudio es la cuenca propia de la presa Peñitas, la información utilizada fue obtenida de organismos oficiales; el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) proporcionó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), la información de edafología, el uso de suelo, el tipo de suelo y la permeabilidad.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE); aportaron los registros históricos de sus redes de estaciones climatológicas e hidrológicas.

A la información obtenida se le aplicó un análisis de cantidad y calidad de la información, con el fin de garantizar que los datos ingresados a los *softwares* sean lo más confiables y representativos,

asimismo se tuvo particular interés en que los datos de precipitación correspondieran a eventos extremos.

Se realizaron diversas simulaciones planteando diferentes condiciones hidrológicas y matemáticas capaces de ser representadas por ambos modelos, con el fin de analizar las diferencias entre los resultados y posteriormente dar las recomendaciones y consideraciones que se deben de tomar para la utilización de los modelos, en especial en el modelo Iber.

Planteamiento del Problema

La estimación de avenidas de diseño en cuencas hidrológicas es un problema fundamental de la hidrología superficial; cuando se cuenta con datos de precipitación y los de escurrimiento son escasos, se recomienda utilizar modelos lluvia-escurrimiento para la estimación de dichas avenidas. Con la evolución de las herramientas de cómputo se ha desencadenado una mayor aplicación de los modelos de parámetros distribuidos. Por otra parte se han comenzado a analizar los modelos hidráulicos de flujo bidimensional como una herramienta potencialmente útil para la estimación del escurrimiento considerando eventos de precipitación. En el caso del modelo IBER y en fechas recientes, el personal del Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña explora su aplicación como modelo lluvia-escurrimiento distribuido y por ello es de interés aplicarlo en cuencas de distintas partes del mundo.

El objetivo principal de la tesis es verificar la adecuación y confiabilidad de un modelo distribuido de transformación lluvia-escurrimiento basado en las ecuaciones dinámicas y el método de los volúmenes finitos, en este caso utilizando el programa IBER como herramienta, mediante la comparación con el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE) desarrollado en el Instituto de Ingeniería; dicho modelo ya ha sido calibrado y se ha aplicado en algunas cuencas del país, a petición de un organismo tan importante como es la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En caso de que dicha verificación se compruebe, se considerará una aportación valiosa de la hidráulica en el campo de la hidrología superficial, además ayudaría al Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña a tener un resultado positivo hacia la difusión de este modelo ya no sólo como modelo de simulación numérica en ríos y planicies de inundación, sino como un modelo hidráulico-hidrológico. En el caso de México se lograría una trascendencia para el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE) y para difundir la aplicación de modelos de diseño europeo que puedan utilizarse con confianza en problemas de índole Nacional.

Hipótesis

Es posible aplicar un modelo hidráulico de flujo bidimensional con un módulo hidrológico que considerando una lámina de precipitación para estimar hidrogramas de salida de una cuenca.

Objetivos

Verificar la adecuación y confiabilidad de un modelo hidráulico de flujo bidimensional basado en las ecuaciones de Saint Venant y el método de los volúmenes finitos que cuenta con un módulo hidrológico para la transformación de lluvia en escurrimiento, en este caso el modelo IBER, mediante la comparación con el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE) que es un modelo distribuido de lluvia-escurrimiento que ya ha sido validado y calibrado en algunas cuencas del país.

En caso de verificar su aplicabilidad en la cuenca analizada, se pretende seleccionar una nueva cuenca o un nuevo evento de tormenta para continuar con esta validación.

1 Conceptos de Hidrología

Se abordaran conceptos básicos de hidrología, que se utilizaran durante el desarrollo del presente trabajo.

1.1 Cuenca hidrológica

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio la cual está limitada por el parteaguas, que es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica y la separa de otras cuencas. (Escalante y Reyes, 2008)

Dependiendo del tipo de salida de los escurrimientos, existen dos tipos de cuencas(CENAPRED,2006):

- Exorreicas: El punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está corriente o en el mar.
- Endorreicas: La cuenca no tiene salida, y por lo general es un lago.

1.2 Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 2011).

Las gotas de lluvia constituyen el estímulo al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. El origen de la precipitación requiere que una parte de la atmosfera se enfríe hasta que el aire se sature con el vapor de agua, originándose la condensación. El enfriamiento de la atmósfera se logra por la elevación del aire. De acuerdo con la condición que provoca dicha elevación la precipitación puede ser por convección, orográfica y ciclónica (Springall, 1970).

Orográfica.-Una corriente de aire puede ser forzada a ascender cuando encuentra en su camino una elevada forma del terreno, ya sea una sola montaña o una cordillera. Al elevarse el flujo se enfría y condensa dando lugar al nacimiento de nubes principalmente cúmulos o altocúmulos. Una vez que se ha iniciado el movimiento de ascenso se acelera dando lugar a la formación de cúmulonimbos o nubes de tormenta (Escalante, 2013).

Convectiva.- El aire puede elevarse por sí mismo al calentarse dando lugar a las corrientes de convección. Este proceso es muy común en verano, pues el aire cercano al suelo se calienta

rápidamente a causa del calor desprendido por la tierra y el irradiado por el sol, por lo que se vuelve más liviano al que lo rodea y asciende dando lugar a cúmulos. Cuando estas corrientes son fuertes generan nubes de tormenta (Escalante, 2013).

Ciclónica.- Una corriente puede elevarse cuando dos masas de diferentes tipos de aire (caliente-frio) se encuentran formando lo que se dice un “frente” que es el límite que separa una región de aire caliente de uno frío. Si esas dos masas se mueven a distintas velocidades la más cálida se desliza sobre el frente ascendiendo a niveles superiores. A medida que el aire se eleva se forman diferentes tipos de nubes, siendo más espesas cerca de la superficie generando precipitaciones en la parte baja (Escalante, 2013).

1.3 Escurrimiento

Durante la precipitación existen diversos factores que atenúan el proceso de lluvia- escurrimiento, parte del agua de lluvia al caer es interceptada por casas, edificios y vegetación. Este proceso ocasiona que solo un porcentaje de la lluvia escurra y otro se infiltre en el terreno. En general la respuesta de la cuenca ante los diferentes fenómenos, depende de las características propias de la misma como son: su tipo y uso de suelo, vegetación existente, arreglo de corrientes naturales, longitud de sus cauces y topografía, la interacción de los factores antes mencionados ocasiona la disminución o el aumento del escurrimiento superficial.

Cuando la lluvia, es de tal magnitud que sobrepasa la capacidad de infiltración o retención del terreno y la vegetación, el excedente produce un escurrimiento sobre la superficie del terreno, que se mueve por efecto de la gravedad hacia las partes de la cuenca, llenando depresiones hasta adquirir las condiciones que le permitan fluir sobre el terreno hacia los cauces (Domínguez et al, 2009).

Aparicio Define el escurrimiento como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente, o la que fluye de los cauces de los ríos (Aparicio, 2011)

1.4 Hidrograma

La medición del gasto que escurre por una sección determinada durante un periodo de tiempo definido proporciona un hidrograma,(Chow et al, 1994) definieron al hidrograma como la expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca.

Independientemente de la forma que el hidrograma adopte, es posible identificar elementos comunes entre dos hidrogramas que han sido generados por diferentes tormentas y fisiografía, de acuerdo con (Aparicio, 2011), los principales elementos de un hidrograma son (Figura 2.1):

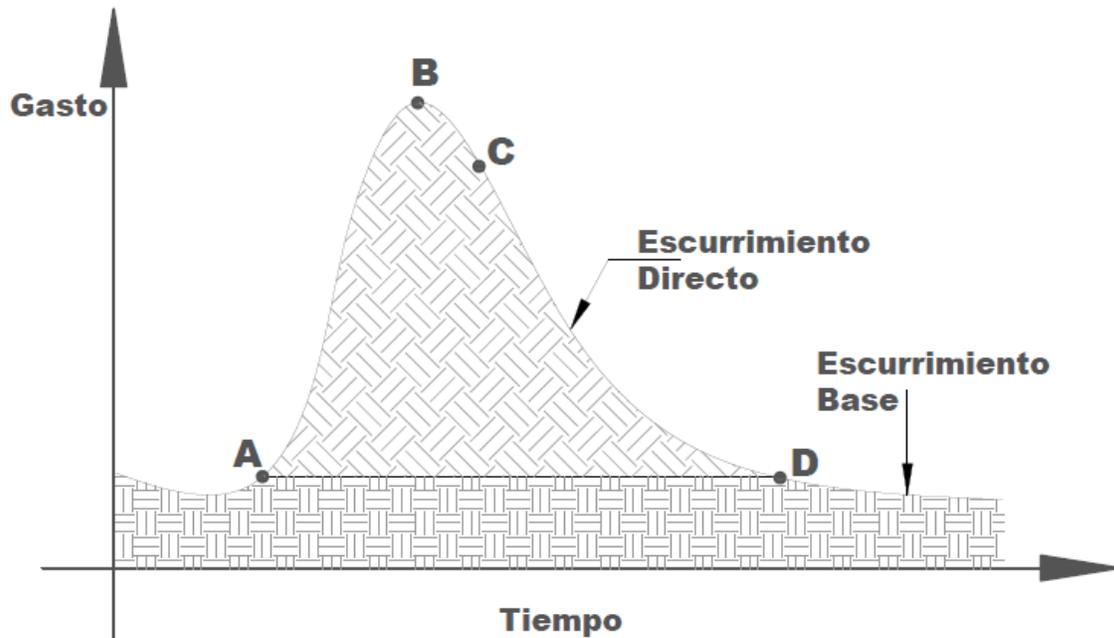


Figura 1.1 Hidrograma Aislado.

(A): Punto de Levantamiento. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, se presenta durante o incluso algún tiempo después que cesó de llover.

(B): Pico. Es el punto más alto producido por la tormenta. El más importante en un hidrograma para fines de diseño.

(C): Punto de inflexión. Este punto se presenta cuando termina el flujo sobre el terreno de aquí en adelante el escurrimiento ocurre por canales y subterráneo.

(D): Fin del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento solo es de origen subterráneo, normalmente se considera como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión.

T_p : Tiempo de pico. Es el tiempo que transcurre desde el tiempo de levantamiento hasta el pico del hidrograma.

T_b : Tiempo base: Tiempo que dura el escurrimiento directo desde el punto base hasta el final del escurrimiento directo. El tiempo base puede abarcar desde unos minutos hasta varias horas.

El objetivo principal del estudio de un hidrograma es determinar los gastos que corresponden a escurrimiento directo y al escurrimiento base. Estrictamente esta separación depende del comportamiento del escurrimiento subterráneo, el cual es prácticamente imposible de conocer, lo anterior ha dado lugar a que existan varios métodos de separación, todos ellos aproximados. La selección depende de consideraciones subjetivas y de la experiencia de quien realiza el análisis (Domínguez et al, 2009), a continuación se presentan dos metodologías para la obtención del escurrimiento directo.

Método 1: Se dibuja una recta horizontal que parte del punto de inflexión que muestra el escurrimiento directo (punto A de la Figura 2.1) hasta que corte con la curva de recesión del hidrograma (punto D de la Figura 2.1) (Fuentes y Franco, 1999) .

Método 2: Se dibuja una línea horizontal a partir del inicio del escurrimiento directo (Punto A de la Figura 2.2); hasta la proyección que corresponde al gasto máximo y se designa como el punto B´.

Se calcula el tiempo de vaciado del escurrimiento directo como:

$$M = 0.827A^{0.2} \quad (1.1)$$

Donde:

M.-Tiempo de vaciado del escurrimiento directo, días

A.-Área de la cuenca, km²

A partir de C´ se toma la distancia horizontal igual a la magnitud obtenida de M y se levanta una línea vertical que corta el hidrograma, este punto será el punto E, finalmente la línea A-C´ E delimita el escurrimiento directo del escurrimiento base.

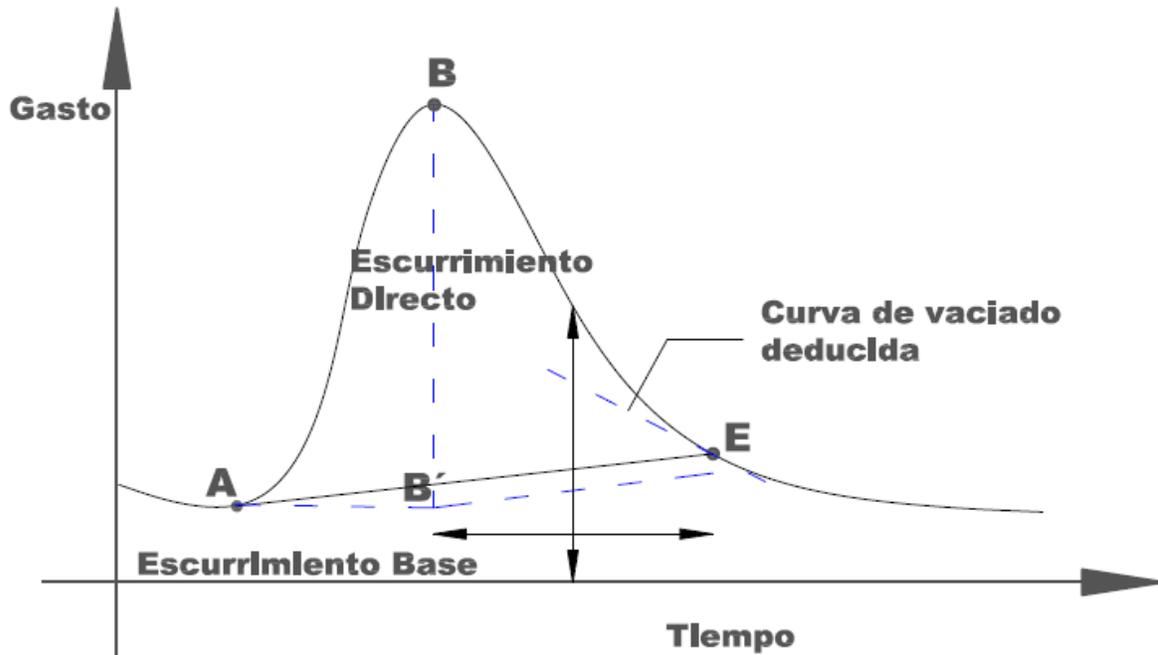


Figura 1.2 Separación del escurrimiento base y directo, usando la curva de vaciado.

El área bajo el hidrograma, $\int_{t_0}^t Q dt$, es el volumen total escurrido el área bajo el hidrograma y arriba de la línea de separación entre gasto base y directo $\int_{t_0}^t (Q - Q_b) dt$, es el volumen de escurrimiento directo (Aparicio, 2011).

1.5 Pérdidas.

La intercepción, retención, evaporación e infiltración, constituyen lo que se conoce como pérdidas y representan el diferencial del volumen de agua que llueve en la cuenca y el que escurre por su salida.

Al conjunto de los mecanismos conocidos como intercepción, la retención e infiltración, son procesos difíciles de estimar por separado; se acostumbra calcularse en conjunto y se denomina como infiltración, convirtiéndose en la componente más importante de las pérdidas.

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio, 2011), en ocasiones su volumen supera al del escurrimiento sobre todo en cuencas cuya urbanización es escasa. La velocidad de infiltración es decreciente con el tiempo debido a la saturación que el suelo va adquiriendo, al inicio del fenómeno se presenta una velocidad muy alta que posteriormente tiende a valores constantes.

Cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvia y escurrimiento; la determinación de las pérdidas se hace a partir de su definición, lo cual puede quedar expresado con la ecuación 1.2:

$$V_p = V_{LL} - V_{ED} \quad (1.2)$$

Donde:

V_p .-Volumen de pérdidas

V_{LL} .-Volumen llovido

V_{ED} .-Volumen de escurrimiento directo

1.6 Infiltración

La medición de la infiltración puede ser realizada mediante distintos métodos entre los que destacan: La capacidad de infiltración media, coeficiente de escurrimiento y número de curva. Los procedimientos antes mencionados no consideran las variaciones en las características de la cuenca, sino que les asigna un valor único.

El criterio de la capacidad de infiltración media, hace la suposición que el suelo tiene una capacidad de infiltración constante durante toda la precipitación, de tal manera que, siempre que llueva con una intensidad menor que dicha capacidad, se infiltra todo lo que llueve, y cuando llueve con una intensidad mayor que la capacidad de infiltración, la diferencia escurre.

Para calcular la capacidad de infiltración correspondiente a una tormenta dada, se utiliza el siguiente procedimiento:

- 1.-Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.
- 2.-Se calcula la lámina de lluvia en exceso; como el cociente entre el volumen de escurrimiento directo y el área de la cuenca.
- 3.-Se supone un valor del índice de infiltración denominado (ϕ) constante en el hidrograma de la tormenta y se determina la lamina de lluvia en exceso con dicho hietograma. Si esta altura es igual a la calculada en el paso 2, el valor de (ϕ) es el correcto, si no se cumple, se propone otro y se repite el cálculo.

Este procedimiento es de tipo iterativo.

El criterio del coeficiente de escurrimiento supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la precipitación, de tal manera que el volumen escurrido (V_{ED}), es igual al producto del volumen llovido (V_{LL}), por un coeficiente (C_E) llamado coeficiente de escurrimiento. Por tanto éste se determina con:

$$C_E = \frac{V_{ED}}{V_{LL}} \quad (1.3)$$

El criterio del número de curva establece una relación entre la precipitación total y la altura de lluvia en exceso de la siguiente manera:

$$p_e = \frac{\left(p - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{p + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (1.4)$$

Donde

CN .-Número de Curva.

p .-Precipitación total, cm

p_e .-Precipitación efectiva, cm

Es importante recordar que la capacidad de infiltración media (ϕ), el coeficiente de escurrimiento (C_E) y el número de curva (CN); son indicadores que no son invariantes en una cuenca.

1.7 Procesamiento del terreno con un SIG.

Tradicionalmente, la determinación de diversos parámetros geomorfológicos se hacía manualmente a partir de cartas topográficas impresas; actualmente esa determinación se está realizando con sistemas informáticos en donde las operaciones que antes se hacían con planímetro y curvímetro ahora se hacen con funciones de los SIG, que miden áreas o longitudes, haciendo que el proyectista utilice ahora herramientas informáticas en lugar de herramientas físicas pero dejando el proceso en un estatus prácticamente manual. Para hacer más rápido el proceso y menos dependiente del criterio del usuario, es necesario utilizar una forma semiautomatizada o automatizada para realizar el mismo trabajo.

Esta forma se puede basar en el proceso de modelos digitales de elevación. Un modelo digital de elevación (MDE) es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la elevación del terreno en una región geográfica determinada. Básicamente es una malla de

celdas cuadradas; a cada celda se le asigna una elevación representativa del área que es cubierta por la celda. Estas mallas también son conocidas como *rasters* y suelen presentarse en archivos de diferente formato. Los MDE junto con otras estructuras de datos vectoriales de puntos, líneas y polígonos, se pueden utilizar para resolver problemas de recursos hidráulicos. Dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) suelen utilizarse representaciones de la realidad, llamadas modelos de datos, que están orientados a resolver un tipo particular de problemas.

Un modelo que se ha vuelto estándar en la solución de problemas de recursos hidráulicos es el *ArcHydro Data Model* o simplemente *ArcHydro*, es conceptualmente, una combinación de objetos geográficos (como líneas que representan corrientes o polígonos que representan subcuencas) enriquecida con una base de datos que permite definir relaciones entre objetos, topologías (propiedades del medio geográfico que permanecen invariantes ante ciertas transformaciones, como doblar o estirar) y redes geométricas.

Los procedimientos que se explican adelante fueron implementados en las herramientas *ArcHydro*, un juego de herramientas informáticas asociadas al modelo ArcGIS (ESRI, 2007) y son sólo una muestra de lo que se puede hacer a partir de los MDE.

Los MDE se pueden obtener en medios de almacenamiento ópticos o mediante la descarga de archivos en sitios web especializados. Los MDE deben tener un tamaño de celda adecuado, si la celda es demasiado grande, los resultados podrían resultar inútiles, pues no darían una resolución adecuada. En el caso del territorio mexicano los MDE pueden obtenerse en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, los *rasters* del INEGI tienen un tamaño de celda de 15 x 15 m.

Una vez adquirido el MDE de la cuenca por procesar debe ser alimentado en una aplicación informática que sirva para manipularlo, como el programa ArcMap del paquete ArcGIS Desktop de la casa ESRI. La primera parte del proceso es hacer la proyección de los datos. Originalmente, los MDE están en coordenadas geográficas; esto es, en grados, minutos y segundos, y debe ser proyectados a un plano para que cada punto tenga coordenadas lineales en metros.

Antes de procesar el MDE original se deben hacer análisis topográficos para asegurar que las elevaciones extraídas sean correctas. Dos procesos que usualmente se aplican en al MDE original, después de los análisis topográficos, son el reacondicionamiento del terreno y la construcción de muros. El primer proceso modifica el MDE imponiéndole características lineales contenidas en una clase de elementos formada por el sistema de corrientes que drena la región analizada. Una clase de elementos, conocida en inglés como **Featureclass**, es un conjunto de datos geográficos representados en un solo sistema de coordenadas, con estructuras geométricas del mismo tipo (como puntos, líneas o polígonos) y almacenados en una base de datos. La idea es que el MDE debe tener elevaciones que reflejan claramente la presencia de los cauces. El segundo proceso

construye los muros. La idea es limitar o modificar el área de drenaje del *raster* en bruto estudiado; tomando en cuenta características del terreno que no estaba reflejada en ese *raster*, pero que si fueron identificadas mediante otra técnica complementaria.

Después del reacondicionamiento del terreno y la construcción de muros se deben llenar los huecos que pudiera tener el MDE. Los huecos definen partes del terreno que no tiene salida y que pueden llenarse de agua después de una tormenta intensa formándose charcos o almacenamientos mayores. Los huecos pueden estar formados por una sola celda o por múltiples celdas cuya elevación es mayor a la que tiene la celda(s) dentro del hueco. El llenado de los huecos es una operación que necesita ejecutarse con cuidado. El MDE no deberá tener depresiones interiores, lo que provocará que todo el escurrimiento del MDE alcance sus límites. En la mayoría de los casos esto es correcto pues las depresiones suele ser defectos del MDE. Sin embargo, en otros no es correcto, tal como cuando existen embalses en el interior del MDE.

El siguiente paso del proceso es la obtención de las direcciones de flujo de cada una de las celdas de *raster* producido por la operación de llenado de los hoyos. Cada celda del raster de direcciones de flujo tiene asignado un valor de ocho posibles valores que indican la dirección de la pendiente máxima desde esta celda. Los valores indican la dirección según la Tabla 2.1

Siendo las celdas cuadradas, de lado de longitud l , la longitud de flujo entre los centros de las celdas puede considerarse l en las direcciones horizontal y vertical y $\sqrt{2}l$ en las direcciones inclinadas. Se identifica la pendiente máxima y su dirección, la cual se le asigna a la celda actual. El proceso se repite para todas las celdas.

Después de determinar la dirección de flujo es necesario hacer la acumulación de flujo. A partir de la malla de dirección de flujo se calcula la malla de acumulación de flujo. Esta malla contiene el número de celdas que están descargando en una celda, para cada celda de la malla de dirección de flujo.

Tabla 1.1 Direcciones de flujo, modelo de los ocho puntos de vertido

Valor	Dirección
1	Este
2	Sureste
4	Sur
8	Suroeste
16	Oeste
32	Noroeste
64	Norte
128	Noreste

Una vez que se ha definido la malla de acumulación de flujo; se debe definir la malla de las corrientes. Esta operación parte de la malla de acumulación de flujo y crea una malla de corrientes para un umbral definido por el analista. El umbral define el comienzo de una corriente cuando se ha alcanzado su valor. Por ejemplo, si el umbral es de 100 celdas, las corrientes se originan a partir de celdas que tengan 100 celdas aguas arriba. El umbral se puede definir como un número de celdas o por un área de drenaje en kilómetros cuadrados. Se recomienda un umbral igual al 1% del número de celdas de la malla. En el caso de MDE grandes (con más de 20 millones de celdas), el tamaño del umbral puede incrementarse para reducir la red de drenaje y el número de polígonos que definen subcuencas (ESRI, 2007). A la malla de corrientes se le puede asignar un solo valor, convencionalmente se utiliza el uno, que se le asigna a las celdas que tienen un flujo acumulado igual al del umbral utilizado o más. A las demás celdas se les asigna No_Data.

Una vez que las corrientes que forman la red de drenaje han sido identificadas es necesario asignarle un número a cada segmento. Existen dos tipos de segmento, segmentos iniciales y segmentos intermedios. Un segmento inicial comienza con una celda cuyo flujo acumulado es igual o mayor que el umbral. Un segmento intermedio está entre dos uniones de otros segmentos. Esta operación crea una malla de segmentos de corrientes en la que cada segmento tiene una identificación única y todas sus celdas tienen el mismo código que se ha especificado para ese segmento. Los datos de esta operación son las mallas de dirección de flujo y de corrientes.

Tan pronto como se hayan asignado códigos a los segmentos de corrientes se debe crear una malla, de subcuencas, en la que cada celda lleve un valor que indique a cual pertenece. El valor corresponde al valor del segmento de corriente. Esta tarea tiene como datos las mallas de dirección de flujo y de segmentos de corrientes.

En el siguiente paso del proceso la malla de subcuencas es transformada en una clase de elementos de polígonos de subcuenca. En esta operación, las celdas adyacentes de la malla de subcuencas que tienen el mismo código de malla son combinadas en una sola área, cuya frontera es vectorizada; esto es, es convertida en un polígono. Otra transformación importante para el procesamiento posterior es la de la malla de segmentos de corriente en una clase de elementos de líneas de corriente en la que cada línea lleva el identificador de la subcuenca en la cual reside.

Las clases de elementos de subcuencas y líneas de corriente que se han definido corresponden al umbral que el analista eligió. Es probable que ninguna salida de esa subcuenca coincida con la salida exacta de una cuenca en esa, lo que hará necesario volver a trazar la cuenca a partir de la salida exacta. Este trazo, sin embargo, se basará en los resultados obtenidos anteriormente. Finalmente, las medidas y disposición de las subcuencas y las líneas de corriente de la cuenca permitirán determinar los valores de los parámetros geomorfológicos presentados en secciones anteriores.

2 Antecedentes

Este capítulo define que es un modelo hidrológico y un modelo hidráulico, También da algunas calcificaciones conocidas y describe algunos modelos hidráulicos e hidrológicos.

Para llevar a cabo gran parte de los proyectos de ingeniería hidráulica es necesario el cálculo de gastos de diseño; una de las maneras de obtener esta información es por medio de la observación y de la medición directa de eventos, sin embargo, la dificultad de recolectar esta información ha llevado a la ingeniería a tomar medios indirectos para conseguir dicho fin.

Un método indirecto consiste en identificar una variable ligada al escurrimiento que sea fácil de medir. La variable que resulta adecuada es la lluvia; de aquí nace la necesidad de generar teorías y métodos que se enmarcan en el proceso llamado lluvia-escurrimiento.

Con el paso de tiempo y debido a las necesidades de la ingeniería se han dado avances en la recopilación de datos y modelado; que son utilizados para resolver problemas como la estimación de gastos de diseño y descargas en las salidas en cuencas rurales. En el caso de cuencas urbanas es necesario el cálculo de gastos de diseño para cada elemento que constituye el sistema de drenaje.

Hasta el siglo 18 los desagües fueron diseñados por prueba y error, porque no había suficiente información para desarrollar métodos para especificar caudales de diseño apropiados, sin embargo, el progreso llegó con el desarrollo de la formula de fricción de Chezy en 1770, la invención del pluviómetro y la recolección de datos meteorológicos en Europa en el siglo XIX (O'Loughlin et al, 2010).

En 1850 los hermanos Mulvaney dirigieron un grupo de ingenieros que idearon un método para la determinación de gastos de diseño, para establecer el tamaño de los canales de drenaje de tierras rurales, llamado método racional. El anterior es considerado el primer modelo del proceso de lluvia-escurrimiento (O'Loughlin et al, 2010).

Aún cuando el método racional no fue aceptado inmediatamente, de él partieron muchos estudios y aportaciones como el método de Talbot para la creación de las curvas i-d-t, Sherman (1932) generó el método del hidrograma unitario sintético, Horton (1933) desarrolló una teoría sobre la infiltración, Clark (1945) y Zoch (1934-1937) realizaron estudios sobre las trayectorias, Dooge (1959) dio a conocer la teoría general del hidrograma unitario.

Con el avance de los sistemas de cómputo se crearon programas dedicados a esta área del conocimiento; uno de los programas más utilizados fue el de Stanford (Crawford y Linsley, 1966), la

universidad de Illinois desarrolló un programa para estudios de sistemas en cascada o sistemas ramificados en almacenamientos bajo la dirección de Ven Te Chow.

Durante las décadas finales del siglo 20 se lanzaron programas como: SWMM (EEUU, Environmental Protection agency, 1971), HEC-1 (Hydrologie Engineering Center, 1981), Tr55 (Soil Conservation Service EE.UU, 1975), el WASSP (U.K: National Water Council, 1981), MOUSE (Danish Hydraulics Institute, 1996), etc.

Los programas mencionados anteriormente se pueden reagrupar en categorías, las que son objeto de estudio de este trabajo son los modelos de tipo hidrológico y de tipo hidráulico.

2.1 Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico tiene como objetivo la representación de los procesos que conforman el ciclo hidrológico y la interrelación entre las variables que influyen en el mismo. Estos modelos se pueden dividir en determinísticos o probabilísticos (Mediero, 2007).

- Un modelo determinístico estimará la respuesta hidrológica a unos datos de entrada mediante una representación matemática abstracta o una ecuación basada físicamente, dando como resultados un valor numérico concreto.
- Un modelo probabilístico, tanto estadístico como estocástico, sigue las leyes de la probabilidad, dando como resultado una función de distribución de ocurrencia de cada uno de los intervalos que conforman una variable discreta.

2.1.1 Clasificación de los modelos hidrológicos.

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar desde tres puntos de vista. La primera se fundamenta en el tipo de representación espacial del modelo; la segunda en la forma de representar los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca y la última en la extensión temporal en la que se puede aplicar el modelo (Mediero, 2007).

La primera clasificación se subdivide en:

- Modelos agregados: son aquellos que consideran una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca, utilizando como variable la precipitación media, y supone que los parámetros de los diferentes sub-modelos, que simulan los diferentes procesos hidrológicos, son globales para toda la cuenca y permanecen a lo largo de un episodio.

- Modelos semidistribuidos: Son aquellos que permiten una cierta variabilidad de la lluvia y de los parámetros de los submodelos que lo componen, mediante la división de la cuenca en multitud de pequeñas subcuencas con lluvia y parámetros constantes en cada uno de ellos.
- Modelos distribuidos: Son aquellos que permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros, mediante la división de la cuenca en celdas, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos.

En función del tipo de representación de los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca se pueden clasificar en tres grupos:

- Modelos métricos: Son aquellos que tienen una gran dependencia respecto de los datos observados, realizando una búsqueda sobre los mismos para caracterizar la respuesta del sistema, mediante un método de extracción de la información a partir de los datos existentes. Estos modelos se construyen con una consideración pequeña o nula de los procesos físicos que ocurren en el sistema hidrológico. Los modelos métricos utilizan la representación más simple del comportamiento de una cuenca hidrológica, ya que la relación entre la lluvia y el escurrimiento resultan a partir de las condiciones iniciales de la cuenca pueden ser simuladas mediante una variable de pérdida volumétrica, que engloba los procesos de pérdida por evaporación, almacenamiento de humedad en el suelo y recargar de aguas subterráneas, y una función de distribución temporal, que simula los diferentes modos dinámicos de respuesta. El ejemplo más común de este tipo de modelos son los basados en el concepto de hidrograma unitario, que simula la respuesta de del escurrimiento a un episodio de lluvia mediante una función de transferencia lineal.

La gran ventaja de estos modelos es que requieren una cantidad mínima de datos, pero tiene un rango de aplicación limitado por la variabilidad de los datos observados y no son capaces de tomar en cuenta los cambios producidos en la cuenca, por ejemplo la expansión urbana sin realizar modificaciones en el modelo.

- Modelos conceptuales: Son aquellos que representan los procesos hidrológicos más importantes mediante una base de conocimiento inicial en forma de representación conceptual de los mismos. El inicio de estos modelos se produce con el avance de los equipos de cómputo, que permitió la representación integrada de la fase terrestre del ciclo hidrológico para generar secuencias continuas del flujo, sin embargo, aún se necesita una etapa de calibración.

La principal desventaja de estos modelos es la existencia de diferentes valores de los parámetros del modelo con los que se obtienen similares medidas de ajuste. Por tanto, si los valores de los parámetros no pueden ser definidos de manera única, los parámetros no pueden asociarse directamente a las características de la cuenca, y por tanto, el modelo no puede aplicarse a nuevas cuencas sin observaciones, e incluso a la misma cuenca después de haberse producido cambios en la misma.

- Modelos físicamente basados: Estos modelos utilizan los conocimientos más recientes del comportamiento físico de los procesos hidrológicos realizando la simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca mediante la utilización de la ecuación de continuidad, resolviendo las ecuaciones diferenciales de forma numérica. Estos modelos permiten la descripción de los fenómenos en cada una de las celdas del sistema, tanto desde el punto de vista de los parámetros como de la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales, por tanto el sistema físico se representa por mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que expresan la masa, el momentum y el balance de energía.

La gran ventaja de los modelos físicamente basados, estriba en utilizar parámetros que en principio pueden ser medidos directamente en el campo y tienen un sentido físico directo, por tanto, si los valores de estos parámetros se pueden determinar a priori, estos modelos pueden ser aplicados a cuencas sin datos observados, e incluso se pueden tener en cuenta los cambios en la misma cuenca.

Por otra parte, los modelos físicamente basados permiten una representación matemática ideal de un fenómeno real, con la limitante de que requiere ser alimentado con un gran número de datos, que en su mayoría son difíciles de conseguir, a la vez, que necesitan un gran tiempo de procesamiento computacional.

En función de la extensión temporal en la que se puede aplicar el modelo, se clasifican en dos grupos:

- Modelos de episodio: Son aquellos desarrollados para simulaciones de cortos intervalos de tiempo normalmente de un único evento de lluvia. Estos modelos se encuentran en la simulación de los procesos de infiltración y escurrimiento superficial, ya que su principal objetivo es la evaluación del escurrimiento directo, pero no toman en cuenta la recuperación de humedad entre episodios de lluvias. Los modelos de episodio se aplican fundamentalmente para simular gastos de avenida, principalmente en aquellos casos en los que el escurrimiento directo es la principal fuente de generación de escurrimiento total, sin embargo no son recomendables para los cálculos en la época de estiaje ni en la simulación de gastos diarios.

- Modelos continuos: Son aquellos que permiten la simulación de caudales diarios, mensuales o estacionales, es decir, permiten la simulación durante intervalos de tiempo mayores a un episodio de lluvia. Estos modelos consideran todo los procesos que influyen en la generación de escurrimiento, tanto el escurrimiento directo mediante el flujo subterráneo. Los modelos continuos se centran en la simulación de la evapotranspiración y de los procesos que influyen a largo plazo en la recuperación de la humedad durante los periodos en los que no hay ocurrencia de precipitación. Por tanto, el objetivo principal de los modelos continuos es la simulación del balance de humedad total de la cuenca durante periodos largos de tiempo. Los modelos continuos se aplican fundamentalmente para el pronóstico de gastos.

2.1.2 Modelos concentrados frente a modelos distribuidos

La principal diferencia entre los modelos concentrados y distribuidos se fundamenta en que los primeros no consideran la variabilidad espacial de los parámetros; los segundos permiten la variabilidad espacial de los parámetros. Por tanto, los modelos concentrados sólo pueden evaluar la respuesta de la cuenca en el punto de salida de la misma, sin tener en cuenta la respuesta de las subcuencas de forma individual, mientras que los modelos distribuidos permiten la evaluación de la respuesta tanto de la cuenca en conjunto como de las subcuencas de manera individual, pudiendo así mismo obtener la respuesta en cualquier punto de la cuenca (Ponce, 1989).

Históricamente se han utilizado modelos concentrados sobre modelos distribuidos; debido principalmente a la limitación de los ordenadores y a la falta de disponibilidad de datos. Sin embargo, como consecuencia de los avances tecnológicos de la última década y la gran cantidad de datos procedentes de los SIG, que permiten una descripción de la cuenca como: la topográfica, uso de suelo, tipos de suelo, lluvia, etc., se produce un mayor uso de los modelos hidrológicos distribuidos con el objeto de utilizar su capacidad de representación espacial de los parámetros y datos de entrada y así aprovechar toda esta cantidad de datos disponibles (Vieux, 2004).

La utilización de modelos concentrados puede estar justificada en zonas donde la variabilidad espacial de los parámetros sea más o menos uniforme. Sin embargo, un modelo de parámetros concentrados no será capaz de representar correctamente los cambios de pendiente y la forma de la red de drenaje, que tiene una influencia considerable en la respuesta hidrológica de una cuenca. En muchos casos se prefiere utilizar un modelo concentrado debido a la simplicidad que se tiene para dar los parámetros que representan a la cuenca y la forma en la que se calibran, en cambio la aplicación de modelos distribuidos conlleva un mayor reto en la caracterización de los parámetros de la cuenca.

Una solución intermedia consistirá en la construcción de un modelo semidistribuido; el cual consiste en la división de la cuenca en un conjunto de subcuencas, con parámetros y características uniformes y conectadas entre sí, mediante un modelo agregado. Pero normalmente se tiene los siguientes inconvenientes (Vieux, 2004):

- La obtención de los valores de los parámetros a la escala de las subcuencas consideradas resultaría complicado, debido a que no se dispondrá de valores de caudal en la salida de cada una de las cuencas.
- La representación del modelo puede verse afectada en función del número de subcuencas consideradas.
- La variabilidad de los parámetros no se presenta correctamente, debido a la agregación en la escala de las subcuencas.
- El modelo resultante no tiene una base física.

Además de la consideración de la variabilidad espacial de los parámetros del modelo, una de las principales ventajas de los modelos distribuidos frente a los modelos concentrados consiste en la consideración de la variabilidad espacial de la lluvia (Mediero, 2007).

La variabilidad espacial de la lluvia tiene una influencia muy importante en la respuesta de la cuenca, sobre todo para el caso de lluvias con generación convectiva, siendo uno de los factores más determinantes en el gasto máximo y la duración del hidrograma. Si el área de la tormenta es mucho menor que el área de la cuenca, el gasto máximo estará muy influenciado por la dirección y velocidad de la tormenta. En este caso, una tormenta que se mueve hacia aguas abajo de la cuenca, siguiendo la dirección de la red de drenaje y de flujo, produce un hidrograma con un gasto máximo mayor y una curva de ascenso más aguda, sin embargo, una tormenta que se mueve hacia aguas arriba de la cuenca produce un hidrograma con un gasto máximo menor y una curva de ascenso y descenso más suave.

Se han realizado numerosas comparaciones entre modelos de parámetros distribuidos y modelos de parámetros concentrados, obteniendo como resultado que la distribución espacial de la lluvia debería tenerse en cuenta para cualquier tamaño de cuenca, ya que no sólo influye en los valores del gasto máximo, sino también en el tiempo de los hidrogramas.

Es importante resaltar que hay casos muy particulares en lo que la utilización de modelos distribuidos y modelos concentrados dan resultados muy parecidos, es decir la utilización de lluvia variable en el espacio y una lluvia espacial media es equivalente, estos casos particulares se pueden tener por errores en los datos, en la estructura del modelo y en los parámetros con los que se alimentó, ya que las características no lineales de los modelos distribuidos pueden magnificar los errores en los datos de lluvia en vez de suavizarlos. Por otra parte, los resultados pueden ser

muy específicos y localizados, y pueden tener una gran dependencia respecto de la escala de la cuenca, la variabilidad de la lluvia en la zona y las características de los mecanismos de generación de escurrimiento, además de que en cada estudio se han utilizado diferentes modelos para simular el proceso lluvia-escurrimiento.

Como consecuencia se ha sugerido que lo importante no es determinar si una cuenca tiene una gran espacialidad de la lluvia y de las características físicas, sino de la identificación de si la variabilidad de la lluvia filtrada a través de las características físicas de la cuenca, produce cambios significativos en la respuesta de la cuenca, en estos casos, un modelo distribuido producirá una mejora en los resultados respecto a un modelo agregado.

Se puede concluir que los modelos distribuidos requieren un mayor tiempo de cálculo respecto a los modelos concentrados, debido al mayor detalle con que realizan las simulaciones, sin embargo, la principal ventaja de los modelos distribuidos consiste en la consideración de la variabilidad espacial tanto de la lluvia, como de los procesos hidrológicos, ya que las heterogeneidades espaciales de un sistema hidrológico pueden no estar bien reproducidas mediante valores medios de los parámetros. Por el contrario, los modelos hidrológicos distribuidos tienen el inconveniente de requerir una considerable calidad y cantidad de datos disponibles en la cuenca.

2.2 Modelos hidráulicos

Los modelos hidráulicos pretenden representar los fenómenos hidráulicos a partir de abstracciones matemáticas. Al igual que en los modelos hidrológicos estos modelos se pueden dividir por la complejidad de las ecuaciones a utilizar.

Una forma de distinguir los modelos matemáticos para resolver las ecuaciones fundamentales de la hidráulica podría ser la siguiente (Echavarría, 2013):

- La aproximación de las ecuaciones.
- Los métodos numéricos.
- Las herramientas de apoyo para simular condiciones de frontera internas.
- El ambiente de programación en que fueron desarrollados.

Los métodos que representan las ecuaciones de Saint-Venant se conocen como dinámicos. Los que emplean simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant se conocen como métodos hidráulicos. Estos últimos pueden ser el método de la onda difusa o el método de la onda cinemática. La ecuación de la onda difusa se usa para analizar la evolución del hidrograma en tramos largos del cauce y produce resultados comparables a los que se obtienen con las

ecuaciones completas de Saint-Venant. La ecuación de la onda cinemática se obtiene al considerar que la pendiente de la línea de energía es igual a la pendiente del terreno.

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen diferentes formas y simplificadas para definir el tránsito de avenidas del flujo en una dimensión. Se desprecia el efecto del flujo lateral, la resistencia por viento y las pérdidas por vórtices.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.1)$$

Donde

$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$.- Aceleración Local

$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$.- Aceleración Convectiva

$g \frac{\partial y}{\partial x}$.- Fuerza de Presión

$g(S_0 - S_f)$.- Fuerza de gravedad y Fuerza de fricción

La fuerza de gravedad y de fricción representan en conjunto la onda cinemática, la onda cinemática si se le adiciona el término de la fuerza de presión representan a la onda difusa y si a la última se le adiciona los términos de aceleración local y aceleración convectiva se usa la ecuación de onda dinámica.

La ecuación de momentum está compuesta de términos para describir los procesos físicos que gobiernan el fenómeno los cuales son:

- Aceleración local que describe el cambio en el momentum debido al cambio de velocidad en el tiempo.
- Aceleración convectiva que describe el cambio en el momentum debido al cambio de velocidad a lo largo del conducto.
- Fuerza de presión que es proporcional a la variación del tirante a lo largo de la conducción.
- Fuerza de gravedad que es proporcional a la pendiente del fondo (S_0)
- Fuerza de fricción que es proporcional a la pendiente de fricción (S_f)

Otros métodos utilizan mayores simplificaciones, pero son menos exactos que los obtenidos con los métodos hidráulicos y caen dentro de los llamados métodos hidrológicos; entre los más usados son los de Muskingum y Muskingum Modificado.

Las condiciones de frontera internas generalmente representan una particularidad en los modelos matemáticos ya que forman una discontinuidad en el armado convencional. Por ejemplo para representar el funcionamiento hidráulico de una planta de bombeo (al tener un conducto a una elevación menor que la del conducto de descarga), en el modelo matemático normalmente se requiere transitar el hidrograma conservando la descarga libre en la salida, por lo que se incorpora una condición de frontera interna que permita ambas condiciones simultáneamente. Algunos modelos tienen implementado un algoritmo para resolver este tipo de arreglos geométricos.

El desarrollo de las computadoras permite que en la actualidad se manejen en ambiente Windows los modelos matemáticos, a diferencia de los modelos que se utilizaban en modo terminal, como los programas de C++, Fortran, Turbo Pascal, etc.

2.2.1 Ecuaciones fundamentales de la hidráulica que utilizan los modelos hidráulicos

Ecuación de continuidad.

$$Q_1 V_1 = Q_2 V_2 \quad (2.2)$$

Ecuación de momentum.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2.3)$$

Para simular el funcionamiento de flujos a presión.

$$-\frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} dxdt = \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} dxdt \quad (2.4)$$

Donde:

Q .- Gasto, m³/s

A .- Área hidráulica, m²

y .- Tirante, m

g .- Aceleración de la gravedad, m/s²

x .-Distancia en la dirección del flujo, m

t .- Tiempo, s

α .-Coeficiente de corrección por la distribución de la velocidad

S_0 .-Pendiente del fondo

S_f .-Pendiente de fricción

ρ .-Densidad del Agua, kg/m³

2.3 Nuevos métodos de obtención de parámetros

Existen diversos artículos y publicaciones que abordan el tema de los modelos en la relación lluvia-escorrentamiento, debido a que un modelo lluvia-escorrentamiento se aplica normalmente a las tormentas fuera del rango de las condiciones en que ha sido exitosamente calibrado y verificado,(Yu et al, 2001) examina la incertidumbre del resultado del modelo, causada por los parámetros de calibración. Aplica cuatro métodos, la simulación de Monte Carlo (MCS), América simulación hipercubo (LHS), el método de Rosenblueth del punto de estimación (RPEM), y el método de Harr del punto de estimación (HPEM), los cuales se utilizaron para construir los límites de incertidumbre en un hidrograma estimado. Comparando estos cuatro métodos indica que LHS produce resultados analíticos similares a los de MCS.

Por otra parte los modelos hidrológicos distribuidos pueden utilizarse eficazmente para la simulación de eventos de inundaciones en cuencas donde un complejo sistema de embalses afecta al régimen de flujo natural. La valoración de este efecto en un sistema complejo de depósito se realiza con un modelo hidrológico distribuido espacialmente, donde la formación del escorrentamiento superficial y el enrutamiento hidráulico a través de cada depósito y el sistema del río se efectúan con una resolución espacial y temporal.

La cuenca del río Toce se presenta como un caso de estudio, debido a la presencia de 14 represas hidroeléctricas activas que afectan el régimen de flujo natural. Un acontecimiento reciente de inundación extrema se simula mediante un método Kriging multi-realización para modelar la distribución espacial de la precipitación. Los resultados muestran cómo un modelo hidrológico distribuido puede contribuir a la definición de estrategias para la gestión de embalses en la mitigación de inundaciones.

La universidad de Shahid Bahor en Irán, realizó una aplicación de la teoría de redes neuronales para procesos lluvia-escorrentamiento en el río Zard. Las redes neuronales generalmente utilizan un sistema de nodos y capas que son una representación simple del cerebro humano, se denomina multicapa de percepción (MLP), el estudio propone una nueva estructura llamada Función de Base

Radial (RBF) la cual se compara con el modelo tradicional. La base de datos con la que se alimentó este modelo fue con 14 tormentas seleccionadas de 10 años de registros pluviométricos y de escurrimiento, estos eventos se seleccionaron porque generaron inundaciones en la zona; el 80 % de las tormentas se utilizaron para entrenar el modelo de RNA y el otro 20 % para validarlo; los resultados se compararon por medio del error cuadrático medio (RMSE), la suma de error cuadrático (SSE) y el coeficiente de correlación (Mehrdad, 2004).

Mehrdad propone una aplicación en el sitio de estudio para estimar la descarga del río, una de las etapas del estudio consistió en entrenar un modelo MLP y RBF, las diferencias entre ambos modelos es la siguiente:

1.- La Red RFB tiene una capa oculta y las funciones de activación de las neuronas son de tipo Gaussiano con centro y propagación especial.

2.- La red RBF contiene funciones lineales simples, lo que hace posible al aplicación de optimización por algoritmos lineales, por esta razón se mejora la velocidad de procesamiento y evita caer en mínimos locales, como sucede en el proceso de aprendizaje en la red de tipo MLP.

Las conclusiones del estudio de Mehrdad es que los resultados de las RNA son buenos si se alimentan con una base de datos de calidad y si se combina con un modelo como el HEC-HMS pueden llegar a ser utilizados para estimar el gasto de una avenida en una cuenca.

Manoj describe un proceso basado en un modelo de lluvia-escurrimiento por medio de la división de una cuenca en una red de celdas o células, para desarrollar un modelo capaz de manejar de forma heterogénea la información disponible como el uso y tipo de suelo, la pendiente del terreno, y las precipitaciones de tormentas aisladas de varias cuencas (Manoj et al 2004).

La información se ingresa al modelo a través de un *Sistema de Información Geográfica* (SIG) para cada celda, la infiltración se calcula por medio del modelo de Philip, modelo de infiltración de dos términos, los cuales se obtienen a través de la información del tipo de suelo, la mecánica de flujo superficial es descrito por la aproximación de las ecuaciones de difusión de onda de St. Venant que se resuelve numéricamente para la profundidad de flujo y el escurrimiento por el método de volumen finito. El modelo utiliza una relación que explica la dependencia de la resistencia al flujo en la profundidad de la corriente y la rugosidad de la superficie.

Los resultados de varias cuencas indican que el modelo puede simular razonablemente bien el hidrograma de salida. El modelo también predice de forma realista la variación temporal y la distribución espacial de la profundidad de flujo y el gasto sobre la cuenca. También permite estudiar la distribución espacial y temporal del gasto por el efecto de las modificaciones de

captación en términos de cambios en el uso y tipo de suelo. Sin embargo, (Manoj et al, 2004) concluyen que el modelo propuesto tiene la limitación de que los valores de algunos parámetros se obtiene mediante calibración.

Wang comparó tres métodos, el método Evolution Complex (SCE), el algoritmo genético simple (SGA) y Micro-Genetic Algorithm (μ GA), aplicados en la calibración de parámetros de una red distribuida basada en modelo de lluvia-escurrimiento (GBDM) y se compararon su desempeño(Wang et al, 2010).

Catorce tormentas históricas en la cuenca Yan-Shui Creek, Taiwán, proporcionan la base de datos para la calibración del modelo y su verificación. El estudio revela que la SCE, SGA y μ GA tienen resultados próximos de calibración, y ninguno de ellos son superiores con respecto a todas las medidas de rendimiento, es decir, en los errores de tiempo de pico, el tiempo de descarga, el volumen total de escurrimiento, etc., los resultados son bastante satisfactorios. Entre los tres métodos, el SCE parece ser más robusto que los otros dos métodos debido a la menor influencia de las diferentes generaciones de números aleatorios iniciales para los parámetros de modelo calibrado, y tiene el mejor rendimiento de la verificación con un número relativamente pequeño de eventos de calibración.

En cuanto a modelos hidráulicos con inclusión de la precipitación para la estimación del escurrimiento podemos mencionar a El Servicio de Conservación de Suelos-Número de Curva (SCS-CN), (Grimaldi, 2013), un popular método de lluvia-escurrimiento, modelo que se utiliza ampliamente para estimar el escurrimiento directo de pequeñas cuencas no aforadas. El SCS-CN es un método sencillo y valioso para cuantificar el volumen total de gasto generado por precipitaciones de tormenta, pero su uso no es apropiado para estimar la precipitación en exceso en incrementos subdiarios. Para superar este inconveniente, se propone incluir el Green-Ampt (GA) modelo de infiltración en un procedimiento mixto, que se conoce como número de curva para Green-Ampt (CN4GA), con el objetivo de distribuir en el tiempo de la información proporcionada por el método SCS-CN.

Para una tormenta dada, el método SCS-CN registra la cantidad total de precipitación que a su vez es utilizada para calibrar el parámetro de la conductividad hidráulica del suelo del modelo GA. El procedimiento propuesto se evalúa mediante el análisis de 100 eventos de lluvia-escurrimiento que se observaron en cuatro pequeñas cuencas de diferente tamaño. CN4GA parece proporcionar resultados alentadores para predecir el pico de la precipitación neta y los valores de duración, ha demostrado, al menos para los casos de prueba considerados en este estudio, una mejor concordancia con la observada en los hidrogramas en el clásico método SCS-CN.

Por otra parte, los parámetros utilizados habitualmente para el diseño de estructuras hidráulicas se obtienen de hidrogramas de diseño. Sus estimaciones estadísticas no son siempre posibles de obtener debido a la falta de suficientes datos de gasto. En estos casos se utilizan los modelos lluvia-escorrentía. Sin embargo, en sustitución de datos de gasto por lluvia reduce el problema, pero no lo elimina por completo.

Sarkar y Kumar comentan que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se han propuesto como modelos de caja negra eficientes para la predicción de la hidrología (Sarkar y Kumar, 2012). Se dice que las RNA poseen la capacidad de reproducir relaciones complejas y en algunos casos desconocidas entre una o más variables de entrada con relación a una o más variables de salida (Chakraborty et al, 1992). En los últimos años las RNA han demostrado un desempeño excepcional como herramientas de regresión, especialmente cuando se utilizan para el patrón de reconocimiento y la estimación de la función. Estas son altamente no lineales y pueden capturar las interacciones complejas entre las variables de entrada de un sistema y sin ningún reconocimiento previo sobre la naturaleza de estas interacciones (Hammerstorm, 1993).

Dentro de las ventajas de las RNA se encuentra que en el caso de existir gran variación en los datos de entrada se pueden retrasar o incluso prevenir por medio de transformaciones lineales, logarítmicas o normales, donde además se puede prevenir problemas de asíntotas. (Haykin, 1994).

Una RNA es un sistema informático compuesto por un conjunto de información y procesamientos para elementos simples, análogos a una neurona. La neurona recoge una o varias entradas y produce una salida de acuerdo con una función no lineal. Un modelo de RNA es creado por la interconexión de muchas neuronas en una configuración conocida. Los elementos principales que caracterizan a la RNA son la representación distribuida de la información, las operaciones locales y el procesamiento no lineal. (Sarkar y Kumar, 2012)

Generalmente hay cuatro etapas distintas en el desarrollo de una solución basada en RNA. El primer paso es la transformación de datos o de escala. El segundo paso es la arquitectura de la red, donde se establece el número de neuronas en cada capa, y la conectividad entre las neuronas de las capas ocultas. El tercer paso es un algoritmo de aprendizaje que permite responder de manera correcta a las entradas de la red. Por último, viene la etapa de validación en el que el rendimiento de la RNA se mide por medio de criterios estadísticos seleccionados. (Sarkar y Kumar, 2012)

Realizaron un estudio en río Ajay en la cuenca de Sarath, en donde desarrollaron un modelo de RNA que identificara las variables de entrada y salida. Las variables de entrada han sido

seleccionadas en base a los conceptos de tiempo de concentración y la recesión de un hidrograma de la tormenta. (Sarkar y Kumar, 2012)

Para alimentar los modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) se utilizan datos disponibles los cuales se dividen en dos partes. La primera parte se utiliza para calibrar el modelo y el segundo para validarlo. La longitud de los datos de calibración depende del número de parámetros a estimar. La práctica general es usar un medio o dos tercios de los datos para la calibración y el restante para la validación.

En el caso de estudio se seleccionaron seis tormentas de las cuales cuatro fueron utilizadas para la calibración y dos más para la validación. Se tomaron varios criterios para la validación de información calculadas por las RNA, en el estudio estaban el coeficiente de correlación (R), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación. Se determino que los resultados de los eventos proporcionados son buenos y que las redes neuronales son aplicables para los modelos lluvia- escurrimiento de un solo evento.

2.4 Modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en los últimos años.

Algunos de los modelos de lluvia-escurrimiento que han sido utilizados hasta la actualidad se mencionan a continuación:

2.4.1 Modelo MIKE SHE

Fue uno de los primeros modelos que utilizó una discretización de la cuenca en celdas. La estructura del modelo se fundamenta en la unión de dos módulos independientes: Un modulo unidimensional que representa las columnas de flujo vertical no saturado de profundidad variable, y un módulo bidimensional que representa la escorrentía saturada. El modelo SHE está formado por las siguientes componentes (DHI, 2007):

- Componente que representa los procesos de intercepción de lluvia por la cubierta vegetal y evapotranspiración: Calcula la evapotranspiración y la cantidad de lluvia neta resultante a partir de los datos meteorológicos de entrada y los parámetros de vegetación.
- Componente que representa los procesos de escurrimiento y flujo en canal: Calcula el transporte del agua superficial en forma de escurrimiento por el terreno y flujo en los cauces, a partir de los datos de topografía, forma del cauce y parámetros de rugosidad. La profundidad de agua superficial disponible como escurrimiento se determina a partir de la

lluvia neta y los coeficientes de evaporación dados por el componente anterior y por el coeficiente de infiltración del suelo determinado por el siguiente componente.

- Componente que representa la zona no saturada: Calcula el contenido de humedad del suelo, así como la distribución de presiones en la zona no saturada. La zona no saturada se extiende desde la superficie del suelo hasta el nivel freático.
- Componente de la zona saturada: Calcula la cota del nivel freático y los flujos en la zona saturada, que se suponen tener una dirección únicamente horizontal.
- Componente de deshielo: Calcula la transferencia de humedad debida a la nieve a partir de un conjunto de parámetros de vegetación, nieve y unos datos de entrada meteorológicos.

2.4.2 Modelo SAC-SMA

El modelo SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting) ha sido desarrollado por el National Weather Service de los Estados Unidos (Ajami et al, 2004) . El modelo se fundamenta en un algoritmo de cálculo del escurrimiento generado a partir de una división del suelo en dos capas, una superior y otra inferior. Cada capa incluye almacenamientos que interactúan para generar estados de humedad del suelo y cinco formas de generación del escurrimiento:

- Escurrimiento directo procedente de las zonas impermeables, tanto temporales como permanentes.
- Escurrimiento superficial debido a una precipitación más rápida que el tiempo necesario para que se produzca el proceso de percolación cuando las zonas más altas del almacenamiento están llenas.

Flujo de base primario. El modelo utiliza un conjunto de almacenamientos que se encuentran unidos mediante una serie de procesos. Los almacenamientos se llenan si ocurre una precipitación lo suficientemente fuerte, mientras que se vacían debido a la percolación vertical, la evapotranspiración y el drenaje lateral. El volumen de agua que excede la capacidad de tensión del agua genera el exceso de lluvia.

Este exceso se introduce en el tanque de almacenamiento libre, desde el cual se produce el percolamiento vertical hacia la capa inferior o fluye horizontalmente. Finalmente, el agua que excede la capacidad de percolamiento y de flujo lateral se convierte en escurrimiento superficial.

2.4.3 Modelo DBSIM

El modelo DBSIM (Distributed Basin Simulator) realiza una parametrización de los procesos de generación de escurrimiento de una forma más física que en el caso de los modelos conceptuales (Garrote y Bras, 1995). El modelo está formado por dos componentes principales:

- Módulo de generación de escurrimiento: Calcula la distribución espacial de la capacidad de infiltración superficial de la cuenca con el objeto de representar la evolución de las zonas saturadas durante una tormenta. Se utiliza un modelo de infiltración cinemática.

La generación de escurrimiento se puede producir mediante dos mecanismos: Escurrimiento producido por la infiltración del flujo subterráneo y escurrimiento producido por la superación por la superación de la capacidad de infiltración del suelo.

- Módulo de transporte del flujo superficial: Calcula el caudal en un punto de la cuenca a partir de la distribución de la tasa de generación de escurrimiento en la cuenca y una función de respuesta instantánea de cada celda, que sigue una función delta de Dirac con un retardo igual al tiempo de viaje desde dicha celda al punto en el que se está calculando el gasto.

2.4.4 Modelo TOPMODEL

El modelo TOPMODEL se utiliza para simular el comportamiento hidrológico en cuencas de pequeño tamaño (Singh, 1995). Se fundamenta en la representación del flujo subterráneo mediante una aproximación de onda cinemática, suponiendo que la variación de la zona saturada se puede simular mediante sucesivas representaciones en régimen uniforme y que el gradiente hidráulico de la zona saturada puede ser simulado mediante la pendiente topográfica local. De esta suposición se deriva una relación simple entre el almacenamiento en la cuenca y el índice topográfico (relación entre el área drenada y la pendiente), que representa la propensión de alcanzar las condiciones saturadas en cualquier punto de la cuenca. Una tercera suposición consiste en que la distribución de la transmisividad aguas abajo de un punto es una función exponencial del déficit de almacenamiento. Por tanto, en un intervalo de tiempo con lluvia, el modelo predice que cualquier lluvia sobre una zona saturada alcanzara el cauce del río como escurrimiento superficial o subterráneo, junto con el exceso de lluvia sobre el requerido para rellenar las zonas donde el déficit es pequeño.

El modelo queda completo mediante las componentes que representan el comportamiento de la zona no saturada y del transporte de gasto. La zona no saturada se representa mediante dos tipos

de almacenamiento, uno representa el almacenamiento por intercepción de la vegetación y el otro el almacenamiento por drenaje que controla la recarga de la zona saturada.

2.4.5 Modelo MIKE 11

El modelo MIKE 11 es un modelo hidrológico en dos dimensiones que simulan los procesos de generación de escurrimiento, transporte de sedimento y calidad de las aguas. Uno de los módulos que incluye es el hidrológico de lluvia-escurrimiento. El comportamiento hidrológico de la cuenca se simula de modo semi-distribuido mediante la división de la cuenca en subcuencas unidas a la red de drenaje. El modelo permite simular el proceso lluvia-escurrimiento mediante un modelo que utiliza en zonas rurales, teniendo en cuenta el contenido de humedad en cuatro almacenamientos interconectados, o mediante un modelo de hidrograma unitario que utiliza el método del SCS.(DHI,2003)

2.4.6 Modelo TETIS

El modelo TETIS es un modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual, que utiliza un método de onda cinemática unido a las características geomorfológicas de la cuenca, con el objeto de transportar el flujo a lo largo de la red de drenaje, este método se conoce como Onda Cinemática Geomorfológico.(Dávila, 2011)

El modelo TETIS está basado en una simulación de la cuenca en la que cada celda se representa mediante seis tanques verticales. Las conexiones verticales entre tanques describen los procesos de precipitación, deshielo, evapotranspiración, infiltración y percolación, mientras que las conexiones horizontales describen los procesos de escurrimiento y flujo base. El primer tanque tiene en cuenta la nieve mediante un método de grado día. El segundo representa el almacenamiento estático que tiene pérdida de flujo por evapotranspiración. El tercero simula el almacenamiento superficial, donde el escurrimiento superficial es producido por el agua que no ha sido infiltrada en el terreno. El cuarto tanque representa el almacenamiento debido a la gravedad. El quinto corresponde a la simulación de acuífero, donde el flujo horizontal representa el flujo de base. Por último, el sexto tanque representa el comportamiento de la celda como canal, estando cada celda conectada a la de aguas abajo, según la forma de la red de drenaje. De esta forma el comportamiento hidrológico de la cuenca es representado mediante un conjunto de celdas drenantes en tres dimensiones, hacia aguas abajo hasta encontrar el cauce, donde el transporte del flujo es representado mediante el modelo GWK.(Dávila, 2011)

3 Metodología

En este apartado se explican los métodos de cálculo, que cada uno de los *softwares* utilizados en la tesis utiliza para realizar las simulaciones.

3.1 Modelo MPE

El Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE) se desarrolló con el objetivo de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el *Soil Conservation Service* (SCS), con una consideración que permite contemplar el secado del suelo después de una lluvia. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado. El programa trabaja con la información de una red de estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca y con los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla, obtenidos con la ayuda de un SIG (Sistema de Información Geográfica). El modelo es capaz de obtener: la precipitación media en la cuenca, el hietograma, la lluvia en exceso, las pérdidas y el hidrograma a la salida de la cuenca.

El objetivo de este tipo de programas es modelar la relación entre precipitación y escurrimiento; con el fin de hacer una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca.

En años atrás estos procesos se estudiaron mediante modelos de parámetros concentrados, que son alimentados con valores medios y tratan a las características de la cuenca y de la precipitación como si fueran las mismas en toda su área, por lo que no pueden considerar las variaciones espaciales en el interior de la cuenca como el tipo y uso del suelo.

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algunas de sus complementos se pueden dividir la cuenca en estudio en partes tan pequeñas (Generalmente celdas cuadradas o pixeles) cada una con sus características específicas. Con los MDE, seguir las trayectorias del escurrimiento directo hasta que llega al sitio o a los sitios de estudio.

En cuanto a la distribución espacial y temporal de la lluvia, en nuestro país todavía existen limitaciones derivadas de la poca densidad de las redes de medición y de la escasez de equipos de medición continua. No obstante, se han logrado ciertos avances en las técnicas de interpolación, se cuenta con algunas cuencas experimentales con redes más densas de medición continua y, con el tiempo se ha integrando la tecnología de radares meteorológicos para estimar mejor la distribución espacial de la lluvia.

Por estos avances son más usados los llamados modelos de parámetros distribuidos, en los que la producción del escurrimiento generado en cada una de las celdas o pixeles se puede transitar por la cuenca siguiendo trayectorias individualizadas hasta los sitios de interés.

3.1.1 Modelación y Datos de Entrada en MPE.

El programa MPE se desarrolló con el objeto de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos.

El programa funciona con la información de la red de estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca y con el archivo que contiene los parámetros hidrológicos de la cuenca, en forma de malla. Con estos datos es capaz de obtener:

- 1.- El área de la cuenca
- 2.- La precipitación media de la cuenca
- 3.- El hietograma de precipitación
- 4.- Las pérdidas
- 5.- La lluvia en exceso
- 6.- El gasto total, directo, base y máximo
- 7.- El hidrograma de escurrimiento de la cuenca

3.1.2 Métodos empleados en el Modelo Pronóstico de Ecurrimiento (MPE)

3.1.2.1 Modelo de precipitación (Método de Shepard)

La precipitación distribuida en la cuenca se obtiene interpolando la lluvia registrada en la red de estaciones pluviográficas. La interpolación se realiza con el método de Shepard, que consiste en obtener una media pesada de los valores registrados en N sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto por interpolar a los puntos con datos que lo rodean. El método de Shepard es parecido al del inverso de la distancia, pero introduce procedimientos de mínimos cuadrados.

La función $hp: z = hp(x, y)$ para $(x, y) \in B$, donde B es una región arbitraria del plano x, y ; se interpola para los puntos x_j, y_j dados por la función:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) hp_j \quad (3.1)$$

Donde el factor de peso de cada estación se determina como:

$$w_j(x, y) = \frac{1}{r_j^\mu} \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^\mu}} \quad (3.2)$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (3.3)$$

Donde:

$\phi(x, y)$.- Punto por interpolar

N .-Número de estaciones de lluvia

w_j .-Factor de peso en la estación j

hp_j .-Lluvia en la estación j

$r_j(x, y)$.-Distancia desde el punto (x, y) a la estación j

μ .- Coeficiente de calibración.

Nota:

Se recomienda que $2 \leq \mu \leq 6$

A la ecuación 3.1 se le llama método global o general de Shepard, debido a que considera todos los puntos N . en algunas ocasiones es necesario limitar el número de datos por interpolar. Shepard ha indicado una modificación para el cálculo de $w_j(x, y)$, la cual utiliza solamente los puntos (x_j, y_j) de un círculo de radio R alrededor del punto (x, y) . A este procedimiento se le llama método local de Shepard, donde w se determina con los parámetros de Franke-Little:

$$\xi_j = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{cases} \quad (3.4)$$

Donde:

R .-Distancia máxima a considerar para hacer la interpolación

$r_j(x,y)$. –Distancia desde el punto (x,y) a la estación j

La ecuación para determinar el factor de peso w resulta

$$w_j(x,y) = \frac{\xi_j^u(x,y)}{\sum_{i=0}^N \xi_j^u(x,y)} \quad (3.5)$$

3.1.3 Modelo de producción del escurrimiento. método de número de curva.

El método de número de curva del *Soil Conservation Service* (SCS-CN) se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son, respectivamente:

$$p = p_e + I_a + F_a \quad (3.6)$$

$$\frac{p_e}{p - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (3.7)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3.8)$$

Donde

p .-Precipitación total

I_a .-Infiltración inicial

F_a .-Infiltración acumulada

p_e .-Precipitación efectiva

S .-Infiltración potencial máxima

La versión actual del método supone que $I_a = 0.2S$ para aplicaciones prácticas

La forma más extendida del método se determina a partir de la combinación de las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8

$$p_e = \frac{(p - I_a)^2}{p - I_a + S}; I_a \leq p \quad (3.9)$$

Sustituyendo $I_a = 0.2S$ en la ecuación

$$p_e = \frac{(p - 0.2S)^2}{p + 0.8S} \quad (3.10)$$

El valor de S, en centímetros, está dado por

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times CN)}{CN} \quad (3.11)$$

3.1.4 Pérdidas por evapotranspiración (Factor de olvido)

Para considerar el secado del suelo después de una lluvia, se agregó en el cálculo de la precipitación un parámetro que se denominó factor de olvido, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo. Con este parámetro se considera las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra. De lo contrario, al presentarse un segundo evento de lluvia, el suelo se encontraría saturado y escurriría todo lo que llueve, lo cual no es real.

Al usar el factor de olvido, se calcula la precipitación acumulada neta.

$$p_{an} = p_1(fx^{n-1}) + p_2(fx^{n-2}) + \dots + p_n(fx^{n-n}) \quad (3.12)$$

Donde

p_{an} .-Precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n , cm

p_n .-Precipitación en el intervalo de tiempo n , cm

fx .-Factor de olvido

La precipitación acumulada neta sustituye a la acumulada total P en la ecuación 1.4, para estimar la precipitación efectiva.

Cuando se quiere calibrar eventos de varios días, se recomienda:

Para menor evapotranspiración, mayor escurrimiento, aumentar el valor de f_x , para mayor evapotranspiración, menor escurrimiento, disminuir el valor de f_x , en cualquier caso $0 \leq f_x \leq 1$.

3.1.5 Modelo de transferencia de escurrimiento método de Clark modificado

La transferencia del escurrimiento desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida se puede modelar por medio de una agregación simple, usando un hidrograma unitario distribuido. El método más popular es el hidrograma unitario distribuido de Clark modificado (Figura 3.1), que consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda inicial hasta la celda de salida, combinado un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación en un embalse lineal.

Este método requiere la estimación de tres parámetros para determinar el hidrograma de la cuenca; el histograma tiempo-área, el tiempo de concentración T_c y el coeficiente de atenuación por almacenamiento k .

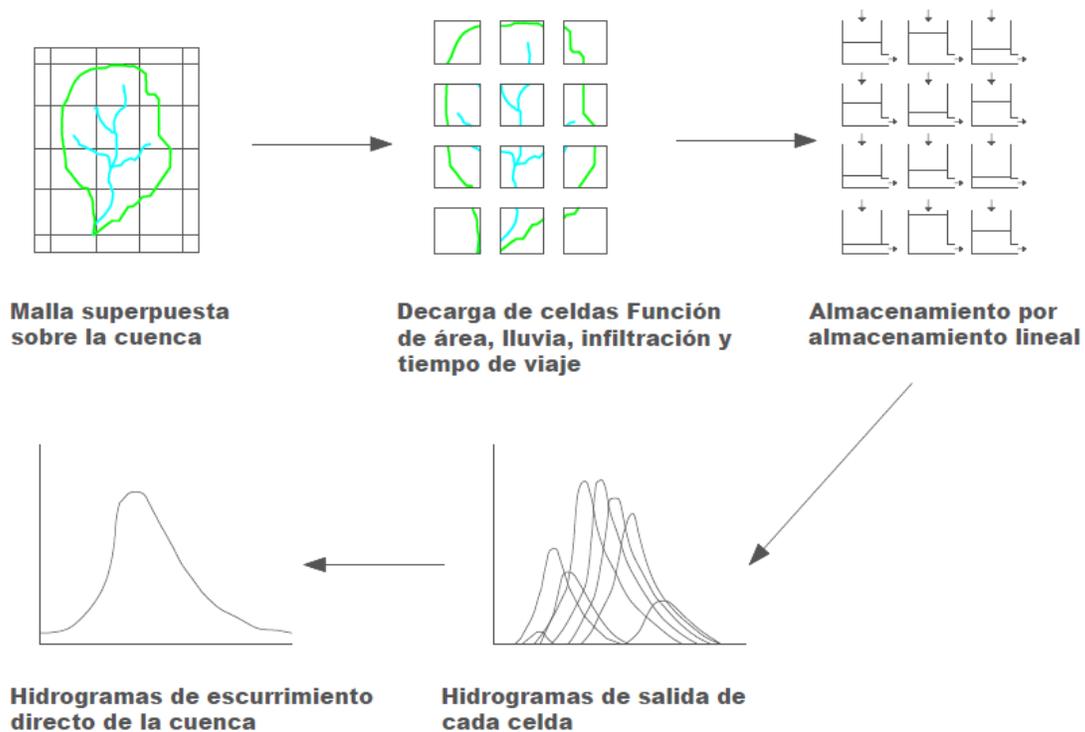


Figura 3.1 Modelo de escurrimiento conceptual ModClark para parámetros distribuidos

El tiempo de concentración T_c se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto de vista hidráulicamente más remoto. Es una medida de retraso puro. Sin tomar en cuenta el efecto de almacenamiento. En la bibliografía

existen varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración T_c ; la ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (3.13)$$

Donde:

T_c .-Tiempo de concentración, h

L .-Longitud del cauce principal, m

S .-Pendiente del cauce principal

El coeficiente de atenuación por almacenamiento, k , es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

Para usos prácticos:

$$k = 0.6T_c \quad (3.14)$$

Donde

k .-El coeficiente de almacenamiento, h

T_c .-Tiempo de concentración, h

Al escurrimiento transitado se le aplica el método de Muskingum, para considerar el tiempo de retraso o por almacenamiento.

$$S_{prismas} = kO \quad (3.15)$$

$$S_{cuña} = kx(I - O) \quad (3.16)$$

$$S = kx[I + (1 - x)O] \quad (3.17)$$

Donde

S .-Almacenamiento en el tramo considerado

I .-Caudal de entrada en ese tramo

O .-Caudal de salida de ese tramo

k y x .-Constantes para ese tramo del cauce.

Aplicado a dos intervalos de tiempo:

$$S_1 = k[xI_1 + (1-x)O_1] \quad (3.18)$$

$$S_2 = k[xI_2 + (1-x)O_2] \quad (3.19)$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \quad (3.20)$$

$$C_0 = \left(\frac{-kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (3.21)$$

$$C_1 = \left(\frac{kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (3.22)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (3.23)$$

$$C_0 = C_1 + C_2 = 1 \quad (3.24)$$

Despreciando el almacenamiento en cuña $x = 0$, resulta:

$$C_0 = C_1 = \left(\frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad (3.25)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad (3.26)$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \quad (3.27)$$

El histograma tiempo-área representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca, en un tiempo dado. Esta área se obtiene mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se complementa estimando el escurrimiento en las laderas y el tiempo de viaje de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante, dada por la relación entre la distancia del punto más alejado de la salida de la cuenca entre el tiempo de concentración.

Una vez determinado el tiempo de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca, el área de la cuenca se divide en zonas de igual tiempo de viaje (isócronas). Al relacionar las áreas entre isócronas con el intervalo de tiempo correspondiente se obtiene el histograma tiempo-área de la cuenca.

En el SIG se obtiene las longitudes de viaje de cada celda, que posteriormente son convertidas por el MPE en tiempos de viaje para crear las isócronas que requiere el método de Modificado de Clark para la transferencia del escurrimiento:

$$T_t = T_c \left(\frac{L_{vN}}{L_{vn}} \right) \quad (3.28)$$

Donde:

T_c .-Tiempo de concentración, h

T_t .-Tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza, h

L_{vN} .-Longitud de viaje de la celda más lejana

L_{vn} .-Longitud de viaje de la celda que analiza

3.1.6 Calibración

Para cada cuenca es necesario calibrar los parámetros Ia , S y f_x (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros Tc , k (llamados parámetros de forma), y comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.

3.2 Modelo Iber

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento a superficie libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de mareas en estuarios.

El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

3.2.1 Módulo hidrodinámico.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad.

3.2.2 Fricción de Fondo

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido; la fricción de fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción U_f , que no es más que una forma de expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad.

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3.29)$$

Donde:

τ_b .-Es el modulo de la fuerza de fricción de fondo

ρ .-Es la densidad del agua

3.2.3 Infiltración en Iber

En la simulación de procesos de precipitación es necesario considerar la infiltración de agua en el terreno no saturado para el cálculo del escurrimiento superficial. El modelado de la infiltración de agua superficial en el terreno es especialmente importante en la simulación de la transformación de lluvia-escurrimiento.

La infiltración se considera en el modelo mediante un término negativo en la ecuación de conservación de masa.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = -j \quad (3.30)$$

Donde i es la tasa de infiltración real, calculada como el mínimo entre la tasa de infiltración potencial f (capacidad de infiltración del terreno en cada instante, que depende de las condiciones y características del suelo), y la cantidad de agua superficial disponible para infiltrarse.

$$i = \min\left(f, \frac{h}{\Delta t}\right) \quad (3.31)$$

Para calcular la infiltración potencial se implementan 3 modelos de infiltración comúnmente utilizados, que son los que se describen a continuación:

3.2.3.1 Modelo de Green-Ampt

La tasa de infiltración, expresada en m/s , se calcula en cada celda utilizando la formulación de Green-Ampt (Chow, 1988), en la cual se asume que existe un frente saturado que separa la región de suelo saturada, inmediatamente bajo el terreno, y la región de suelo no-saturada, en la cual existe una succión.

A medida que la infiltración aumenta, el frente saturado desciende y la anchura de la región saturada L aumenta. La tasa de infiltración potencial f se calcula con la siguiente expresión:

$$f = k_s \left(1 + \frac{(h + \psi)\Delta\theta}{L_0\Delta\theta + F} \right) \quad (3.32)$$

$$F = \int_0^t f \, dt \quad (3.33)$$

$$L = L_0 + \frac{F}{\Delta\theta} \quad (3.34)$$

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i \quad (3.35)$$

Donde:

k_s .-La permeabilidad saturada del suelo

h .-Tirante o profundidad

ψ .-La succión en la región de suelo no saturada

$\Delta\theta$.-El cambio en la humedad del suelo a medida que el frente de saturación avanza

θ_i .-La humedad inicial del suelo

ϕ .-La porosidad total del suelo

L .-El espesor de la región de suelo saturada

La tasa de infiltración real es igual a la tasa de infiltración potencial siempre y cuando haya suficiente agua superficial para infiltrarse.

Los parámetros a introducir por el usuario para este modelo son:

- a) Permeabilidad saturada del suelo (k_s)
- b) Succión en la región del suelo no-saturado(ψ)
- c) Porosidad efectiva (drenable) del suelo (θ_e)
- d) Saturación efectiva inicial del suelo (S_e) definido como:

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_e} \quad (3.36)$$

Siendo θ_r la capacidad de retención (humedad no drenable) del suelo y θ_i la humedad inicial del suelo. La porosidad del suelo ϕ es igual a la porosidad drenable más la capacidad de retención del suelo ($\phi = \theta_e + \theta_r$). A partir de la porosidad efectiva y de la saturación efectiva inicial del suelo, se calcula el cambio en el contenido de humedad del suelo a medida que el frente de saturación avanza como:

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i = \phi - \theta_r - \theta_e S_e = \theta_e (1 - S_e) \quad (3.37)$$

Todos los parámetros de la ecuación de Green-Ampt se pueden introducir variables en espacio (diferentes para cada elemento de la malla cálculo).

3.2.3.2 Horton

En el modelo de Horton se calcula la tasa de infiltración potencial como:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-kt) \quad (3.38)$$

Siendo t el tiempo desde el comienzo de la precipitación.

Los parámetros que ingresa el usuario son:

f_c .-La tasa de infiltración a tiempo infinito

k .-La constante de variación temporal de la tasa de infiltración potencial

Las constantes antes mencionadas se pueden introducir para cada elemento de la malla de cálculo.

3.2.3.3 Lineal

El modelo lineal considera una abstracción inicial P_0 (volumen por unidad de área), y a continuación unas pérdidas continuas constantes (volumen por unidad de área y por unidad de tiempo). El valor tanto de la abstracción como de las pérdidas continuas puede variar de elemento a elemento (Figura 3.2).

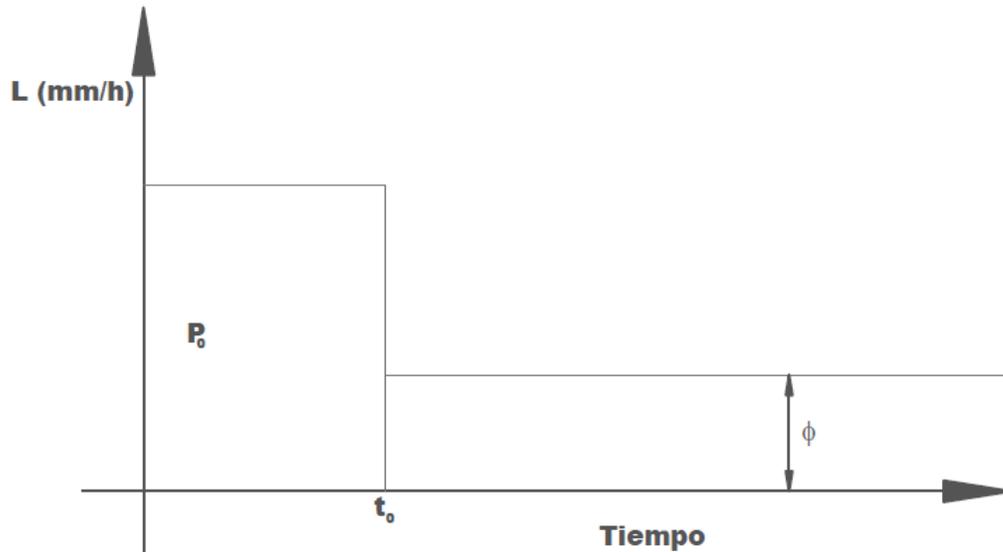


Figura 3.2 Evolución de la tasa de infiltración según el modelo lineal

4 Medio Físico

En este capítulo se describe la ubicación y las principales características climatológicas y geográficas del sitio de estudio.

4.1 Ubicación del sitio en estudio

Peñitas, junto con Malpaso, la Angostura y Chicoasén, forman un sistema de presas sobre el cauce del Grijalva, uno de los principales ríos que llega a la planicie de Tabasco, que además de controlar las avenidas del mismo, generan cerca del 25% del total de energía hidroeléctrica disponible del país. De ellas, la más grande es la angostura, ubicada en la parte más alta de Chipas, y río abajo está Chicoasén y después Malpaso, más adelante está Peñitas ubicada en Tabasco (Figura 4.1).

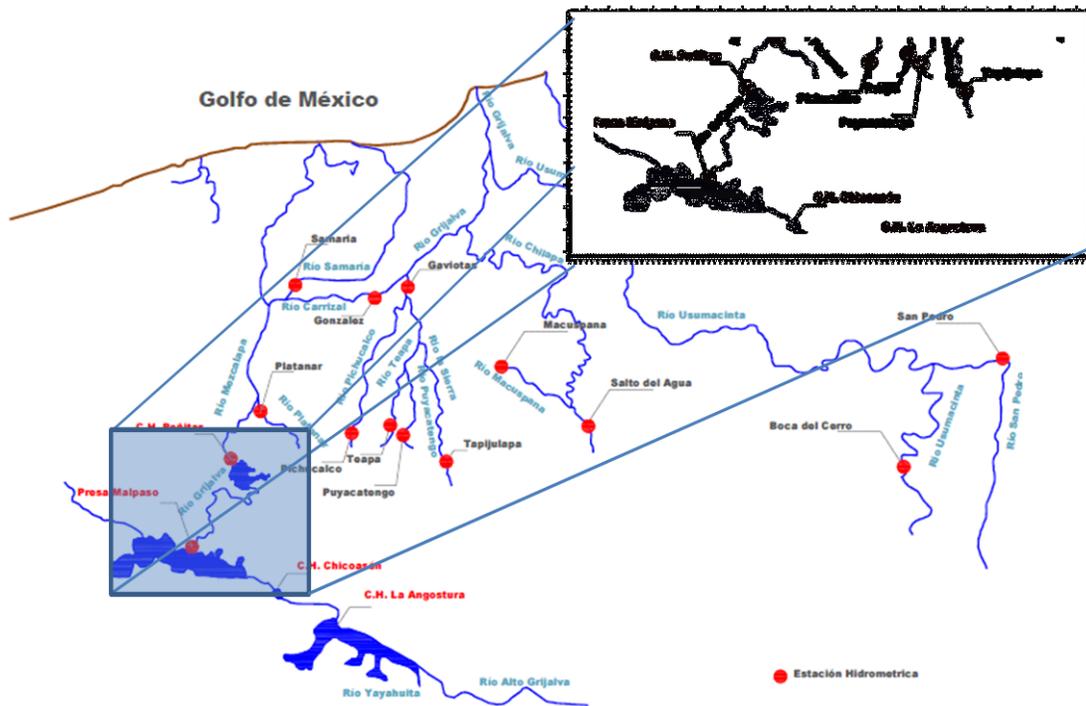


Figura 4.1 Río Grijalva y ubicación de la cuenca Peñitas.

4.2 Hidrología de la cuenca del Grijalva

Con un área de 53 000 km² y una longitud de 700 km, el río Grijalva nace a 4 026 m de altura en el volcán Tacaná, en Guatemala; en Chiapas la corriente sigue con una dirección sureste-noreste, a todo lo largo de la Depresión Central del mismo estado. Posteriormente, corta la Meseta Central por el Cañón del sumidero, recorre las sierras del norte y desciende en la llanura tabasqueña hasta que se une al río Usumacinta, desembocando juntos en el Golfo de México. El Grijalva en México se llama Río Cuilco; en el Cañón de la Angostura se llama Río Chejil; en la Depresión Central, Río Grande de Chiapas; en el Cañón del Sumidero, Río Mezcalapa y en su parte final Río Grijalva.

La precipitación de la región es la mayor del país y una de las más altas del mundo. Su media anual es del 2 143 mm, 2.6 veces la media nacional. En la Sierra Chiapas y en la sierra de la Lacandona, las lluvias sobrepasan en algunos lugares los 4 000 mm al año y llegan hasta los 5 000 mm, mientras que en la zona costera del norte promedia 2 093 mm al año y alcanza los 2 750 mm. La temperatura media anual es de 24 °C y de 7 °C y 41 °C en los extremos, lo que establece un gradiente de climas cálidos y semicálidos húmedos con influencia marina en la zona norte y en la parte central de la región.

La invasión de masas de aire frío del norte y húmedos tropicales del Atlántico y el Pacífico provocan la mayoría de las precipitaciones anuales en la región. En el verano las lluvias son muy intensas. Entre otoño y el invierno soplan los nortes, con lluvias prolongadas y torrenciales. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos niveles entre septiembre y noviembre, lo que vuelve a la planicie un espejo de agua. Es la época de inundaciones, que provoca desastres en la agricultura y las poblaciones asentadas en la llanura costera del norte.(INE, 2005)

4.3 Localización de la cuenca Peñitas

Localizada en el suroeste de México en la región hidrológica del Bajo Grijalva se encuentra la cuenca Peñitas entre el extremo norte de Chiapas y la frontera con Tabasco.

El área de estudio comienza de la cortina de la presa Malpaso hasta la salida de la cuenca peñitas; es de 1 300 km². Su cauce principal formado de las aportaciones por cuenca propia y del agua turbinada por la presa Malpaso tiene una longitud de 116 km. El escurrimiento medio anual es de 3 686 millones de m³ (Figura 4.2)

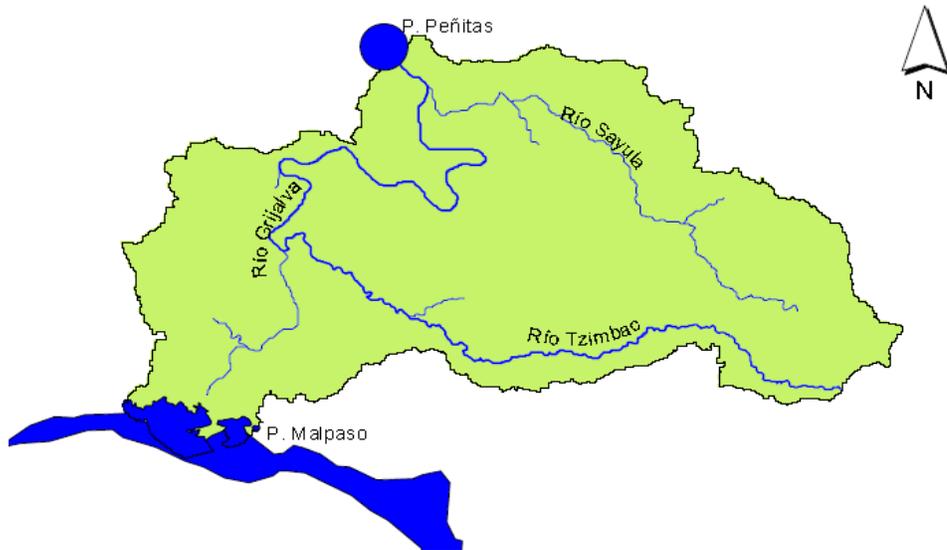


Figura 4.2 Cuenca Peñitas con sus corrientes principales.

4.4 Edafología y cobertura vegetal

La cobertura vegetal se encuentra relacionada con factores como el suelo, el agua y el clima. En el Bajo Grijalva se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, son series de serranía separados por alargados valles que bordean a los Altos y las montañas del Oriente.

La disposición de la montaña permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que proporciona un clima húmedo con lluvias todo el año. La pérdida de suelos por erosión hídrica extrema y muy extrema afecta al 89 % del territorio de Tabasco y al 83 % del territorio de Chiapas y alcanza valores de pérdidas de suelo mayores a las 500 ton/ha/año. La erosión hídrica es especialmente crítica en la Sierra Madre de Chiapas, Los Altos de Chiapas y en las montañas marginales del norte, donde los valores van de severos a extremos (mayores a 100 ton/ha/año); severa y alta (de 25 a 100 ton/ha/año) en la Selva Lacandona, Valles centrales y Malpaso, provocados y acelerados por los intensos procesos de deforestación que ocasiona la erosión de laderas, frecuentes derrumbe y caídas de árboles que obstruyen el flujo de agua y provocan taponamientos e inundaciones. (INE, 2005)

En hidrología se clasifica al suelo de acuerdo a su permeabilidad como Muy Alta, Buena, Media y Baja, la cual se relaciona con el grupo hidrológico A, B, C y D, respectivamente. En un suelo tipo A, el escurrimiento es mínimo, arenas con poco limo y arcilla, en un tipo D se presenta escurrimiento máximo, arcillas en grandes cantidades, suelo poco profundo con subhorizontes casi impermeables. (Domínguez et al, 2008)

La cuenca Peñitas presenta en la mayor parte de su superficie permeabilidad baja, Figura 4.3, por ser un suelo abundante en arcillas, Figura 4.4. En cuanto al uso de suelo se tiene que el 10 % es zona urbana, el 45% es de pastizal y el 38% es de zona selvática, los cuerpos de agua ocupan un 5% de la superficie de la cuenca Figura 4.5.

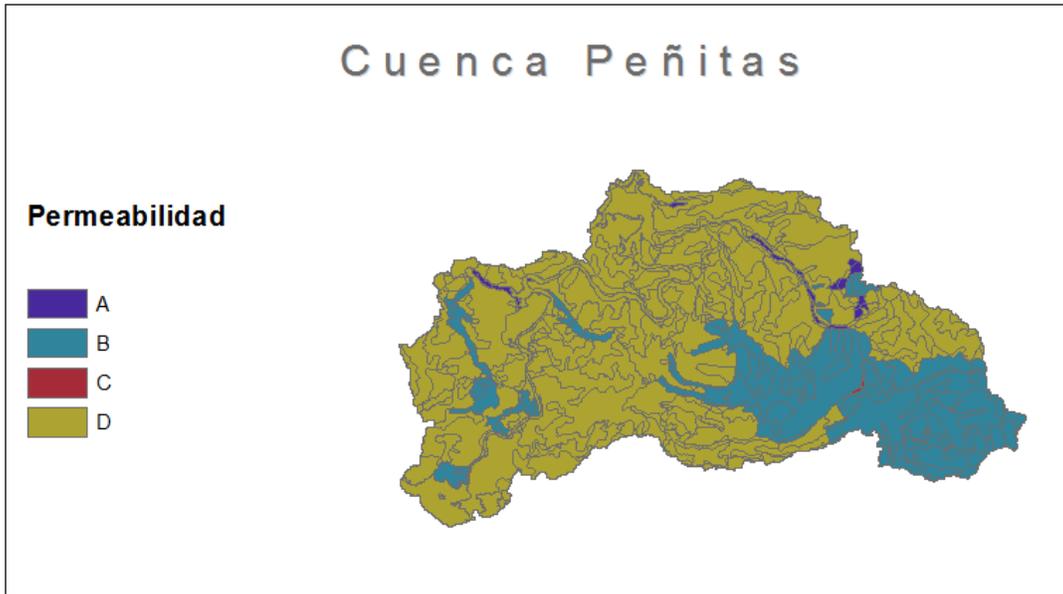


Figura 4.3 Permeabilidad de la cuenca Peñitas.

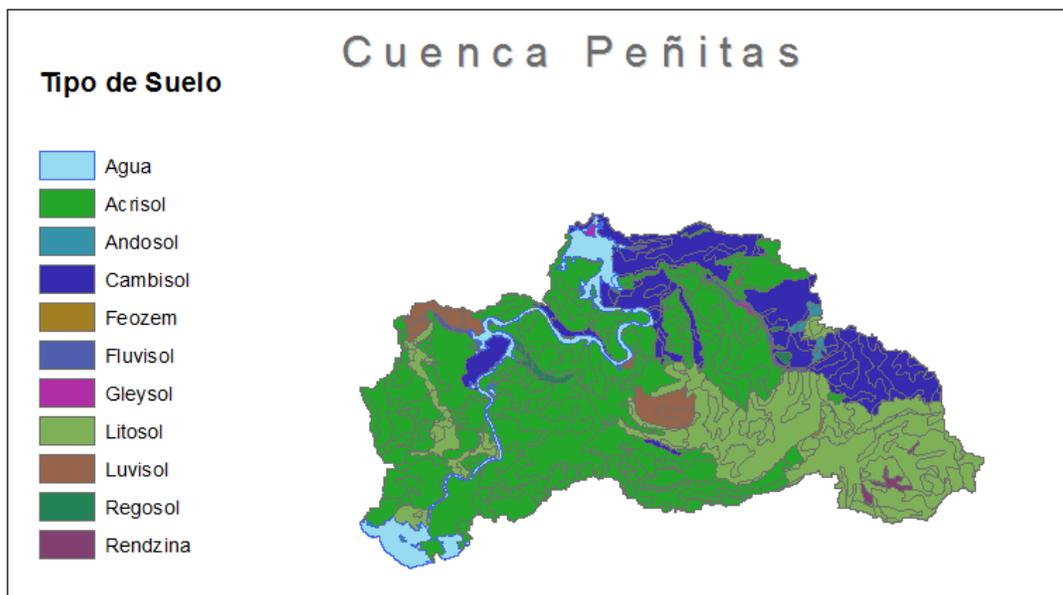


Figura 4.4 Tipos de suelo de la cuenca Peñitas.

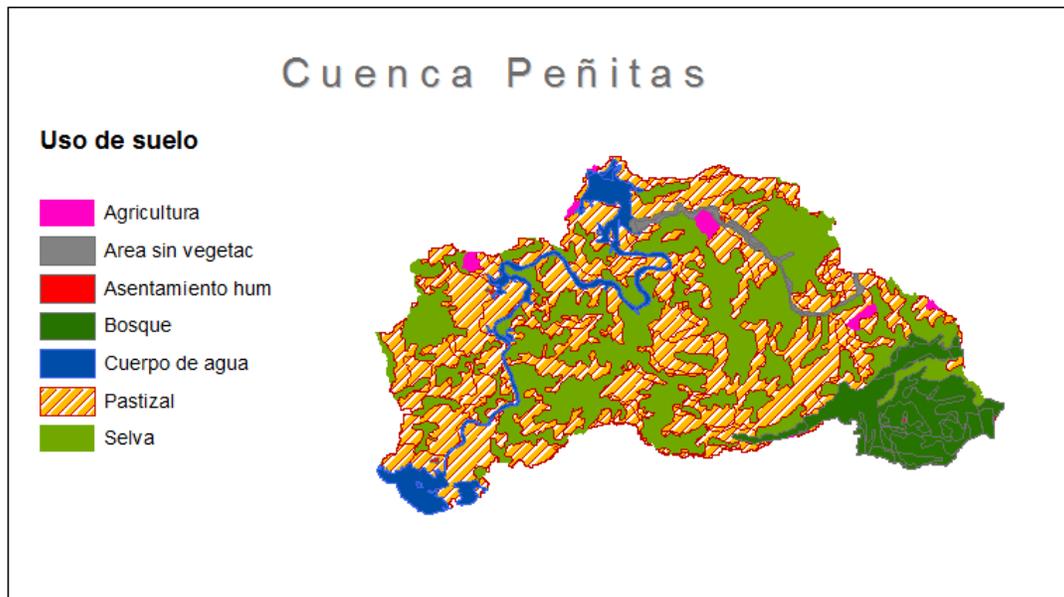


Figura 4.5 Usos de suelos de la cuenca Peñitas.

4.5 Infraestructura hidráulica de la cuenca Peñitas

Dentro de la cuenca en estudio se localiza la presa Peñitas, con una capacidad útil de 130 millones de m^3 ; el nivel de aguas máximo (NAMO) está a los 87.4 m.s.n.m., el nivel mínimo de operación (NAMINO) está a los 85 m.s.n.m., y su nivel medio de desfogue está a 53 m.s.n.m.; el nivel de aguas máximo extraordinario (NAME) se ubica a los 90 m.s.n.m. El máximo volumen mensual turbinable es de 3784 millones de m^3 . Tiene una capacidad instalada de 500 MW. (Arganis, 2004)

Actualmente la cuenca Peñita cuenta con una red de estaciones automáticas de medición, pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad CFE, las cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

- 2 estaciones climatológicas: Ocoatepec y Emiliano Zapata
- 4 estaciones hidrométricas y climatológicas: Peñitas, Sayula, Malpaso y Rómulo Calzada

La información de las estaciones pasadas se reporta en intervalos de 60 minutos.

En la Tabla 4.1 se pueden dar algunas especificaciones técnicas de cada una de las estaciones antes mencionadas.

Tabla 4.1 Estaciones automáticas de CFE utilizadas en la modelación de Peñitas y Chicoasen

Estación	Latitud	Longitud	Fecha de Inicio	Cuenca	Tipo de Estación
Peñitas CFE	17°26'42"	93°27'28"	09/09/2005	Peñitas	Climatológica e Hidrométrica
Sayula CFE	17°24'8"	93°19'55"	27/10/2005	Peñitas	Climatológica e Hidrométrica
Malpaso	17°11'58"	93°36'17"	19/09/2005	Peñitas	Climatológica e Hidrométrica
E. Zapata	17°13'0"	93°20'32"	25/10/2005	Peñitas	Climatológica
Ocoatepec CFE	17°13'30"	93°9'35"	21/10/2005	Peñitas	Climatológica
R Calzada CFE	17°21'14"	93°33'6"	23/10/2005	Peñitas	Climatológica e Hidrométrica

En la Figura 4.6 se muestran las estaciones climatológicas e hidrométricas de CFE utilizadas en la cuenca en estudio.

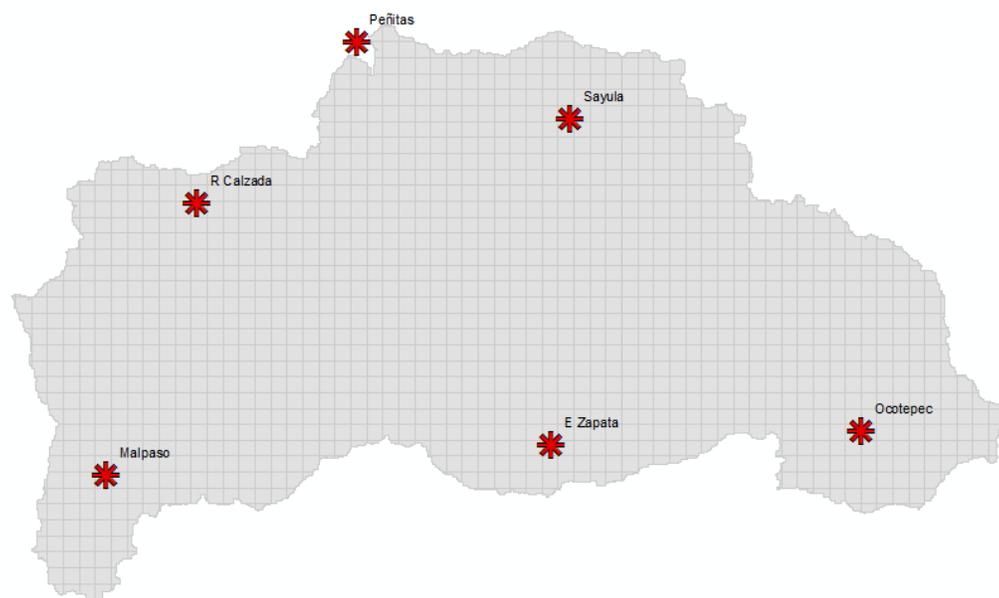


Figura 4.6 Estaciones que se utilizaron para el análisis de la cuenca Peñitas

4.6 Selección de las tormentas de Análisis

Para llevar a cabo la calibración de la cuenca se seleccionaron las tormentas que provocaron algún evento extraordinario como: inundaciones y que se tuviera información en las estaciones automáticas.

La distribución de la lluvia en la cuenca Peñitas se obtuvo de la interpolación de los registros de CFE. Los registros de estas estaciones se reportan cada 60 minutos por radio.

Para fines de comprobación se utilizó la base de datos CLICOM, para los años en los que no se tenga datos en las estaciones automáticas.

En la Tabla 4.2 se enlistan las tormentas seleccionadas para la calibración del modelo en la cuenca Peñitas.

Tabla 4.2 Muestra el día de inicio y el día del término de las tormentas utilizadas para calibrar el modelo

Numero de Tormenta	Fecha del inicio de la tormenta	Fecha del fin de la tormenta
1	1 de Octubre de 2005	26 de Octubre de 2005
2	22 de octubre de 2007	5 de Noviembre de 2007
3	30 de Mayo de 2008	4 de Junio de 2008
4	17 de Septiembre de 2008	26 de Septiembre de 2008

5 Aplicación

En esta sección se describe cómo se aplicaron los modelos MPE e Iber al caso de estudio; se explica el procedimiento de preparación de los archivos de datos con los que se alimenta cada programa.

5.1 Aplicación del modelo MPE

En este apartado se presenta la aplicación del MPE a la cuenca Peñitas y los resultados obtenidos.

Se desarrolla la modelación en el programa MPE con la siguiente información:

- Fecha de análisis 22/10/2007, 1:00 al 05/11/2013, 24:00
- ΔT 60 min
- Archivo de celda (modclarkcnpeñitassinmalpaso.txt)
- Archivo de lluvias (llupenitas22octal5nov07.txt)

Dentro del programa:

5.1.1 Información inicial

Dentro del menú **información** se encuentra el submenú **información inicial**, en el cual se ingresan los datos de fecha y hora inicial, así como de fecha y hora final del evento de lluvia a analizar, el ΔT en (min.), se selecciona aceptar (Figura 5.1).

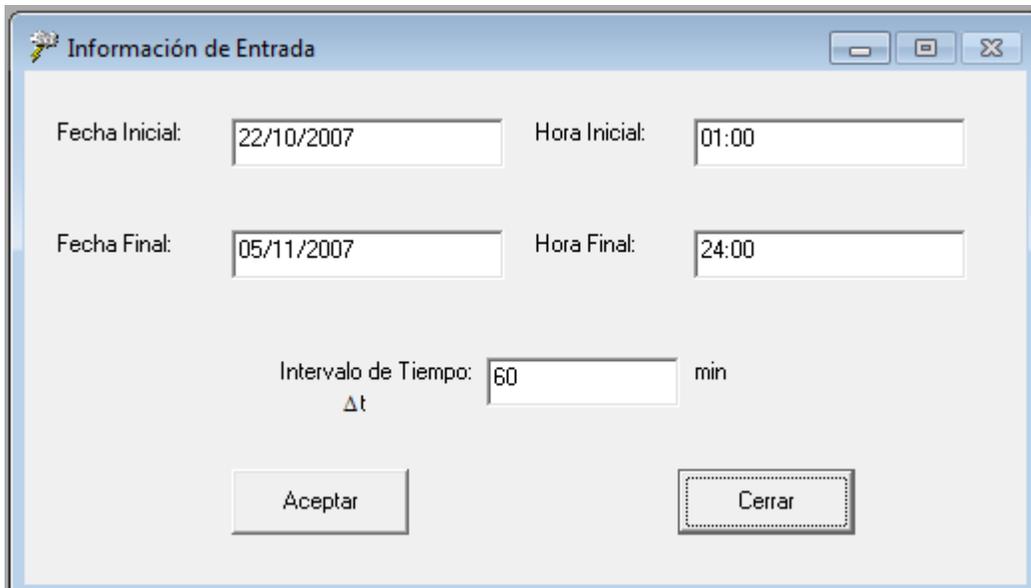


Figura 5.1 Ventana donde se ingresa la información inicial.

Aparecerá la pantalla de **archivos de entrada**. Se busca y se selecciona el archivo que contiene los parámetros hidrológicos de la cuenca en este caso el archivó es “modclarkcnpañitassinmalpaso.txt”. También se selecciona el archivo que contiene la información de la lluvia en el caso de aplicación es “llupelitas22octal5nov07.txt”; se oprime aceptar ver Figura 5.2.

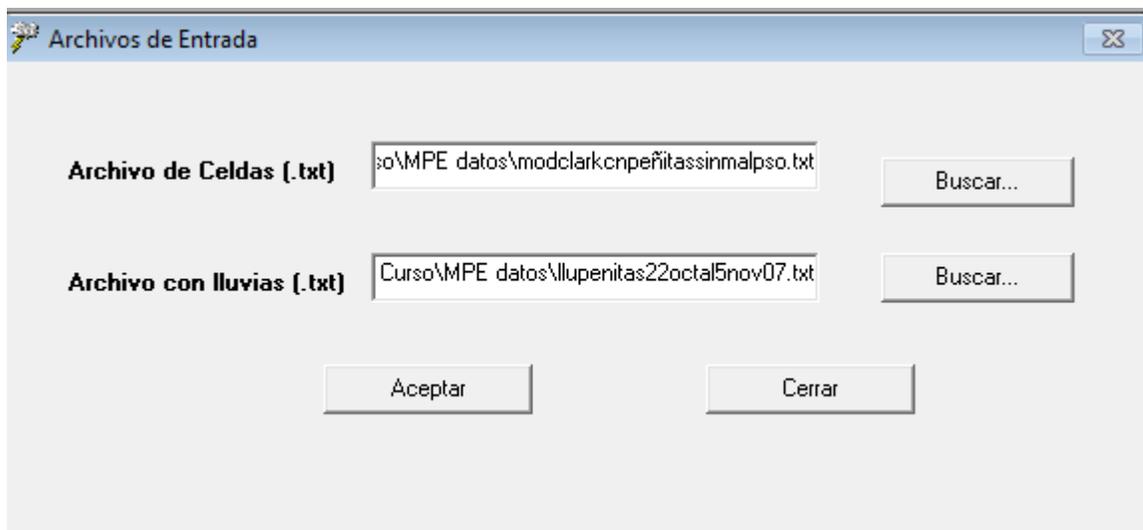


Figura 5.2 Ventana donde se ingresa el archivo de parámetros hidrológicos y el archivo de lluvia.

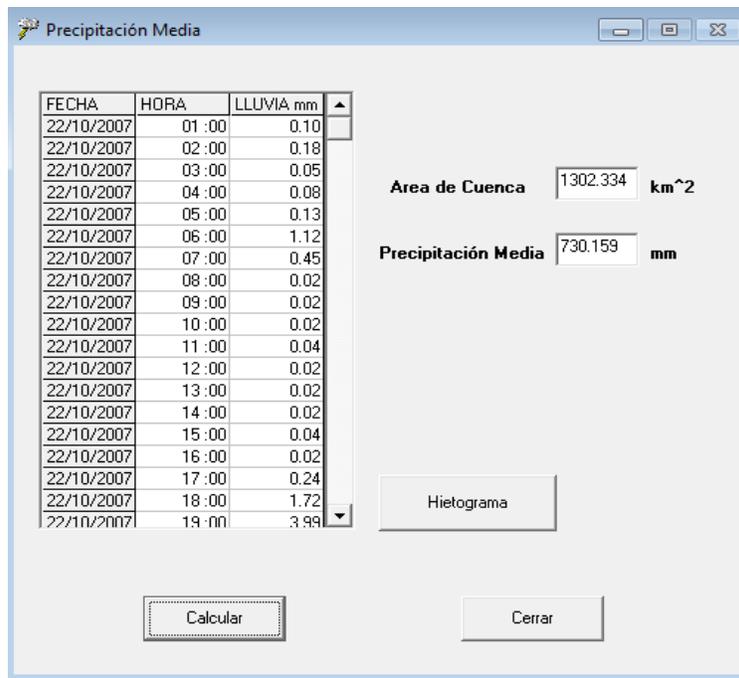


Figura 5.4 Resultados calculados por MPE.

En la Figura 5.4 se observa que el área que marca el MPE es de 1302.334 km² la cual es la misma calculada por el SIG.

Para obtener el hietograma de la precipitación media, se da *click* en el botón hietograma, el cual está en la ventana de precipitación media. El programa MPE proporciona el hietograma de los datos analizados como se muestra en la Figura 5.5.

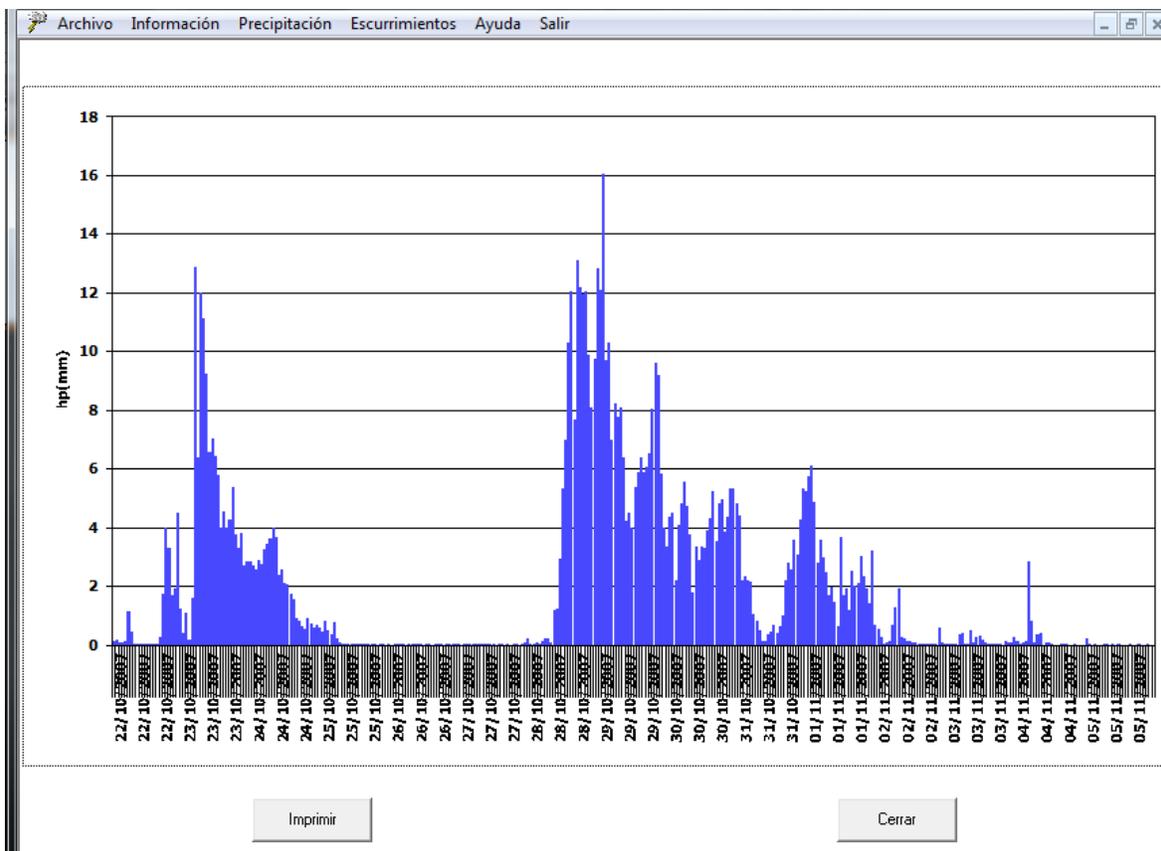


Figura 5.5 Hietograma que proporciona el MPE.

En la Figura 5.5 se puede observar que cada barra del hietograma tiene una duración de una hora y la lámina de lluvia máxima es de 16 mm.

5.1.3 Escurrimiento

Dentro del menú **escurrimiento** está el submenú **observado**, se selecciona y aparece una ventana que se muestra en la Figura 5.6. El primer renglón corresponde a **observaciones**, este apartado se puede quedar vacío o se pueden poner notas importantes sobre consideraciones para los cálculos realizados.

Los siguientes campos que tienes que definir son los datos de fecha y hora del análisis en este caso la fecha de inicio es 22/10/2007 y la hora de inicio es 01:00, la fecha final es 05/11/2007 y la hora final 24:00, con un intervalo de tiempo de 60 min.

Después se da *click* en **ingresar datos**, y aparecerá la columna de las horas. Se da *click* en el botón **ingresar tabla**, se selecciona el archivo que contiene los datos de los escurrimientos medidos en el caso de aplicación es "QPenitas22Octal5Nov07" y se da *click* en el botón aceptar.

Observaciones:

(sin comas)

Fecha de inicio: Fecha de final:

Hora de Inicio: Hora final:

Intervalo de Tiempo: min

Hora	Q Total (m ³ /s)	Q Directo (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)
01:00	398.07	0	0
02:00	130.952	0	0
03:00	600.696	0	0
04:00	294.454	0	0
05:00	301.383	0	0
06:00	289.373	0	0
07:00	395.668	0	0
08:00	407.937	0	0
09:00	458.985	0	0
10:00	427.15	0	0
11:00	395.313	0	0
12:00	401.712	0	0

Figura 5.6 Ventana de esguerrimiento observado.

Dentro del menú **esguerrimientos** se selecciona el submenú **hidrograma**, el cual despliega la tabla **parámetros de calibración** que se muestra en la Figura 5.7.

Los parámetros que se pueden editar son: **parámetros de pérdidas** los cuales son los siguiente: factor de escala de pérdida inicial (λ) que es 0.2, factor de escala de retención potencial que es 1 y el factor de olvido que es 0.995, los valores anteriores fueron obtenidos a partir de una calibración previa del modelo y de la cuenca.(Domínguez et al, 2009)

El siguiente apartado son los **parámetros de forma** que están compuestos por: tiempo de concentración ($T_c > \Delta t$) que es de 8 horas y el coeficiente de almacenamiento ($Ca > \Delta t/2$) que es de 6 horas, para el caso de estudio, valores obtenidos de estudios previos. (Domínguez, 2009)

Después quedan los parámetros de **esguerrimiento base**, los cuales contemplan 3 posibles opciones: esguerrimiento constante, sin esguerrimiento base y el método de recesión, en el caso de

aplicación se calculo un gasto base de 350 m³/s, debido a que es un gasto promedio que fluye por el cauce estudiado.

PARAMETROS DE CALIBRACIÓN

PARAMETROS DE PERDIDAS

Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)

Factor de Escala de Retención Potencial

Factor de olvido

PARAMETROS DE FORMA

Tiempo de concentración (hr):
 $T_c > \Delta t$

Coeficiente de Almacenamiento (hr):
 $C_a > \Delta t/2$

ESCURRIMIENTO BASE

Escorrentamiento Constante m³/s

Método de Recesión

Gasto Inicial: m³/s

Cte de Recesión:

Gasto Final: m³/s

Sin Escorrentamiento Base

Hidrograma Restaurar Cerrar

Figura 5.7 Ventana de parámetros de calibración.

Al terminar de editar los parámetros de calibración; se da *click* en el botón de hidrograma y se obtiene las graficas que se pueden ver en la Figura 5.8 donde en la primera gráfica se muestra la lluvia en exceso y las pérdidas, en la segunda gráfica están el hidrograma que se observó y el hidrograma calculado.

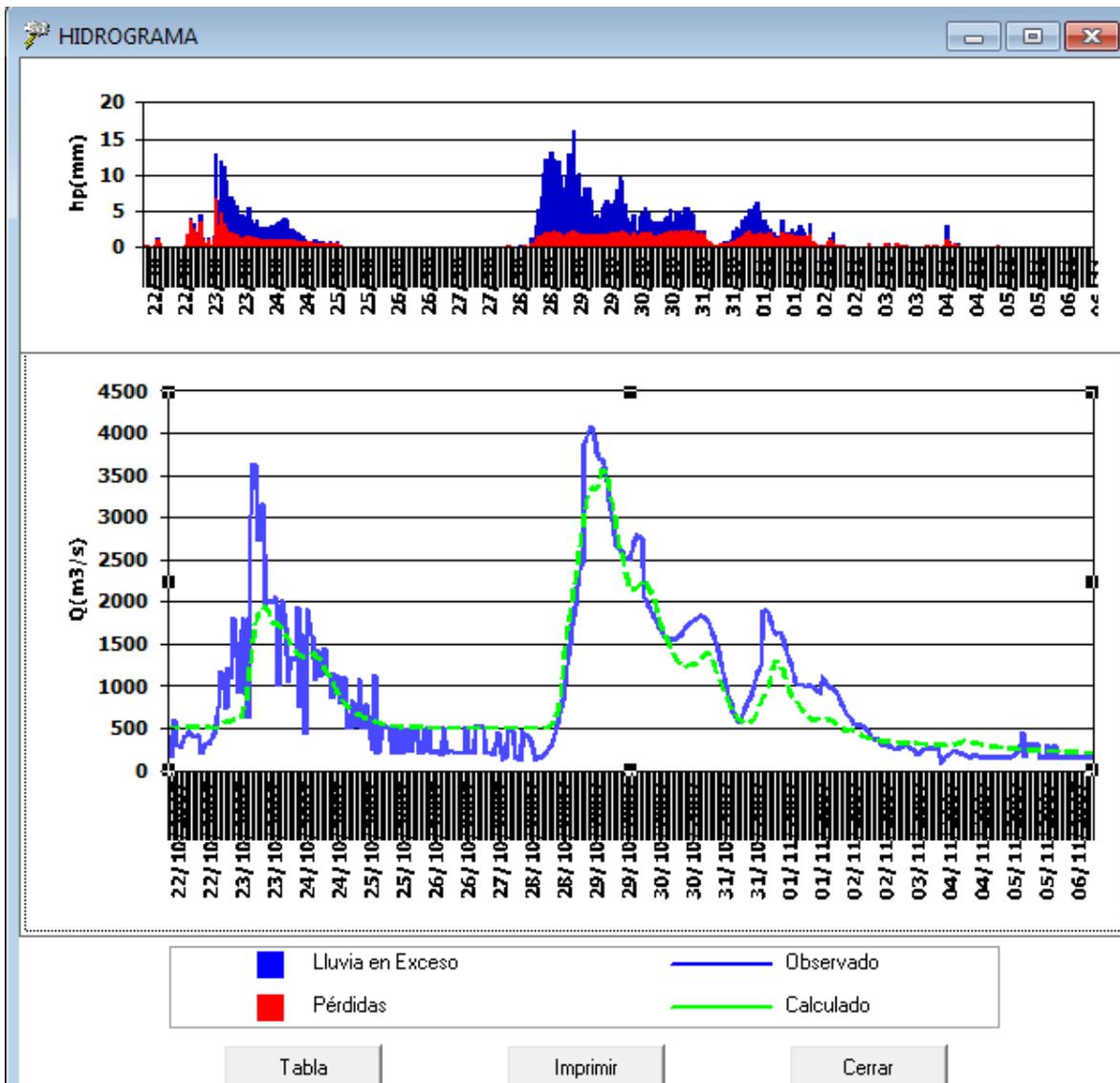


Figura 5.8 Resultados que da el MPE cuando se calcula el hidrograma.

Dentro de la nueva ventana mostrada en la Figura 5.8 se encuentra el botón de tabla, si se le da *click*, muestra una tabla resumen con los datos de fecha, hora, precipitación mm, Pérdidas mm, Exceso mm, Q Directo m³/s, Q Base m³/s, Q Total m³/s, Q DirectoObs m³/s, Q BaseObs m³/s y Q TotaObsl m³/s. La Tabla se puede ver en la Figura 5.9 y también se puede exportar con una extensión .csv (Compatible con Excel).

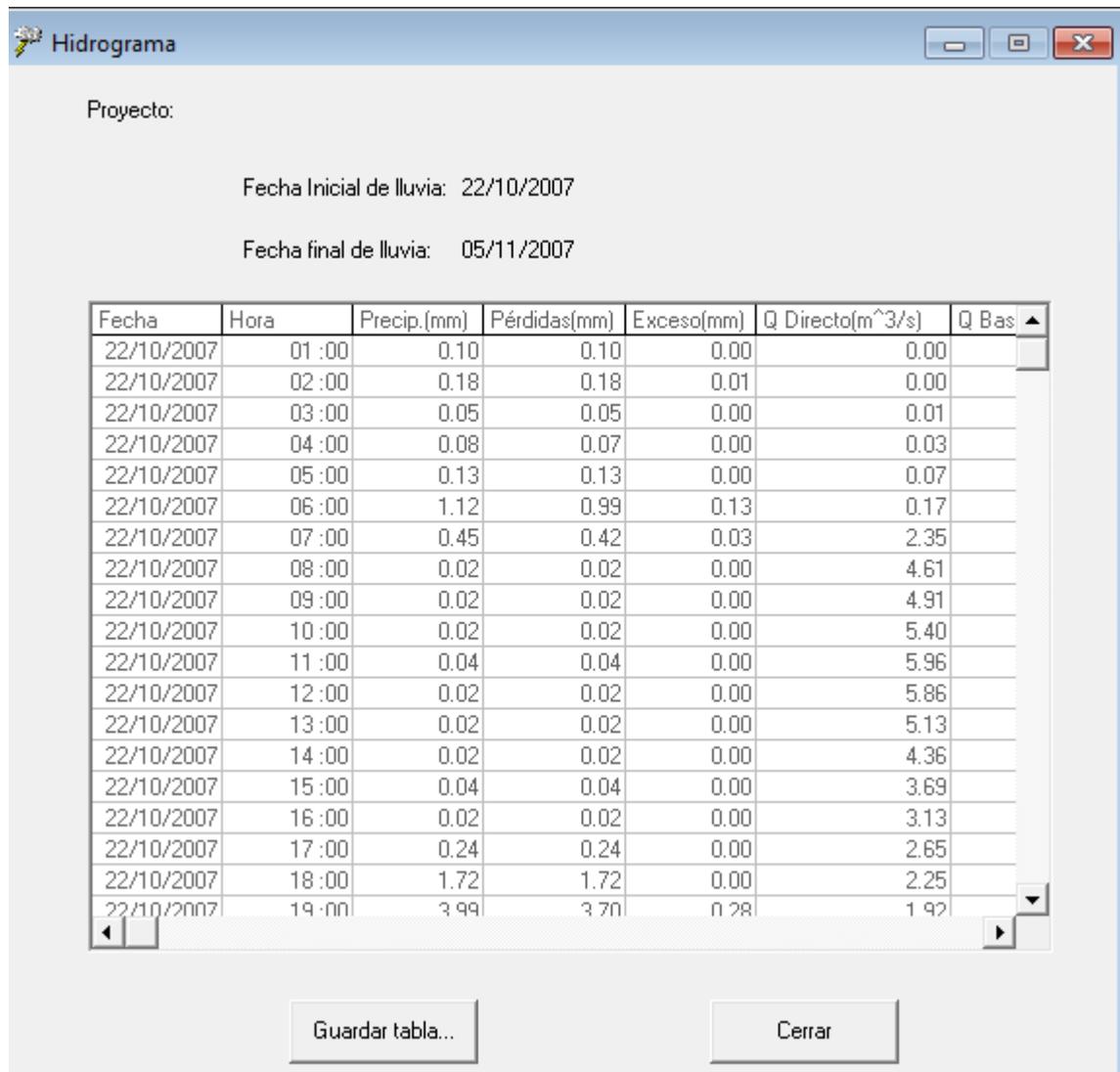


Figura 5.9 Tabla resumen del hidrograma calculado por MPE.

Finalmente del menú **escurrimientos** se selecciona el submenú **tabla resumen**, con el cual se abre una ventana adicional (Figura 5.10), la cual contiene los datos más relevantes del cálculo realizado, esta tabla se divide en varias secciones la primera de ellas es **lluvia**, en la cual se encuentran los datos de área de cuenca km², lluvia media mm, pérdidas mm, lluvia en exceso mm; el segundo apartado de la tabla es **volumen escurrido**, donde se obtienen los volúmenes de gasto total calculado, gasto directo calculado, gasto base calculado, gasto total observado, gastos directo observado y gasto total observado todos en Mm³. El último apartado da el gasto máximo observado y el gasto máximo calculado en m³/s.

TABLA RESUMEN

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca	1302.334	km ²
Lluvia media	730.159	mm
Pérdidas	268.511	mm
Lluvia en Exceso	461.648	mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	1231492.58	1165699.19	Mm3
Directo	0.000	601219.198	Mm3
Base	0.000	564480.000	Mm3

	Observado	Calculado	
Q _{máximo}	4066.562	3557.266	m3/s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Figura 5.10 Tabla resumen que genera el modelo MPE.

5.2 Aplicación del Modelo Iber

Además de aplicar el Modelo de Producción de Esgurrimento (MPE) se realizó la aplicación del modelo Iber, para la cuenca Peñitas, con el fin de comparar los hidrogramas de salida y analizar los resultados.

Para el modelo Iber se plantearon diferentes consideraciones en los parámetros de cálculo para una primera etapa de simulaciones, los resultados no fueron concluyentes, por lo que se realizaron cambios al proyecto más alentador que se obtuvo de la primera etapa.

5.2.1 Creación de la geometría en la interfaz de Iber

Para generar la geometría de la cuenca de estudio se debe de procesar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y delimitar la cuenca previamente, en este caso se utilizó el mismo archivo usado para el MPE.

El procesamiento del terreno se realizó por medio del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView, el modelo digital de elevación, escala 1:50 000 y los archivos de uso y tipo de suelo a escala 1:250 000 de INEGI.

Después de delimitar la cuenca de estudio y recortarla del archivo original; se realizó un cambio de formato a extensión .ASCII, con el fin de facilitar el ingreso de la información a la interfaz de Iber.

El primer paso para poder trabajar en Iber es generar un nuevo proyecto, con lo que se crea una nueva carpeta con extensión .gid y es donde se guardaran toda la información que se ingrese y la que se generara durante las simulaciones.

Enseguida se cargo el archivo .ASCII en la interfaz de Iber por medio de su menú **herramientas Iber**, submenú **RTIN**, en la opción **crear RTIN** (Figura 5.11), en esa opción se pide la ubicación del archivo que se utilizó y se deben dar información extra como: tolerancia, lado máximo y lado mínimo (Figura 5.12).

En la ventana mostrada en la Figura 5.12 se ingresó una tolerancia de 0.1 un lado máximo de 1 000 m y un lado mínimo de 500 m (los elementos formados en Iber son de forma triangular), para crear elementos parecidos a los que se utilizaron en el MPE, donde sus celdas medían 1 000 m por 1 000 m. Finalmente se da aceptar y el programa procesa la información para crear la geometría donde se ingresan las propiedades y los parámetros necesarios para realizar la simulación.

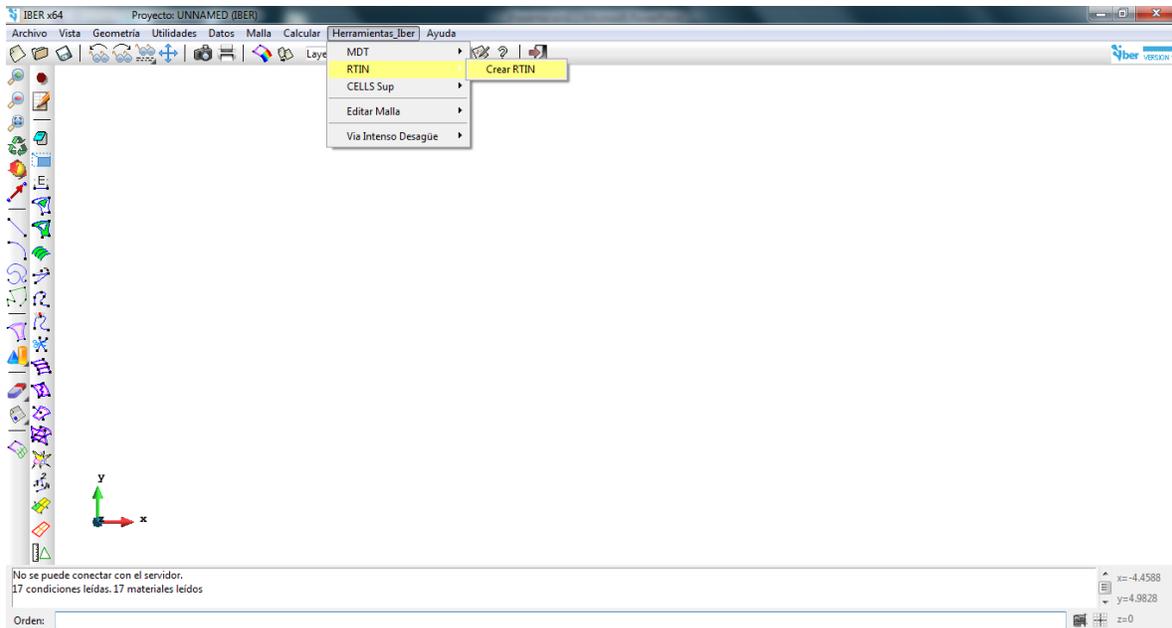


Figura 5.11 Ventana de inicio de Iber y ruta para crear el RTIN, a partir del archivo ASCII.

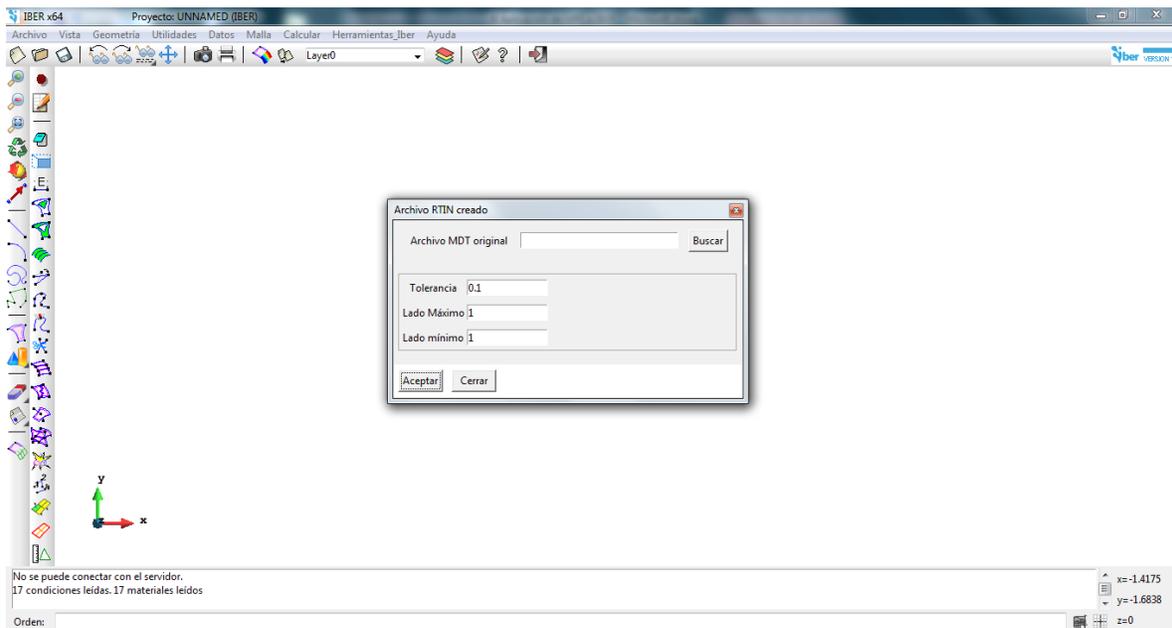


Figura 5.12 Ventana para ingresar el archivo. ASCII y datos adicionales como Tolerancia, Lado Máximo, Lado mínimo.

Al terminar de procesar la información proporcionada se obtiene la geometría de la cuenca, en el caso de estudio se puede observar el resultado en la Figura 5.13.

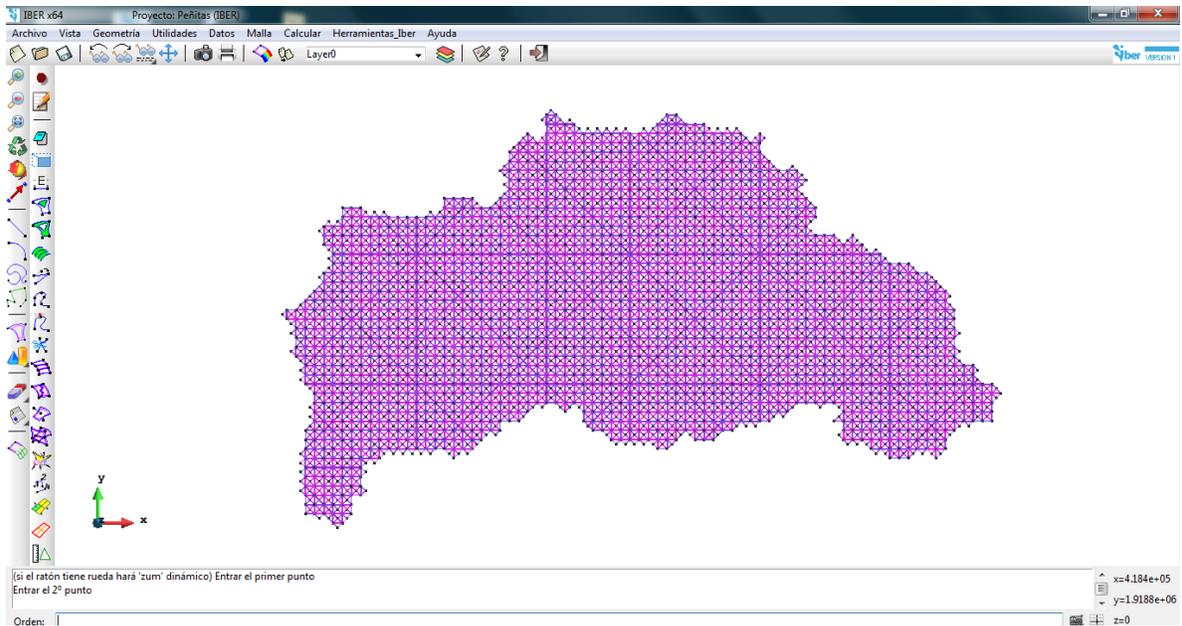


Figura 5.13 Geometría de la cuenca peñitas.

Al tener la geometría ya en la interfaz de Iber, se tiene que empezar a ingresar la información inicial y algunas consideraciones que se tendrán que asignar para el cálculo; en el menú **datos** está el submenú **datos del problema** ver Figura 5.14.

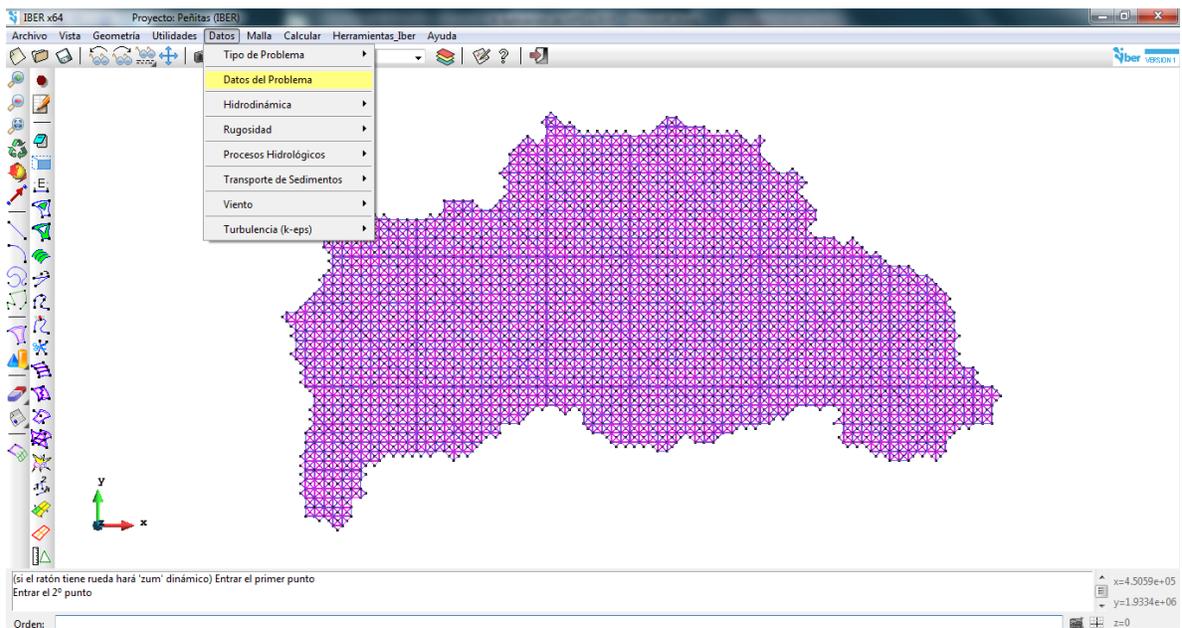


Figura 5.14 Muestra la ruta para ingresa los Datos del Problema.

Para el presente informe se crearon 3 archivos de Iber para la cuenca Peñitas, con el objetivo de observar los cambios que tenían si se variaban algunos datos de entrada, en la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 se muestran los principales cambios que existen entre cada una de las versiones propuestas, como primera etapa de la comparación.

Tabla 5.1 Parámetros de tiempo para cada uno de los proyectos de Iber.

Proyecto/Simulación	Incremento de tiempo máximo	Instante Inicial	Tiempo máximo de simulación	Intervalo de Resultados
Peñitasv2	360	0	1382400	3600
Peñitasv3	360	0	1382400	3600
Peñitasv4	360	0	1382400	1800

Tabla 5.2 Parámetros de cálculo para cada uno de los proyectos de Iber

Proyecto / Simulación	CFL	Limite Seco Mojado	Método de Secado	Condiciones Iniciales (Tirante Inicial)
Peñitasv2	0.9	0.001	Hidrológico	0
Peñitasv3	0.95	0.001	Defecto	0.001
Peñitasv4	0.95	0.001	Estricto	0.001

En la Figura 5.15 se muestran los datos que se pueden modificar en la pestaña de parámetros de tiempo del submenú **datos de problema**; el parámetro de tiempo máximo de simulación se definió de acuerdo al hidrograma de salida del MPE, considerando unas horas más, para garantizar que toda el agua escurra. Con el fin de poder comparar los hidrogramas, el intervalo de resultados se determino que fuera un múltiplo o igual al intervalo que se uso en MPE.

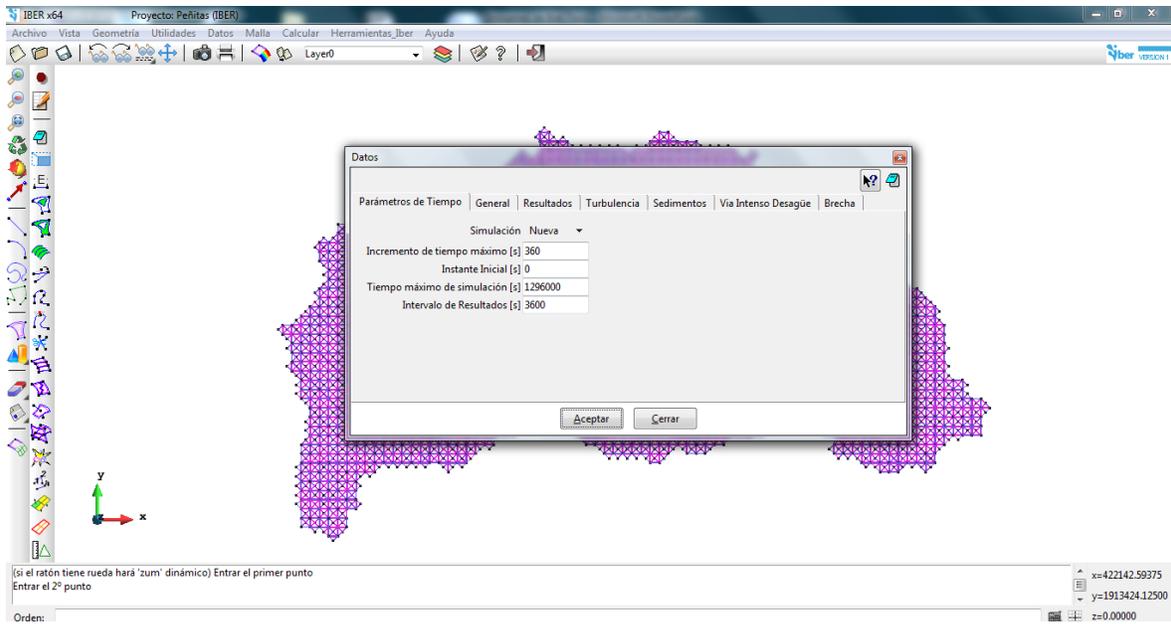


Figura 5.15 Ventana que se despliega en el submenú datos de problema (pestaña parámetros de tiempo).

En la Figura 5.16 se muestra la pestaña de **general** del submenú **datos de problema**, en la cual se pueden modificar parámetros como: **CFL**, el límite **seco-mojado** y **método de secado**.

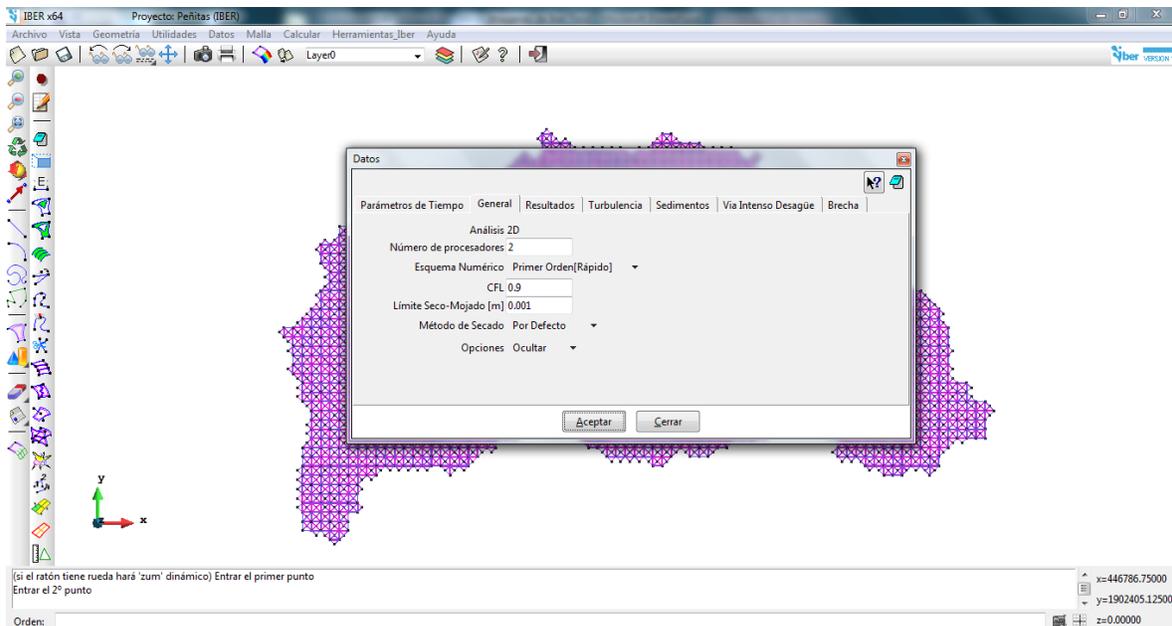


Figura 5.16 Muestra la ventana de Datos del Problema en la pestaña de General.

5.2.2 Asignación de parámetros y atributos

El siguiente paso es entrar al módulo de **hidrodinámica** en su submenú de **condiciones de contorno** como se muestra en la Figura 5.17; las condiciones de contorno pueden ser salida o entrada, en el caso de estudio la única entrada será la lluvia (que se ingresa en otro submenú). En el caso de la condición de salida, se asigno el atributo a 7 lados de los elementos que son fronteras de la geometría, en la Figura 5.18 se muestra la ventana que se despliega para la asignación de condiciones de salida. En la Figura 5.19 se muestran los elementos que tiene asignados las condiciones de salidas.

En el modulo de **hidrodinámica** está el submenú **condiciones iniciales**; en el caso de los proyectos Peñitasv3 y Peñitasv4 se estableció una condición inicial de 0.001 m, para forzar al programa a realizar el cálculo, en el caso de Peñitasv2 la condición inicial es 0.

Después se debe de es asignar la rugosidad a cada uno de los elementos de la cuenca, para llevar a cabo esta operación se necesita ir al menú **datos**, submenú **rugosidad** en la opción de **uso de suelo**. En la Figura 5.20 se muestra la ruta para poder asignar una rugosidad según el uso de suelo.

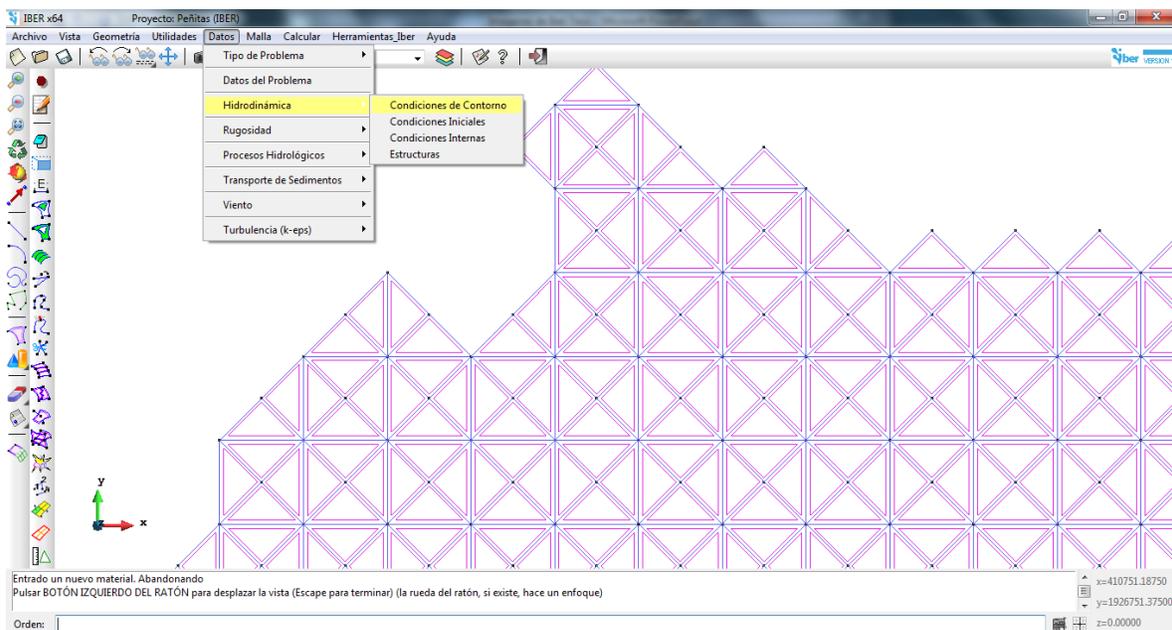


Figura 5.17 Muestra la ruta para la asignación de las condiciones de contorno.

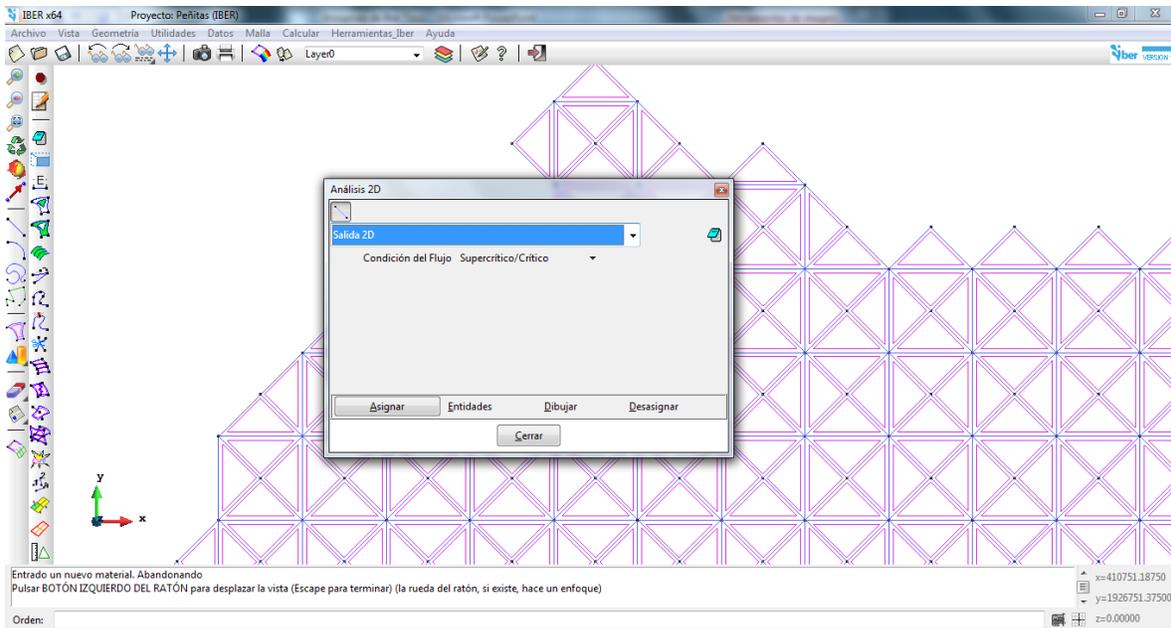


Figura 5.18 Asignación de salidas en 2D.

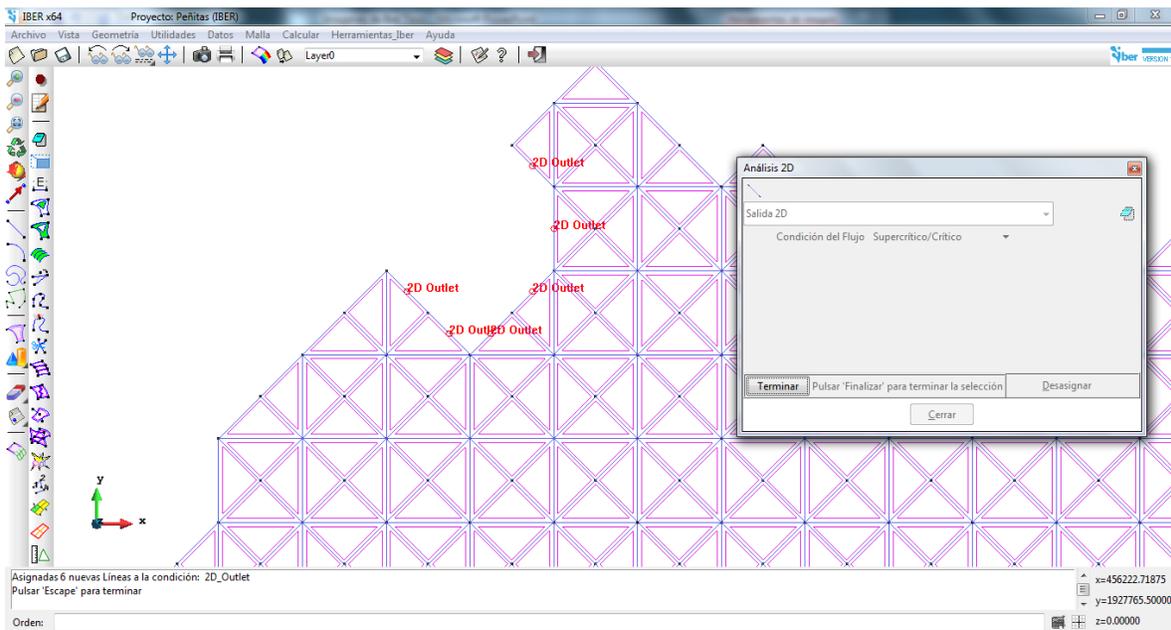


Figura 5.19 Muestra como se ven las salidas cuando ya fueron asignadas a los elementos.

En la primera etapa de estudio se considero asignar los mismos usos de suelo, que se utilizaron en el MPE; los cuales se asignaron de manera manual; el procedimiento fue poner una imagen de fondo con los usos de suelo de la cuenca y asignar elemento por elemento el valor de n que le correspondía, Tomando como referencia los valores propuestos en las tablas de Iber que se tienen predefinidas.

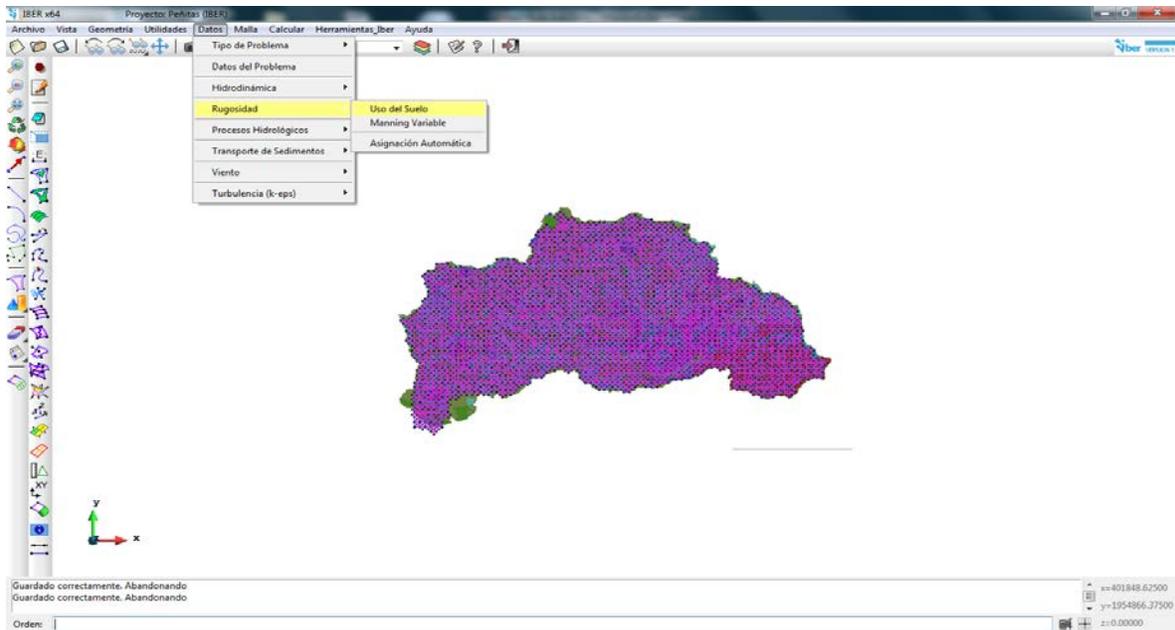


Figura 5.20 Ruta para la asignación de Rugosidad por el método de uso de suelo.

En la Figura 5.21 se muestra como se ve la cuenca de Peñitas después de que fueron asignados los usos de suelos en cada uno de sus elementos.

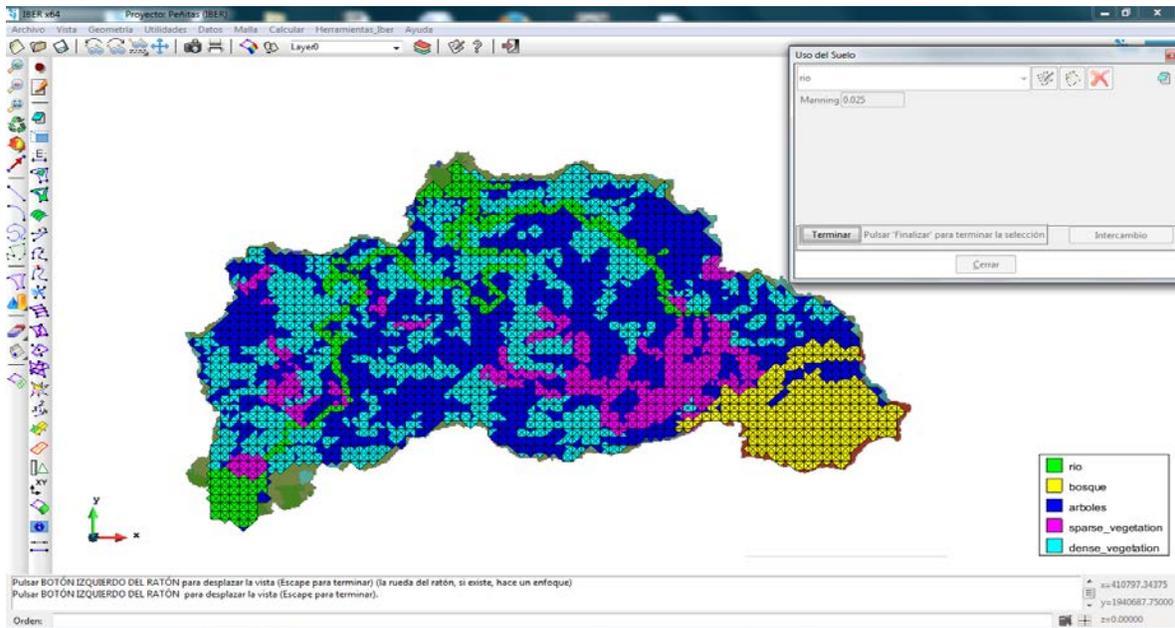


Figura 5.21 Muestra como se ven los elementos de la geometría cuando ya se les asigno un valor de rugosidad de acuerdo a su uso de suelo.

Al terminar con la asignación de usos de suelos se debe de pasar al submenú de procesos hidrológicos, la ruta se muestra en la Figura 5.22.

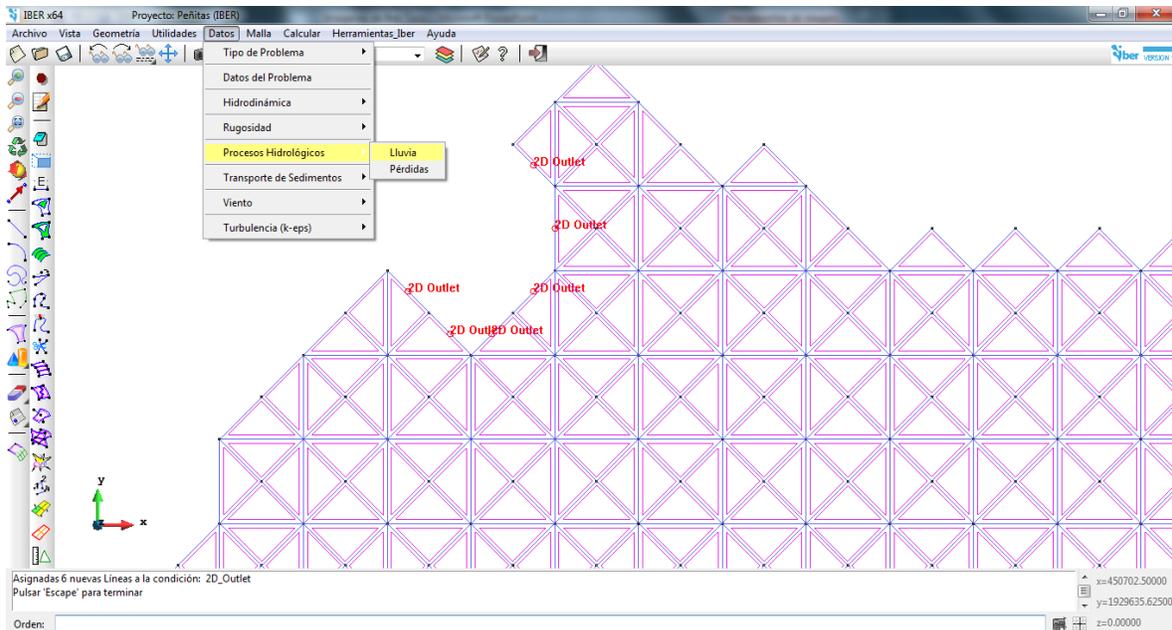


Figura 5.22 Ruta para la asignación de la precipitación.

5.2.3 Asignación de la lluvia

El primer proceso hidrológico es la lluvia, la cual se asigna desde el menú **datos**, submenú **procesos hidrológicos** en la opción de **lluvia**, para saber qué valor de lluvia le correspondía a cada elemento de la geometría se construyeron los polígonos de Thiessen y se generó una imagen georeferenciada.

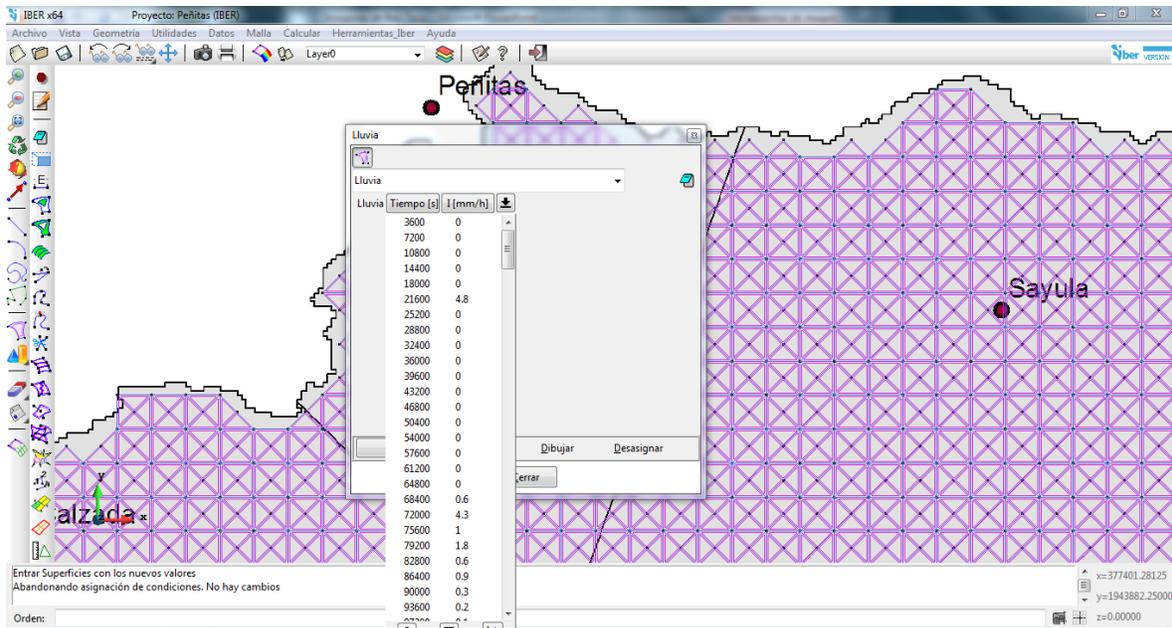


Figura 5.23 Asignación de la precipitación por medio de un hietograma de intensidades.

Los polígonos de Thiessen se generaron con la ayuda de ArcGIS, la información necesaria es la capa del parte aguas y la capa que contiene la ubicación de las coordenadas de las estaciones climatológicas.

Ya que se determinaron los polígonos de Thiessen se crearon las tablas de los hietogramas de intensidad de cada una de las estaciones, dichas tablas son necesarias porque es el formato que solicita Iber. De los registros de precipitación se seleccionó la lluvia del 22 de Octubre al 5 de Noviembre de 2007.(Figura 5.23)

Los valores de lluvia se ingresaron elemento por elemento de la geometría colocando una imagen de fondo con las estaciones y polígonos de Thiessen, para identificar que valores de lluvia le correspondía a cada elemento.

En la Figura 5.24 se muestra como quedaron asignadas las lluvias según el polígono correspondiente, se puede observar que hay 6 áreas de diferente color que corresponden a la lluvia de cada una de las estaciones.

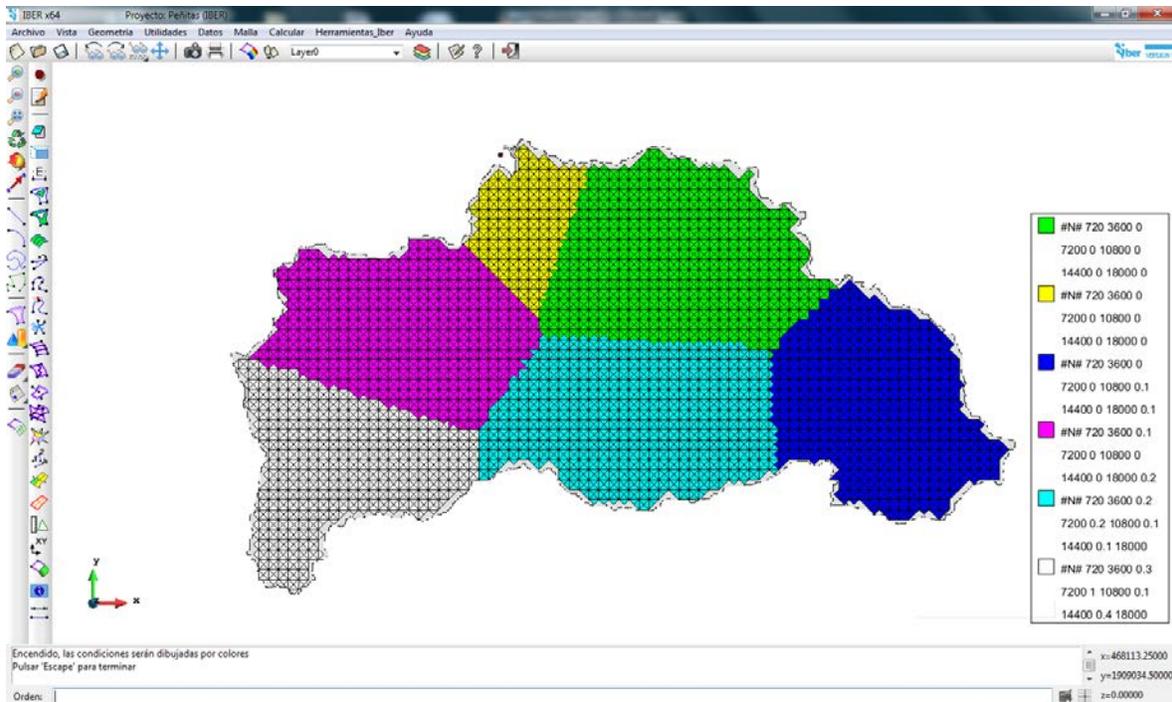


Figura 5.24 Muestra la asignación de las lluvias según los polígonos de Thiessen.

5.2.4 Asignación de pérdidas

El último paso es la asignación de las pérdidas, como MPE e Iber pueden usar el método de SCS y si quieren comparar los resultados se asignaron los valores de las pérdidas según la SCS a los elementos de la geometría. En la Figura 5.25 se muestra la ruta para asignar las pérdidas a la geometría de la cuenca Peñitas.

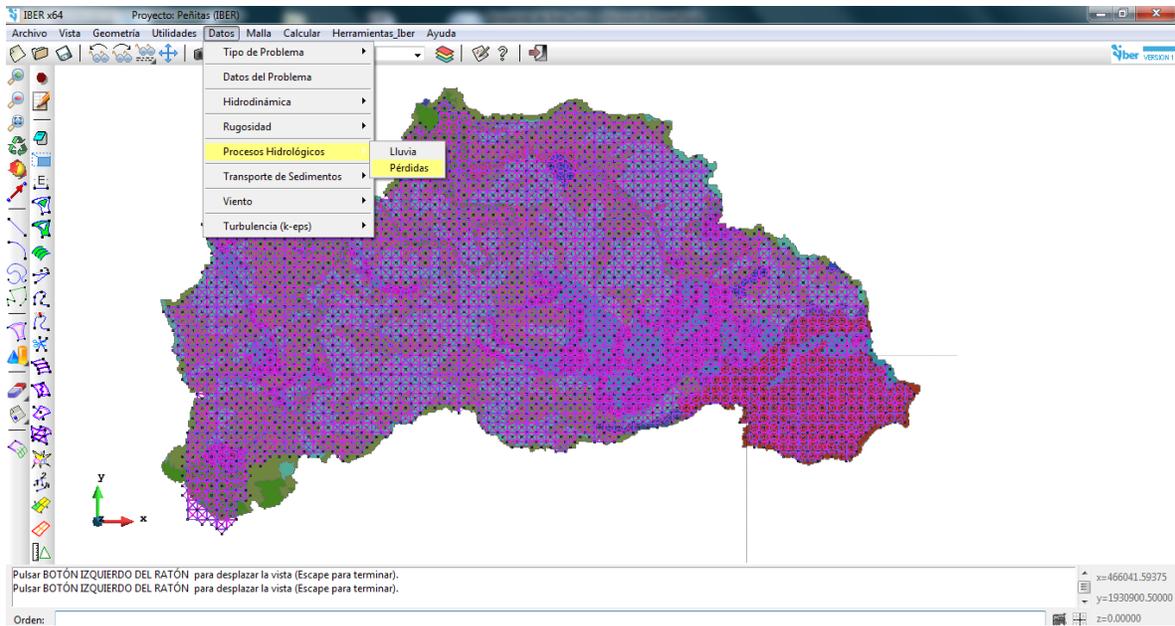


Figura 5.25 Secuencia para asignar las pérdidas en una geometría.

Para poder asignar las pérdidas se colocó una imagen de fondo, dicha imagen forma parte de los archivos que se generaron para el MPE, la imagen consiste en recortar el archivo original de usos y tipos de suelo al tamaño de la cuenca, la forma de asignarlo es por medio del menú **datos**, submenú **procesos hidrológicos** en la opción **pérdidas**, al seguir la ruta descrita se abre una ventana como la se muestra en la Figura 5.26.

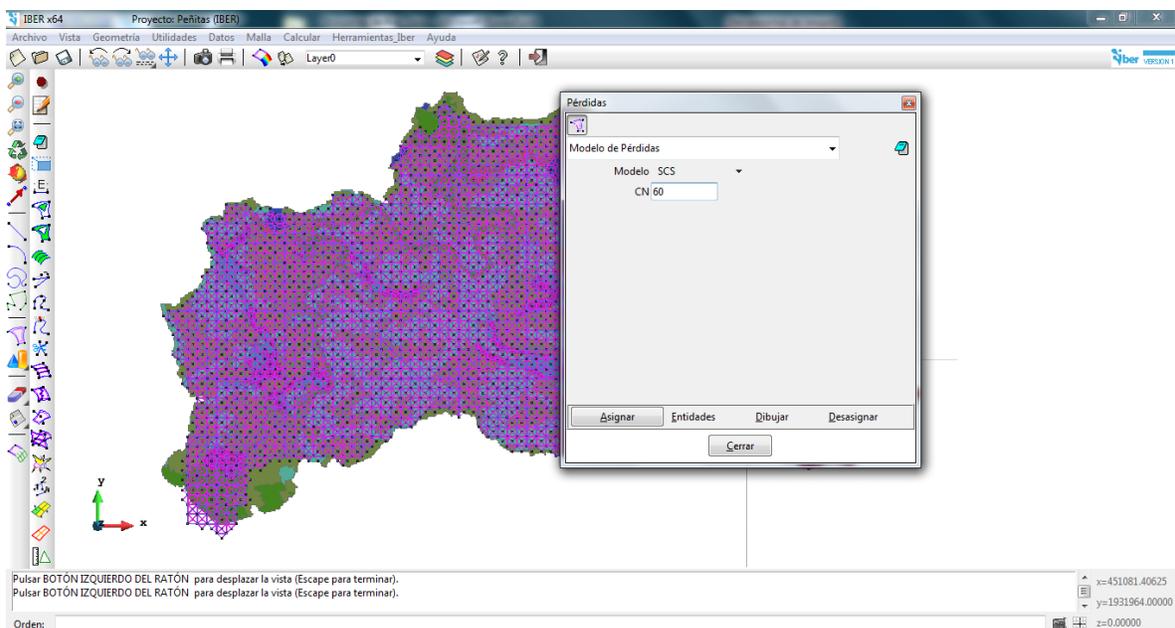


Figura 5.26 Ventana para la asignación de pérdidas.

Los valores de pérdida que se asignaron a cada elemento son los mismos que se asignaron a los elementos en el MPE. En la Figura 5.27 se muestra la geometría después de asignarle pérdidas a todos los elementos.

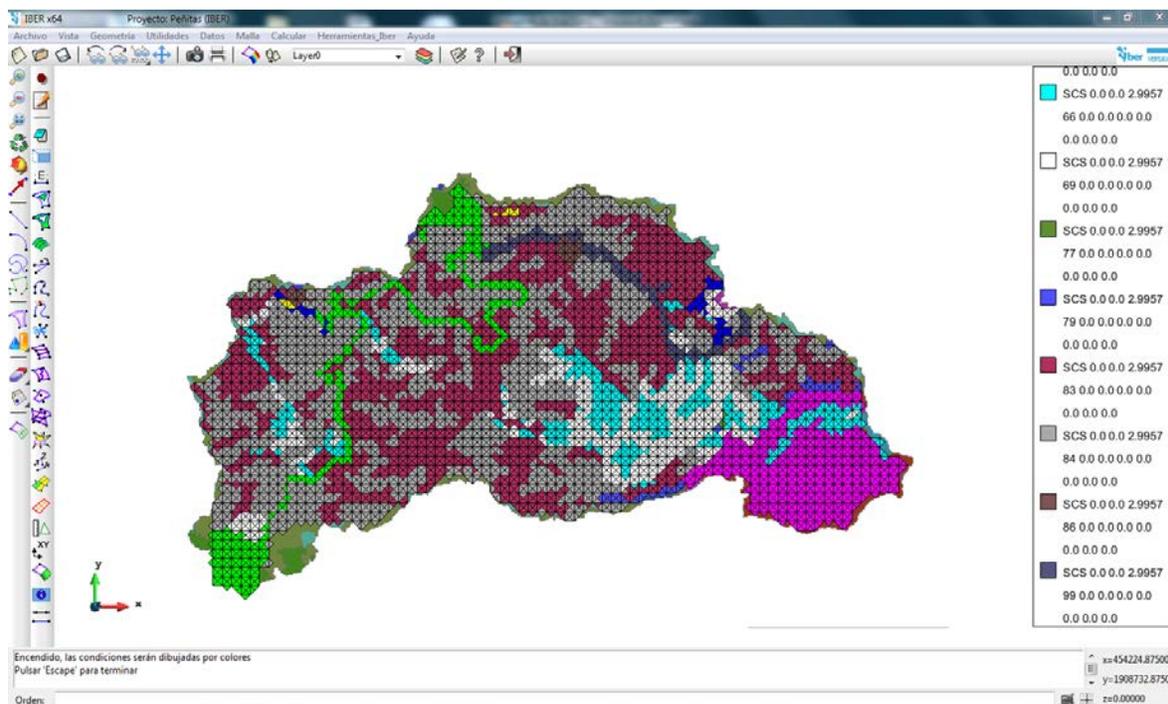


Figura 5.27 Muestra la geometría con las pérdidas según el SCS.

Con la asignación de pérdidas se termina el ingreso de información al modelo. Es importante mencionar que el modelo Iber puede ser alimentado de información en la etapa de la geometría o cuando se genera la malla con la que se realiza el cálculo, sin embargo, para este caso se alimentó desde la geometría.

5.2.5 Generación de la malla de cálculo

Para poder realizar un cálculo se debe de generar una malla la cual es un paso fundamental para la obtención de buenos resultados, en el caso de estudio se generó una malla con 7746 elementos y es la que se muestra en la Figura 5.28, esta malla contiene elementos triangulares y la ruta para generarla es: menú **malla**, submenú **generar malla**.

5.2.6 Cálculo en Iber

Finalmente se debe de ingresar al Menú **calcular** y seleccionar la opción **calcular**, con la cual comenzara a realizar la simulación del proyecto en curso, cuando el cálculo termine se despliega una ventana que indica que el cálculo terminó y se pueden obtener los resultados que se necesiten, en este caso los valores de gasto a la salida de la cuenca.

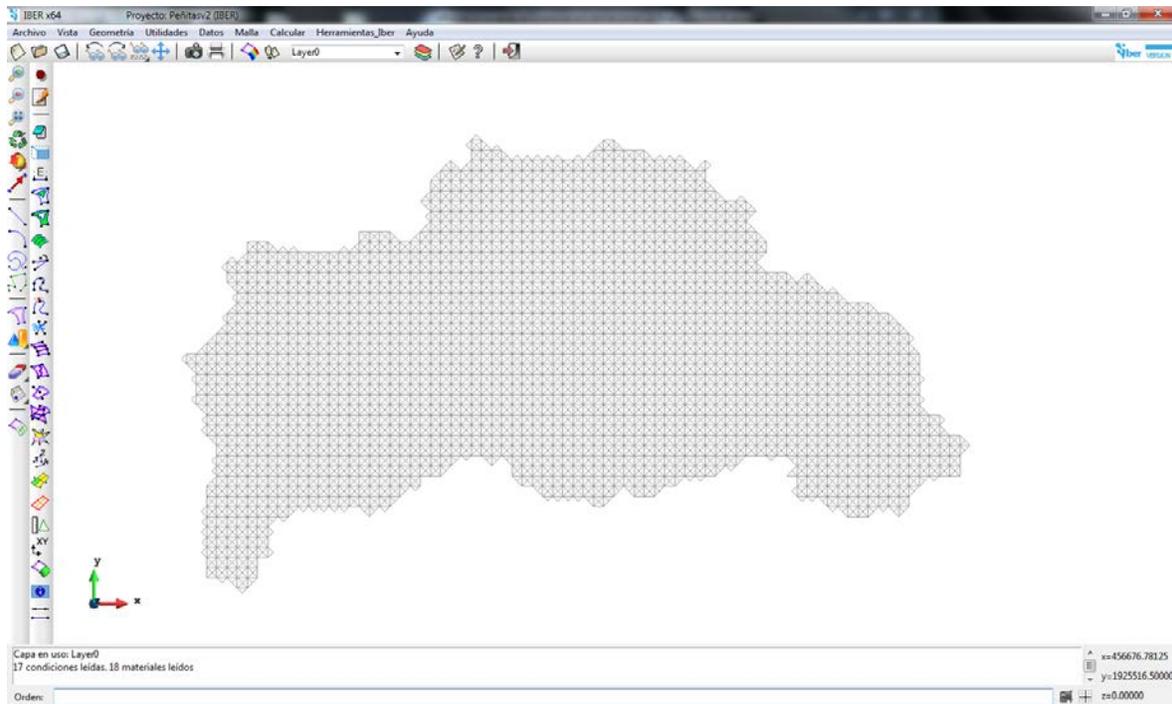


Figura 5.28 Malla de cálculo.

6 Análisis de resultados

En este apartado se detallan las consideraciones que se tomaron en los cálculos, las principales adecuaciones que sufrió el *software* Iber y los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas.

6.1 Resultados del MPE

Los primeros resultados se obtuvieron con el modelo MPE. Para obtener el hidrograma final que se utilizó en la comparación; fue necesario realizar una calibración del programa con varios eventos de lluvia, con los que se pudieron calcular los parámetros: factor de escala de pérdida inicial, factor de escala de retención potencial, factor de olvido, el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento.(Domínguez et al, 2009)

En la Figura 6.1 se muestra en color azul el hidrograma observado en la estación Peñitas, en color rojo está el hidrograma calculado con MPE, se puede observar que el modelo MPE da resultados muy parecidos a la realidad, en cuanto a la forma y duración de la avenida, también representa de manera adecuada el gasto pico de la avenida, el hidrograma que se obtuvo con el modelo MPE se calculó con un gasto base de $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (este gasto se usó para todas las comparaciones y fue el mismo que se le sumó a los resultados de Iber), el valor fue obtenido de analizar varias tormentas.

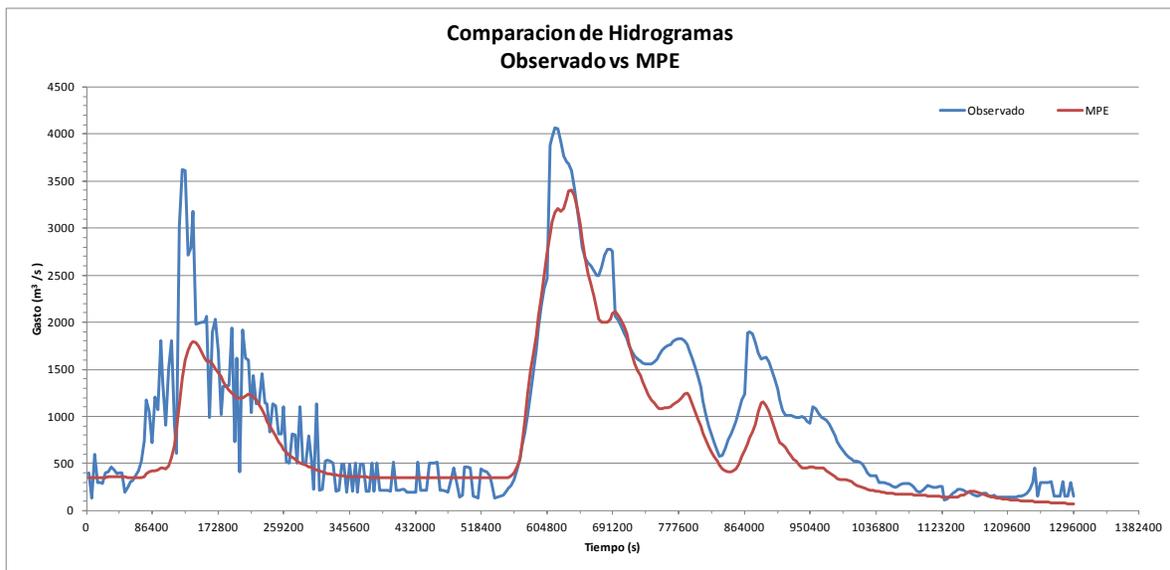


Figura 6.1 Comparación entre el hidrograma observado el modelo MPE.

Se puede concluir que el modelo MPE con la calibración realizada y para el evento en estudio da buenos resultados, por lo tanto, es posible utilizarlo para la comparación con los resultados calculados con el modelo Iber.

6.2 Resultados de Iber

6.2.1 Resultados de Iber primer etapa

En el apartado anterior se mencionó que se plantearía una primera etapa de simulaciones con el modelo Iber, por si los resultados obtenidos no eran concluyentes y se podía hacer una mejora al modificar los parámetros de calibración o al mismo armado.

Como parte de la primera etapa de cálculo se generaron 3 proyectos. El primer proyecto fue denominado como "Peñitasv2" el cual contenía pérdidas, los siguientes dos proyectos llamados "Peñitasv3" y "Peñitasv4" no tienen pérdidas, la ultima consideración fue para comparar los efectos de las pérdidas en un modelo hidráulico.

En la Tabla 6.1 se muestran los parámetros de tiempo que se propusieron para cada uno de los proyectos generados en la primera etapa, en la

Tabla 6.2 se muestran los parámetros de cálculo para los mismos proyectos.

Tabla 6.1 Parámetros de tiempo para cada proyecto de Iber primera etapa.

Proyecto/Simulación	Incremento de tiempo máximo	Instante Inicial	Tiempo máximo de simulación	Intervalo de Resultados
Peñitasv2	360	0	1382400	3600
Peñitasv3	360	0	1382400	3600
Peñitasv4	360	0	1382400	1800

Tabla 6.2 Parámetros de cálculo para cada proyecto de Iber primera etapa.

Proyecto / Simulación	CFL	Límite Seco Mojado	Método de Secado	Condiciones Iniciales (Tirante Inicial)
Peñitasv2	0.9	0.001	Hidrológico	0
Peñitasv3	0.95	0.001	Defecto	0.001
Peñitasv4	0.95	0.001	Estricto	0.001

Para el proyecto denominado "Peñitasv2", el cálculo realizado por Iber dio como resultado que no existía escurrimiento en el punto de salida, durante el tiempo de simulación. En la Figura 6.2 se muestra el hidrograma observado en la estación Peñitas en color azul, en color rojo el hidrograma

calculado por el MPE y finalmente en color verde el hidrograma calculado por Iber con el proyecto “Peñitasv2”.

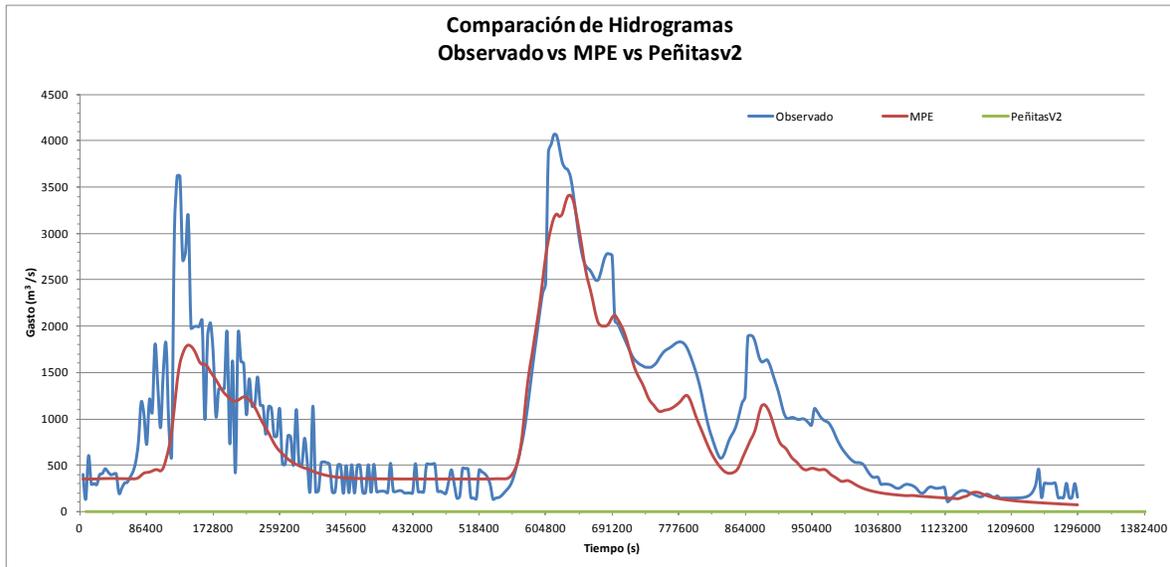


Figura 6.2 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv2.

Durante la simulación del proyecto “Peñitas v2” se detectaron que las velocidades calculadas en algunas celdas eran muy grandes, por lo que se reportaron a los desarrolladores de Iber para que realizaran una inspección más a detalle sobre su método de secado hidrológico.

El proyecto “Peñitasv3” mostró un avance en los resultados ya que el programa calculó algunos valores de escurrimiento, el hidrograma se compara con el hidrograma medido y con el hidrograma calculado por MPE, los resultados se muestran en la Figura 6.3 en color azul esta el hidrograma observado, en color rojo esta el hidrograma calculado con MPE y en color morado el hidrograma calculado en Iber con el proyecto “Peñitasv3”.

Aún cuando el modelo Iber comienza a dar resultados de escurrimiento, los resultados presentan oscilaciones y de cierta manera parece que son pulsos, esto puede atribuirse a las condiciones del número de Courant-Frederic-Levy (CFL) y las ecuaciones que maneja el *software* Iber para hacer los cálculos.

En el caso del proyecto “Peñitasv4” se observó que con las condiciones de cálculos propuestas se obtiene gastos muy pequeños, el máximo valor es de 12.99 m³/s contra los a 3 300 m³/s del hidrograma obtenido con MPE. En la Figura 6.4 se observa en color azul el hidrograma observado, en color rojo el hidrograma calculado con MPE y en color morado el hidrograma calculado en Iber.

Al realizar la simulación de “Peñitasv4” se observó que al usar el método de secado estricto el tiempo de simulación se disparaba a más de 7 veces del que se tardaba con otros métodos de secado, como el hidrológico o el de por defecto, sin embargo, se realizó para observar el efecto que se tenía sobre los resultados.

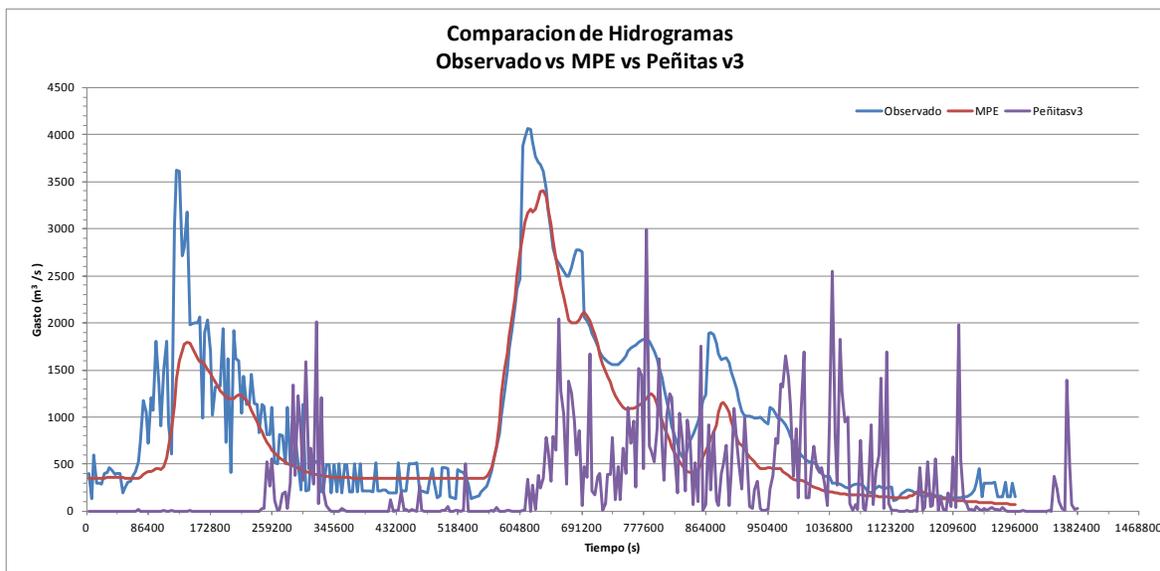


Figura 6.3 Comparación entre el hidrograma observado el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3.

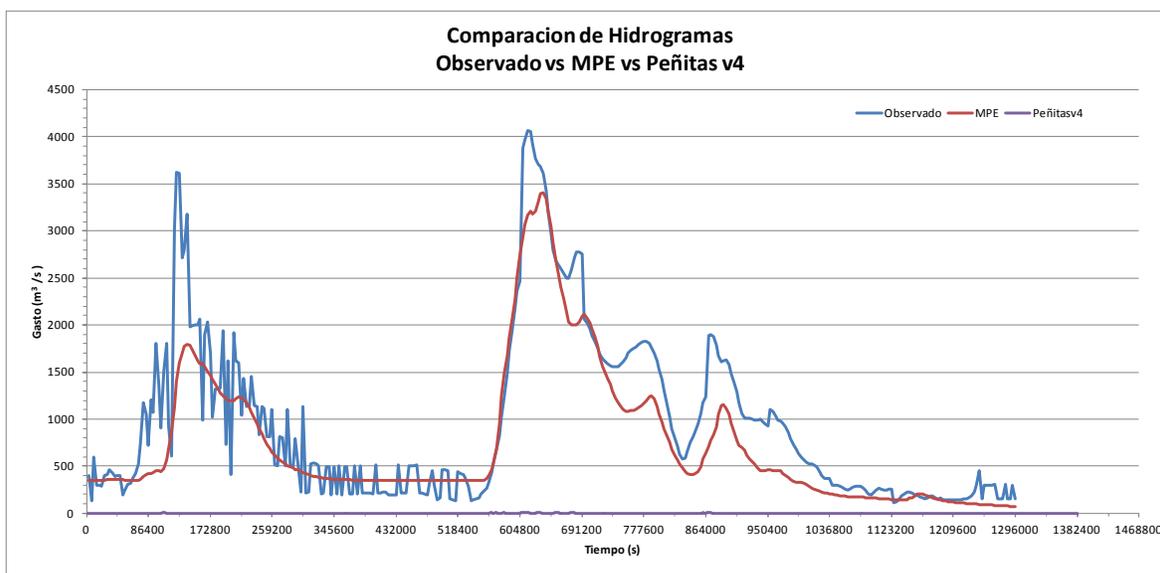


Figura 6.4 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv4.

En la Tabla 6.3 se muestran los volúmenes de cada uno de los cálculos y la diferencia que existe entre cada uno de los cálculos y el hidrograma observado.

Tabla 6.3 Tabla de volúmenes y diferencia en % respecto al hidrograma observado, para las simulaciones de la primera etapa.

Hidrograma	Observado	MPE	Peñitasv2	Peñitasv3	Peñitasv4
Volumen Mm ³	1230.501	961.7575	0	401.964	0.001882
Diferencia con el hidrograma real Mm ³	No aplica	268.743	1230.501	828.536	1230.499
Diferencia en %	No aplica	21%	100 %	67.33%	99.99

Con la información expuesta se concluye la primera etapa del análisis de resultados, donde no se consiguieron valores alentadores en la mayoría de los proyectos, sin embargo, el proyecto 3 se tomó como proyecto base para una segunda etapa de simulaciones, debido a que los gastos obtenidos con esta simulación son los más grandes y más parecidos a la realidad.

6.2.2 Resultados Iber segunda etapa

La segunda etapa de simulación se realizó con asesorías presenciales y a distancia de personal del Instituto Flumen, los cuales hicieron recomendaciones para mejorar los resultados. En los siguientes párrafos se describen algunas observaciones y consideraciones que se tomaron.

Usando como partida el proyecto “Peñitasv3”, se realizaron algunos cambios en los parámetros de cálculo, para identificar si se mejoraban los resultados, uno de los primeros pasos fue reducir el intervalo de tiempo de cálculo y el CFL (coeficiente de estabilidad), el personal del Instituto FLUMEN, comentó que no es adecuado utilizar incrementos de tiempo de cálculo muy grandes, aunque Iber lo reduce automáticamente esto siempre tiene tendencia a provocar oscilaciones, que se pueden observar en la forma del hidrograma, para el CFL mencionaron que es recomendable usar un valor cercano a 0.5 cuando los proyectos son nuevos, se recomienda usar valores mayores cuando la cuenca esta calibrada y se requiere minimizar el tiempo de cómputo.

Para el parámetro de rugosidad se utiliza el coeficiente *n* de Manning, que puede estar asociado al uso del suelo, pero se deben de tener algunas consideraciones para asignar un valor, el coeficiente de Manning sirve para considerar la fricción contra un contorno determinado en los cálculos hidráulico, sin embargo, en cálculos de tipo hidrológico con celdas de varios cientos de metros, el coeficiente de *n* funciona no sólo como un coeficiente de fricción, también considera todos los posibles obstáculos que enfrenta el agua en su recorrido en el interior de cada celda, convirtiendo

la n en un coeficiente de fricción y de forma, por lo tanto se debe de tener en cuenta que los valores que se asignen deben ser un poco menores a los que la literatura propone en cálculos hidráulicos.

El parámetro de seco-mojado afecta también los cálculos de escurrimiento provocando oscilaciones, por lo que se recomendó trabajar con un valor inicial de 0.1 mm.

La topografía es importante en todos los modelos, en algunos el impacto es mayor que en otros, y dependerá de los tratamientos previos que se le tengan que realizar, o las utilidades con las que cuente cada modelo, en el caso del MPE, la topografía sufre un preprocesamiento con ayuda de un SIG y algunas extensiones, que mejoran la calidad de la información; para el caso de Iber no se sabía si era necesario realizar un tratamiento previo, por lo que en la primera etapa de simulación se consideró que la topografía original podía funcionar sin problemas, como los resultados no fueron los esperados se realizó una inspección de la geometría que se generó en Iber, se identificó que la topografía presentaba depresiones en algunas zonas, donde se almacenaba un volumen considerable de agua, el personal del Instituto FLUMEN identificó el problema, por lo que agregaron una utilidad más a Iber, con la que se puede hacer un tratamiento al terreno y rellenar las depresiones existentes, comentaron que los SIG rellenan las depresiones en la topografía, pero consideran que el flujo puede pasar de una celda a otra por una arista, que funciona adecuadamente para modelos hidrológicos, sin embargo, para modelos que funcionan con un esquema de volúmenes finitos la transferencia de agua siempre es por las aristas. Es decir, entre dos elementos que se tocan en un vértice no puede haber flujo directo.

La siguiente modificación al programa fue en el método de secado en su versión hidrológica, dicho método fue usado en el proyecto "Peñitasv2" de la primera etapa, se observó que con este método las velocidades calculadas eran muy altas, por lo que se revisó el algoritmo y se agregaron algunas instrucciones para mejorar las soluciones en las ecuaciones de continuidad y de momentum.

Con las modificaciones realizadas al código de Iber, se generó la versión 2.0, la anterior se utilizó para realizar las simulaciones de la segunda etapa; al proyecto "Peñitasv3" se le asignaron nuevos parámetros, de acuerdo con los valores recomendados, en cuestión de la topografía se realizó un procesamiento donde se rellenaron las depresiones en la cuenca.

Los resultados obtenidos se pueden observar en Figura 6.5, en color azul está el hidrograma observado, en color rojo el calculado con MPE y en color verde el hidrograma de salida calculado con Iber 2.0 y las recomendaciones realizadas por el grupo del Instituto Flumen.

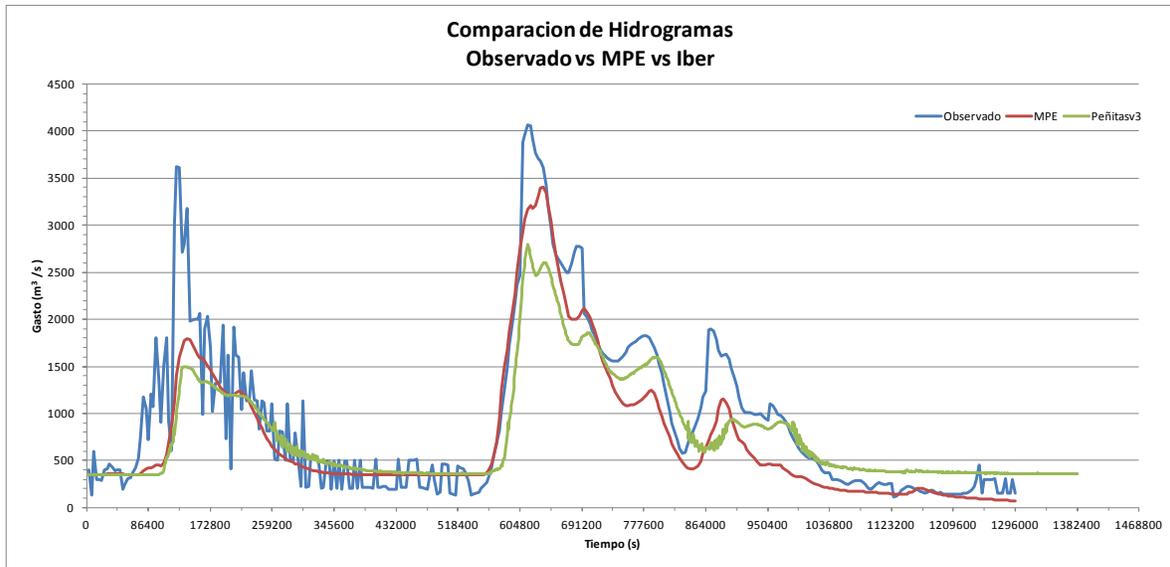


Figura 6.5 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3

Con las modificaciones a los parámetros de cálculo y la versión 2.0 de Iber se obtuvieron importantes mejoras en los cálculos, en la Figura 6.5, se observa que se eliminan las oscilaciones que se presentaron en la primera etapa, los gastos también aumentaron y la forma del hidrograma es parecida al hidrograma del MPE y el observado, sin embargo, los gastos calculados por Iber siguen estando por debajo y son los que no consideran pérdidas, por lo que se recomienda un análisis más detallado, a los gastos que calculó el modelo Iber se les sumó un gasto base de 350 m³/s.

Como parte de las comparaciones de la segunda etapa de simulaciones se realizó un cálculo del hidrograma de salida de la cuenca con el modelo MPE, considerando que no existían pérdidas, por lo que se cambiaron los parámetros de número de curva; se consideró en todo el modelo con un valor de 100, el factor de olvido de 0, el factor de escala de retención potencial de 0 y sin gasto base.

En la Figura 6.6 se muestra la comparación de los 4 hidrogramas, en color azul se encuentra el hidrograma observado, el color rojo el calculado con MPE considerando pérdidas, en color verde el hidrograma calculado por Iber sin pérdidas y en color morado el hidrograma de MPE sin considerar pérdidas.

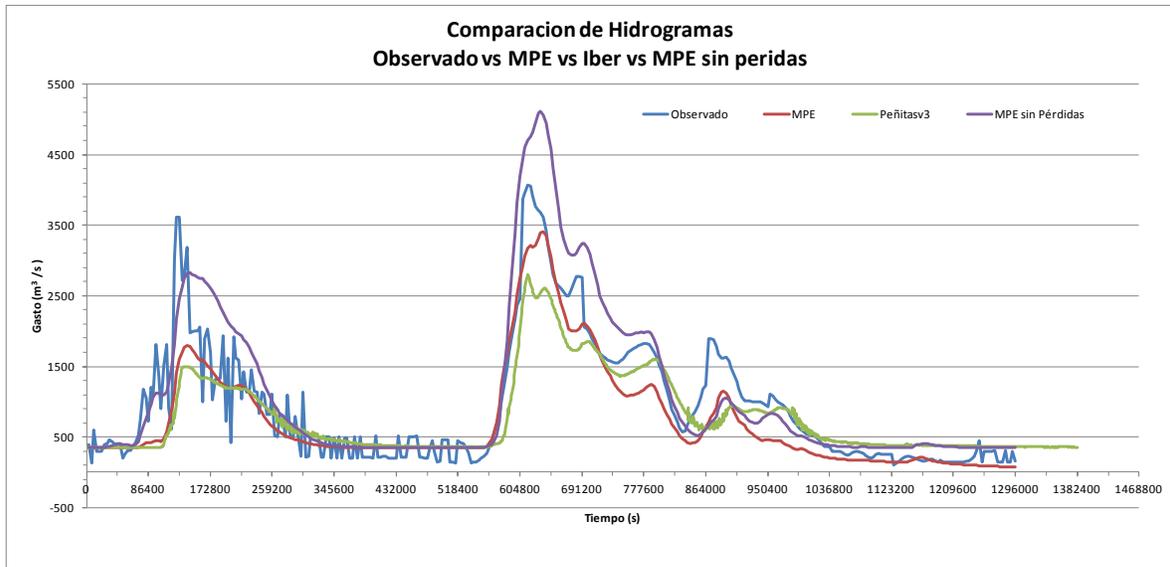


Figura 6.6 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas, Iber con el proyecto Peñitasv3 sin pérdidas y MPE sin pérdidas.

Se puede observar que el hidrograma del MPE sin considerar las pérdidas es el más grande y en comparación con el de IBER llega a tener un diferencia en su gasto pico de más de 2 000 m³.

Como los resultados aún no eran definitivos, el personal del instituto Flumen realizó el análisis de la cuenca peñitas en dos casos adicionales los cuales contienen las siguientes características:

Caso 01: Coeficiente de Manning de 0.01 en todo el dominio, opción de rellenar depresiones activada, método de secado hidrológico, umbral de secado y mojado de 0.0001 m, sin considerar pérdidas y uso de la versión Iber 2.0.1.

Caso 02: Coeficiente de Manning de 0.02 en todo el dominio, opción de rellenar depresiones activada, método de secado hidrológico, umbral de secado y mojado de 0.0001 m, sin considerar pérdidas y uso de la versión Iber 2.0.1.

Los resultados para el Caso 01 se muestran en Figura 6.7, en color azul se encuentra el hidrograma observado, en color rojo el calculado por MPE considerando pérdidas, en color verde el hidrograma calculado con Iber y en color en color morado esta el hidrograma calculado con el MPE sin considerar pérdidas.

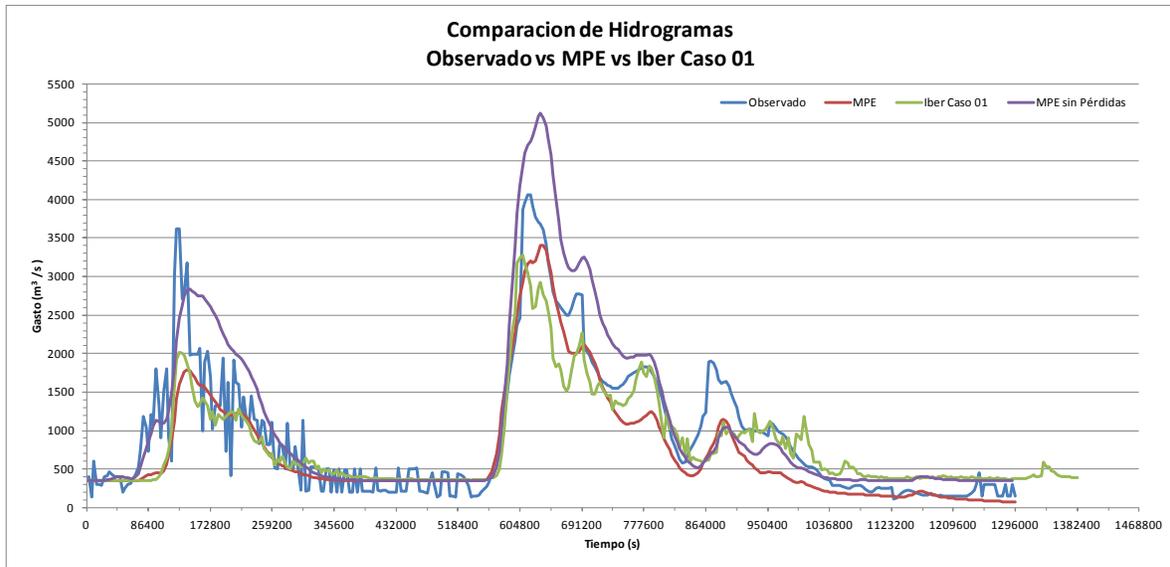


Figura 6.7 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 01 con $n=0.01$ sin pérdidas.

Los resultados para el caso 02 se muestran en la Figura 6.8, en color azul el hidrograma observado, en color rojo el hidrograma calculado por MPE considerando pérdidas, en color verde el hidrograma calculado por Iber para el caso 02, en color morado está el hidrograma calculado con el MPE sin considerar pérdidas.

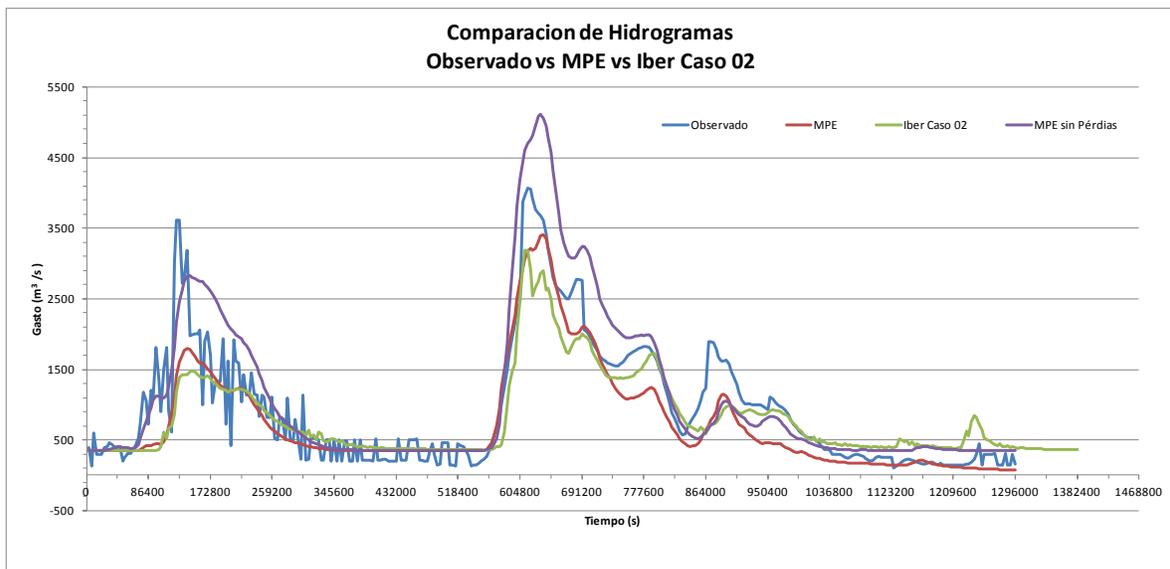


Figura 6.8 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 02 con $n=0.02$ sin pérdidas.

De los casos 01 y 02 se observa que los hidrogramas calculados por Iber tiene la forma del hidrograma observado, sin embargo, los gastos calculados y sus volúmenes quedan por debajo.

Observando los resultados en la interfaz de Iber, se determinó que incluso utilizando la opción de rellenar depresiones en Iber, quedan zonas con agua estancada, como se puede ver en la Figura 6.9, que corresponde a un detalle de del mapa de tirantes al final de la simulación.

La presencia de agua estancada es evidencia de que los volúmenes y los gastos son afectados ya que no toda el agua está saliendo adecuadamente.

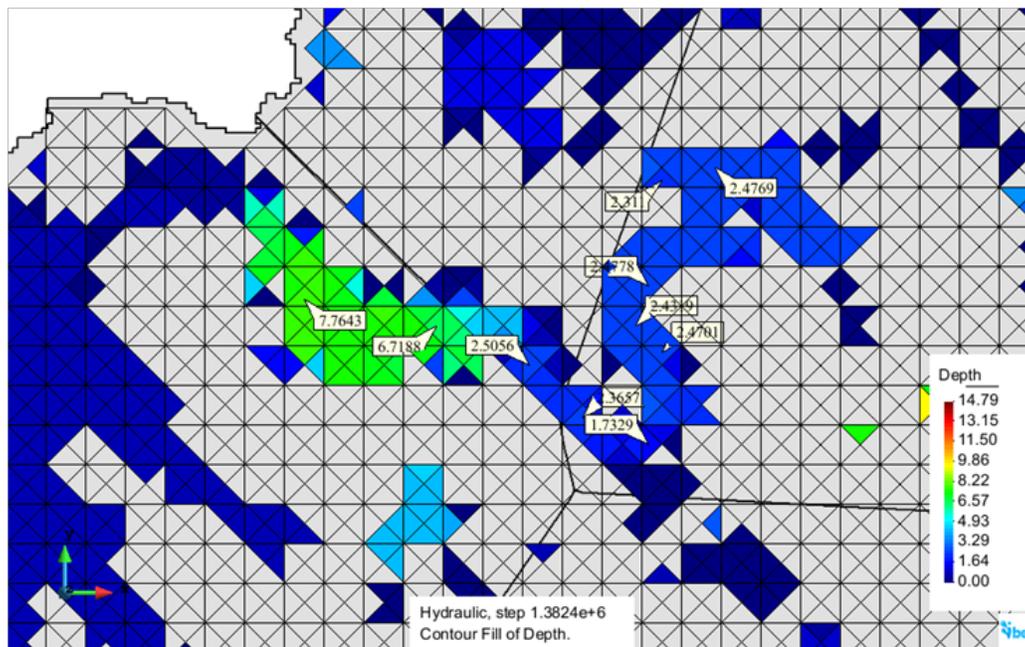


Figura 6.9 Mapa de tirantes al final de la simulación en Iber.

Iber es un modelo originariamente pensado para hacer cálculos hidráulicos, y no hidrológicos, y por lo tanto se considera que la geometría que se utiliza es lo suficientemente detallada. Evidentemente, si se quiere utilizar como modelo hidrológico, la geometría tiene que ser simplificada, para limitar el número de elementos a algo razonable. En la versión 2.0 se incorporó la opción de “rellenar depresiones” para poder trabajar con mallas gruesas evitando zonas deprimidas donde se estanca el agua, pero ahora se ha observado que esto no es suficiente como se explica a continuación.

Iber utiliza un modelo en volúmenes finitos donde a cada elemento se le asigna una cota de fondo. Para que haya un flujo por gravedad de un elemento i a un elemento j se deben cumplir dos cosas:

1. La cota del agua en i debe ser superior a la cota de agua en j
2. La arista que comunica i con j debe estar por debajo del nivel de agua en i

Con la opción de rellenar depresiones; implementada lo que se hace es cambiar la cota de los elementos. Con ello se consigue que exista una pendiente continua hacia la salida de la cuenca, por lo que la condición 1 se cumple, pero aun así, hay zonas donde la condición 2 no se cumple. Veamos por ejemplo lo que ocurre entre los elementos 3288 y 3291, arista limitada por vértices 2383 y 2356, ver Figura 6.10.



Figura 6.10 Mapa de detalle de los elementos 2383 y 2356

Tanto el elemento 3288 como el elemento 3291, después de rellenar depresiones están a cota 145.33 (originariamente i estaba por debajo, pero como era una depresión se rellenó hasta este valor), por lo que en principio debería circular agua de 3291 a 3288 si el primero está seco y el otro mojado. Pero mirando los resultados vemos que 3288 está seco, 3291 tiene un tirante de 2.88 m, Figura 6.11, y esto se mantiene así indefinidamente al final del cálculo:



Figura 6.11 Tirante al final de la simulación en la celda 3291

Para explicar esto, observando las cotas de los vértices de la malla, Tabla 6.4:

Tabla 6.4 Valores de cota para los vértices 2383 y 2356

Vértice	Cota
2383	152
2356	195

Es decir, Iber no permite que pase agua de 3291 a 3281 porque la arista está por encima de la cota del agua en 3291 (que es $145.33 + 2.88$ m). Y, ¿por qué el elemento 3291 está en la cota 145.33 si la arista está en una cota superior? Pues porque el otro vértice, el vértice 2341 está a la cota 88.

Es decir, la opción de “rellenar depresiones” tal como se ha implementado, modificando las cotas de los elementos, **no es suficiente**, porque puede haber aristas que funcionen como barreras.

Por lo resultados anteriores se decidió hacer una modificación adicional al código fuente en donde se elimina la restricción de que si una arista entre dos elementos queda por encima de la cota de agua en los mismos, no pueda haber flujo entre ellos, esta modificación se activa sólo en el caso en que se haya utilizado la opción de “rellenar depresiones”, así para los cálculos hidráulicos habituales no cambia nada.

Se realizó una última simulación con el proyecto “Peñitasv3” y el programa Iber modificado, los resultados muestran que no se queda agua estancada y la similitud entre el modelo Iber, MPE y el observado aumentan.

En la Figura 6.12 se muestra los resultados obtenidos en esta última simulación, en color azul está el hidrograma observado, en color rojo el hidrograma calculado por MPE, en color verde el hidrograma calculado por Iber y en color morado el hidrograma calculado con MPE sin pérdidas.

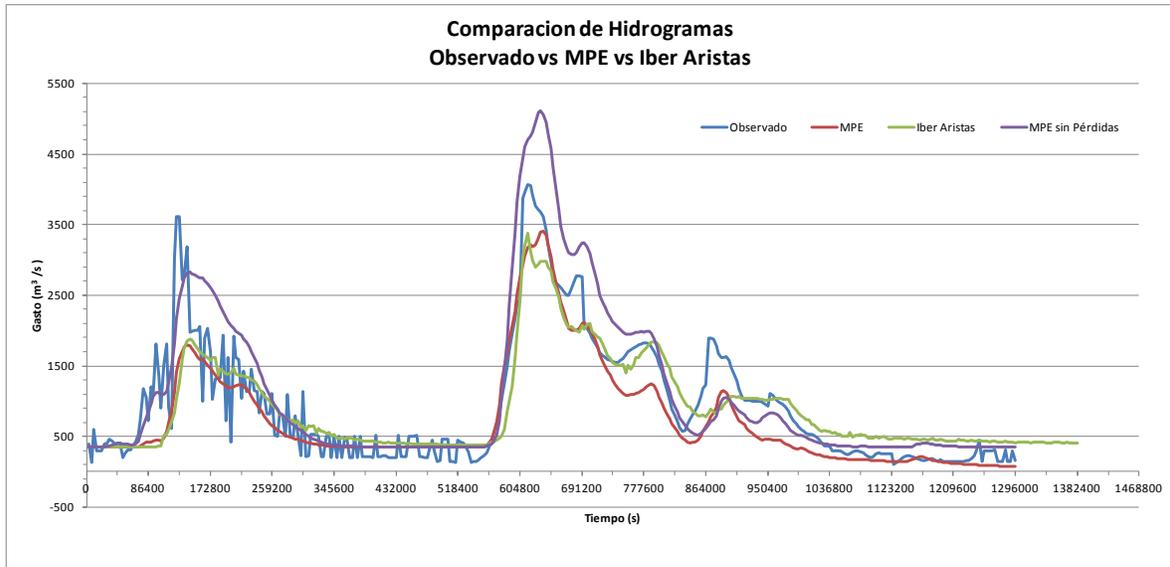


Figura 6.12 Comparación entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas, Iber con el proyecto Peñitasv3 sin pérdidas y con la versión de Iber 2.0.1 modificada para cálculos hidrológicos.

En la Tabla 6.5 se muestra la tabla resúmenes de los volúmenes, gastos pico y tiempos pico que tiene cada hidrograma calculado en la segunda etapa.

Tabla 6.5 Tabla de volúmenes

Hidrograma	Observado	MPE	MPE sin Pérdidas	Peñitasv3	Caso 1	Caso 2	Peñitasv3 con aristas
Volúmenes (Mm³)	1230.501	961.75	1444.61	1068.4	647.4	627.1	1229.3
Diferencia con el hidrograma real (Mm³)	No aplica	-268.74	214.11	-162.0	-583.0	-603.4	-1.2
Diferencia en %		-21%	17%	-13.2%	-47.4%	-49.%	-0.10%
Gasto Pico	4066.6	3057.2	4769.9	2444.8	3233.4	3186.4	3378.6
Tiempo Pico	615600	637200	633600	616000	608400	612000	615600

En la tabla anterior se observa que los volúmenes de Iber mejoran mucho con las modificaciones al programa, cuando se suaviza la topografía y se toman todas las consideraciones en los parámetros de cálculo se obtiene una diferencia del hidrograma observado con el real de 13.17 % aproximadamente, lo cual es bueno pero no satisfactorio ya que falta considerar las pérdidas.

Cuando se hace la modificación en el programa de cómo se debe de considerar las aristas en el intercambio de flujo de una celda a otra se obtiene una diferencia del 0.10%, pero aun faltan que escurra agua ya que el MPE tiene cerca del 17% más en el volumen de agua cuando no considera pérdidas.

Con los resultados anteriores se concluyeron las simulaciones y a continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

7 Conclusiones y Recomendaciones

Este apartado contiene las conclusiones del estudio, recomendaciones para utilizar cada uno de los programas, recomendaciones para los desarrolladores y algunas posibles líneas de investigación.

7.1 Conclusiones del estudio

Es un hecho que los modelos hidráulicos que utilizan ecuaciones con menos simplificaciones van en aumento, debido al gran avance tecnológico que se ha presentado en los sistemas computacionales, sin embargo, como todo desarrollo se debe de contemplar una etapa de ajuste y adecuación, por lo que, estudios de este tipo se vuelven de gran ayuda a los desarrolladores y profesionales que se dedican a este campo.

Las conclusiones del estudio son las siguientes:

La calidad de la información climatológica e hidrométrica es fundamental para la estimación correcta del escurrimiento, si se tiene una mala medición en la etapa de calibración o en la de simulación los resultados que se obtendrán no serán correctos.

El detalle de los modelos de elevación del terreno, permeabilidad, el uso de suelo, el tipo de suelo, etc., deben ser congruentes con el tamaño del elemento con el que se realizará el cálculo.

El MPE cumple con la representación en duración y forma del proceso lluvia escurrimiento, sin embargo, se deben realizar una calibración más precisa y rigurosa, para mejorar los volúmenes de escurrimiento que calcula; ya que se comprobó que están por debajo de los observados en algunas tormentas como la seleccionada para el estudio.

Iber como modelo hidráulico-hidrológico (que representa el proceso lluvia escurrimiento) sigue en etapa de adecuación, porque los resultados obtenidos a lo largo de las simulaciones realizadas no son satisfactorios, sin embargo, se dieron avances en la identificación de parámetros y consideraciones que afectan a las ecuaciones utilizadas por Iber, lo que mejorará su módulo hidrológico.

Las modificaciones que se implementaron en Iber como: rellenar depresiones y suavizar topografía, ayudaron a mejorar los resultados, sin embargo, es necesario seguirlas probando para observar el impacto real que causa suavizar una topografía, ya que esto implica un tipo de modificación en los valores reales de las elevaciones. En el caso de rellenar depresiones se debe

de hacer algo similar, ya que se debe de considerar que esas depresiones pueden ser naturales y no causadas por un error de la información existente.

El modelo Iber realiza bien localmente la transformación lluvia-escorrentamiento, pero se tienen problemas para trasladar este proceso de celda a celda, una de las dificultades es por la forma en la que se considera el intercambio del flujo, esto en los modelos bidimensionales, aunque se realizaron modificaciones en el programa para evitar esta desventaja, se tienen que seguir probando, para evaluar su desempeño.

Durante el estudio se observó que los modelos hidrológicos vs los modelos hidráulicos; son más eficientes en los tiempos de cálculo, ya que para realizar una misma simulación el tiempo de cálculo del modelo hidrológico fue de horas (aproximadamente 20 horas) mientras que para el modelo hidráulico fue de días (7 días aproximadamente), esto no quiere decir que sea incorrecto el uso de los modelos hidráulicos, pero el tiempo suele ser un factor estratégico en los proyectos y debe ser tomado en cuenta.

En un momento no muy lejano, los modelos hidráulicos con módulo hidrológico; serán tan confiables y usados como los son hoy en día los modelos hidrológicos de parámetros distribuidos, ya que con estudios como este, se habrán identificado y resuelto los inconvenientes particulares que se deben de tener en las ecuaciones que se utilizan, además si la tecnología avanza como hasta ahora los sistemas de computo serán más potentes y serán capaces de reducir los tiempos de cálculo en los modelos hidráulicos.

7.2 Recomendaciones

El apartado de recomendaciones se divide en dos secciones, la primera dirigida a los usuarios, en la cual se explicarán algunas consideraciones que se deben de tener para lograr resultados confiables en cualquiera de los dos modelos y un apartado especial para las simulaciones con Iber.

En la segunda parte se abordan temas sobre el desarrollo e implementación de herramientas que ayudarían a mejorar el ingreso de información a la interfaz del *softwares*.

7.2.1 Recomendaciones para los usuarios

Se debe de realizar un análisis de cantidad y calidad de la información a la base de datos con la que se alimente el *software*, ya que de ella dependen gran parte de los resultados que se obtendrán durante la simulación.

En cuanto a la topografía, se recomienda usar la más fina y detallada posible, ya que la resolución ayuda mucho en los enrutamientos y sentidos de flujo que se generan en la cuenca.

Se debe de prestar especial atención al tamaño de las superficies que se generen en la geometría, pues los lados que forman dichas superficies afectaran la calidad de la malla y con ello el tiempo de cálculo del modelo.

7.2.1.1 Recomendaciones para Iber

En Iber para los parámetros de cálculo es importante no utilizar un incremento de tiempo de cálculo muy grande. Aunque Iber lo reduce automáticamente esto tiende a provocar oscilaciones en los resultados de gasto.

El coeficiente CFL (número de Courant-Friedrich-Levy o coeficiente de estabilidad) se debe de mantener por debajo del valor de 0.5, para descartarlo como causante de oscilaciones en los resultados.

Una condición que se debe de considerar como inicial es la del umbral del límite seco-mojado que debe de tener como valor menor a 1 mm esto también es importante porque se considera causante de oscilaciones en los resultados.

El método de secado estricto, consume muchos recursos de tiempo de cálculo, por lo que se recomienda usarlo sólo en casos donde el modelo ya fue calibrado y validado, es decir no se debe de usar para las primeras simulaciones.

En cuanto a la malla de cálculo, se recomienda hacer una malla donde se tengan 2 o más zonas con una resolución mayor, por ejemplo en la última simulación se generó una malla con elementos de diferentes tamaños, en el caso de los ríos y 500 m a su alrededor se generaron elementos con una resolución de 75 m, entre el kilómetro 0.5 y 4 hay elementos de 200 m y el área restante de la cuenca que es de menor interés tiene elementos de 300 m. la transición entre cada una de las zonas se debe de realizar de manera gradual para evitar cambios importantes en los cálculos.

7.2.2 Recomendaciones para los desarrolladores

7.2.2.1 Recomendaciones para Iber

La forma de ingresar el coeficiente de rugosidad y el coeficiente de pérdidas es casi manual y está sujeta al criterio de la persona que genera el modelo en Iber, por lo que se considera conveniente implementar una herramienta similar a la de asignación de valores de elevación desde un archivo a una malla, es decir se recomienda que por medio de un archivo previamente tratado en un SIG, se pueda asignar a la geometría o malla de cálculo el valor correspondiente de pérdida o rugosidad asociado a su ubicación espacial.

En cuanto a la asignación de los valores de precipitación sucede algo parecido, y de la misma forma se recomienda implementar una herramienta que asigne los valores de lluvia según su ubicación espacial.

7.2.2.2 Recomendaciones para MPE

Se recomienda hacer una actualización al manual de usuario, ya que los programas utilizados para generar los archivos previos con los que funciona el MPE, ya fueron remplazados por nuevos programas que cada vez tienen más opciones, una alternativa es especificar la función que tenía cada una de las herramientas usadas, para buscar su equivalencia en la actualidad.

El modelo debe ser probado en cuencas de otros países para ser válido como un modelo de uso internacional, además de buscar una patente.

7.3 Líneas de investigación futuras

Se recomienda hacer una línea de investigación sobre el tema de las pérdidas y los valores que se deben de asignar, ya que los valores recomendados en la bibliografía especializada para los modelos hidrológicos de parámetros distribuidos no son tan efectivos para los modelos hidráulicos bidimensionales basados en un esquema de volúmenes finitos.

Otra línea de investigación consiste en medir el impacto de los coeficientes de rugosidad que se asignan a las celdas (en los modelos hidráulicos), esto es por la cantidad de superficie que será afectada por ese coeficiente, recordando que el coeficiente de rugosidad afecta solo las paredes del cauce en un cálculo hidráulico común.

8 Bibliografía

- Ajami, N.K., H. Gupta, T. Wagner, y S. Sorooshian. «Calibration of a semidistributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system.» *Journal of Hidrology*, 2004: 112-135.
- Aparicio Mijares, Francisco Javier. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ciudad de México: Limusa, 2011.
- Arganis Juárez, Maritza Liliana. «Operación óptima de un sistema de presas en cascada para generación hidroeléctrica tomando en cuenta condiciones reales de operación y el uso de muestras sintéticas para el pronóstico.» *Tesis Doctoral*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 2004.
- CENAPRED. *Guía Básica de Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos)*. Ciudad de México: CENAPRED, 2006.
- Chakraborty, K., K. Mehrotra, K. Mohan, y S. Ranka. «Neural networks and their applications.» *Review of scientific instruments*, 1992: 1803-0832.
- Chow, Ven Te, David R Maidment, y Larry W Mays. *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-Hill Interamericana. S.A., 1994.
- Dávila Ordoñez, María Virginia. «Modelación distribuida con "TETIS", dentro del marco del proyecto comparación de modelos distribuidos del NWS de E.E.U.U. aplicado en la "Región de Oklahoma".» *Trabajo Fin de Máster*. Valéncia, España: Universidad Politécnica de Valéncia, Junio de 2011.
- DHI. «Mike 11 User Guide.» *Mike 11 Reference Manual*. Horsholm, Denmark: DHI Water and environment, 2003.
- . «Mike she user manual.» *Volume 2: Reference Guide*. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, December de 2007.
- Domínguez Mora, Ramón, Baldemar Mendez Antonio, Gabriela Esquivel Garduño, y Alejandro Mendoza Resendiz. *Manual del Modelo Pronostico de Esguerrimiento MPE*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 2008.
- Domínguez Mora, Ramón, Jesus Gracia Sanchez, Gabriela Esquivel Garduño, Eliseo Carriozza Elizondo, y Maritza Liliana Arganis Juárez. *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad; CFE*. Ciudad de México: UNAM, 2009.

- Echavarría Soto, Bernardo. «Modelo de Simulación del Funcionamiento Hidráulico del Sistema de Drenaje del Área Metropolitana del Valle de México.» *Tesis Doctoral*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 2013.
- Escalante Sandoval, Carlos Agustin. «Hidrología Urbana.» *Apuntes de Clase*. Ciudad de México: UNAM, 2013.
- Escalante Sandoval, Carlos Agustin, y Lilia Reyes Chavez. *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. Ciudad de México: UNAM, 2008.
- ESRI. 2007.
- Fuentes Mariles, Oscar, y Victor Franco. *Manual de Ingeniería de Ríos (Estudio Hidrológico para Obras de Protección)*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 1999.
- Garrote, Luis, y Rafael Bras. «A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models.» *Journal of Hydrology*, 1995: 279-306.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, y N. Romano. «Green-Ampt curve-number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins.» *Hydrological Processes*, 2013: 1253-1264.
- Hammerstorm, D. «Neural networks at work.» *IEEE spectrum*, 1993: 46-53.
- Haykin, S. *Neural networks-A comprehensive Foundation*. New York: Macmillan, 1994.
- INE. «Instituto Nacional de Ecología.» *La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*. 2005. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/402/cuencas.html> (último acceso: 17 de Mayo de 2013).
- Manoj K., Jain, Kothiyari Umesh C., y Ranga Raju KitturG. «A GIS based distributed rainfall-runoff model.» *Journal of Hydrology*. 26 de April de 2004.
- Mediero Orduña, Luis. «Pronóstico Probabilístico de Caudales de Avenidas Mediante Redes Bayesianas Aplicadas Sobre un Modelo Hidrológico Distribuido.» *Tesis Doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- Mehrdad, Akbarpour. «Simulation of rainfall-runoff process by artificial neural network and HEC-HMS model (case study Zard river basin).» *Proceedings of the international Iran and Russia Conference*. 2004.
- O'Loughlin, Geoffrey, Wayne Hubber, y Bernard Chocat. «Rainfall-runoff processes and modelling.» *Journal of Hydraulic Research*, 2010: 733-751.
- Palacios Carbajal, Sandra Elizabeth. «Comparación entre métodos para estimar avenidas de diseño empleando datos hidrométricos y climatológicos.» *Tesis de Maestría*. Ciudad de México: Posgrado de Ingeniería, UNAM, Mayo de 2013.

- Ponce, Victor Miguel. *Engineering Hydrology*. New Jersey: Prentice Hall, 1989.
- Sarkar, Archana, y Rakesh Kumar. «Artificial neural networks for event based rainfall-runoff modeling.» *Journal of water resource and protection*, 2012: 891-897.
- Singh, Vijay P. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995.
- Springall Galindo, Rolando. *Hidrología*. Ciudad de México: UNAM, 1970.
- Vieux, Baxter E. *Distributed Hydrological Modeling Usin GIS*. Drodrecht, Holanda: Kluwer Academic, 2004.
- Wang, Yu-Chi, Pao-Shan Yu, y Tao-Chang Yang. «Comparision of genetic algorithms and shuffled complex evolution approach for calibrating distributed rainfall-runoff model.» *Hydrological Processes*, 2010: 1015-1026.
- Yu, Pao-Shan, Tao-Chang Yang, y Shen-Jan Chen. «Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed r.» *Journal of Hydrology*. 2 de April de 2001.