

**ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN UNA CUENCA USANDO UN
MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO Y UN MODELO HIDRÁULICO
BIDIMENSIONAL EN VOLÚMENES FINITOS.**

INFORME FINAL

INSTITUTO FLUMEN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Dr. Ernest Bladé I Castellet

Profesor Agregado. Subdirector del Instituto Flumen
Responsable del Proyecto

Ing. Hans Sánchez-Truebos

Investigador

Dr. José Dolz Ripollés

Catedrático de Universidad. Director del Instituto Flumen

Dr Martí Sánchez-Juny

Profesor Titular de Universidad

INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

Dr. Ramón Domínguez Mora

Investigador Titular C

Responsable del Proyecto

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Investigador Titular A

M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo

Técnico Académico Titular

M.I. Gabriela Esquivel Garduño

Técnico Académico por honorarios

Jorge Iván Juárez Dehesa

Becario de Maestría

ELABORADO PARA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

PROYECTO DE COLABORACIÓN INTERNACIONAL

FEBRERO DEL 2014

Índice

1	Datos de los participantes en el proyecto, tanto del II-UNAM como de la contraparte (personal académico y becarios).....	1
1.1	Participantes de Instituto FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña	1
1.2	Participantes del Instituto de Ingeniería de la UNAM.....	1
1.3	Información detallada del jefe de proyecto perteneciente al II-UNAM y del jefe de proyecto del grupo de trabajo extranjero. Ésta debe incluir Currículum Vitae detallado y actualizado, lista de publicaciones con citas, índice H, patentes, lista de aportaciones relevantes, reconocimientos y otro tipo de información que se considere pertinente.	2
1.4	Breve descripción de la capacidad y calidad de la investigación que realiza el grupo extranjero.....	2
1.5	Descripción de la infraestructura de laboratorio y equipo de cómputo disponibles en todas las instituciones participantes.....	3
1.6	Justificación de la movilidad académica solicitada en el marco del proyecto	4
2	NOMBRE DEL PROYECTO	5
2.1	Antecedentes	5
2.2	Modelos hidrológicos.....	6
2.2.1	Clasificación de los modelos hidrológicos.....	7
2.2.2	Modelos concentrados frente a modelos distribuidos	10
2.3	Modelos hidráulicos	13
2.3.1	Ecuaciones fundamentales de la hidráulica que utilizan los modelos hidráulicos ...	15
2.4	Nuevos métodos de obtención de parámetros	15
2.5	Modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en los últimos años.	21
2.5.1	Modelo MIKE SHE.....	21
2.5.2	Modelo SAC-SMA	22
2.5.3	Modelo DBSIM	23
2.5.4	Modelo TOPMODEL.....	23
2.5.5	Modelo HBV	24
2.5.6	Modelo MIKE 11.....	25
2.5.7	Modelo TETIS.....	25
2.5.8	Modelo LISFLOOD.....	26
3	PROBLEMA A RESOLVER Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27

4	HIPÓTESIS	28
5	OBJETIVOS	28
6	METODOLOGÍA.....	29
6.1.1	Modelación y Datos de Entrada en MPE.....	30
6.1.2	Métodos empleados en el Modelo para Pronóstico de escurrimiento	31
6.1.3	Modelo de producción del escurrimiento. Método de número de curva	33
6.1.4	Pérdidas por evapotranspiración (Factor de olvido).....	34
6.1.5	Calibración.....	39
6.2	Modelo Iber.....	39
6.2.1	Módulo hidrodinámico.....	39
6.2.2	Fricción de Fondo	40
6.2.3	Infiltración en Iber.....	40
6.3	Conceptos de Hidrología	43
6.3.1	Cuenca hidrológica	43
6.3.2	Precipitación.....	44
6.3.3	Escurrimiento	45
6.3.4	Hidrograma.....	45
6.3.5	Pérdidas.....	48
6.3.6	Infiltración	49
6.3.7	Sistemas de Información Geográfica.....	51
7	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	56
7.1	Ubicación del sitio en estudio	56
7.2	Hidrología de las cuencas del Grijalva.....	57
7.3	Localización de la cuenca Peñitas	58
7.4	Edafología y cobertura vegetal	59
7.5	Infraestructura hidráulica de la cuenca Peñitas.....	61
7.6	Selección de las tormentas de Análisis	62
8	APLICACIÓN.....	64
8.1	Aplicación del modelo MPE.....	64
8.1.1	Información inicial	64
8.1.2	Precipitación.....	66
8.1.3	Escurrimiento	68

8.2	Aplicación del Modelo Iber	73
8.2.1	Creación de la geometría en la interfaz de Iber	74
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	88
9.1	Resultados del MPE.....	88
9.2	Resultados de Iber.....	89
9.2.1	Resultados de Iber primer etapa.....	89
9.2.2	Resultados Iber segunda etapa	92
9.3	Conclusiones del estudio.....	102
10	Desarrollo de trabajo de tesis de maestría	103
11	ASESORÍAS PRESENCIALES.....	103
12	Preparación de Artículo en revista arbitrada	103
13	Preparación de artículo en congreso	103
14	METAS TÉCNICAS Y DE FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS.....	104
14.1	METAS TÉCNICAS ALCANZADAS.....	104
	Se elaboró el informe final de actividades.	104
14.2	FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS.....	104
15	DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS ESTANCIAS DE INVESTIGACIÓN REALIZADAS O POR REALIZAR	104
16	RESULTADOS OBTENIDOS AL TÉRMINO DEL AÑO	105
17	PRESUPUESTO SOLICITADO.....	105
18	REFERENCIAS.....	106

Índice de Figuras

Figura 6.1 Modelo de escurrimiento conceptual Modclark para parámetros distribuidos.....	36
Figura 6.2 Evolución de la tasa de infiltración según el modelo lineal	43
Figura 6.3 Hidrograma Aislado.....	46
Figura 6.4 Separación del escurrimiento base y directo, usando la curva de vaciado	48
Figura 7.1 Cuencas delimitadas que forman parte del Río Grijalva	57
Figura 7.2 Cuenca Peñitas con sus corrientes principales	58
Figura 7.3 Permeabilidad de la cuenca Peñitas.....	60
Figura 7.4 Tipos de suelo de la cuenca Peñitas	60
Figura 7.5 Usos de suelos de la cuenca Peñitas	61
Figura 7.6 Estaciones que se utilizaron para el análisis de la cuenca Peñitas.....	62
Figura 8.1 Ventana donde se ingresan la información inicial.	65
Figura 8.2 Ventana donde se ingresa el archivo de parámetros hidrológicos y el archivo de lluvia.	65
Figura 8.3 Ventana del submenú Precipitación Media.	66
Figura 8.4 Resultados calculados por MPE.....	67
Figura 8.5 Hietograma que proporciona el MPE.....	68
Figura 8.6 Ventana de Escurrimiento Observado	69
Figura 8.7 Ventana de parámetros de calibración.	70
Figura 8.8 Resultados que da el MPE cuando se calcula el Hidrograma.	71
Figura 8.9 Tabla resumen del Hidrograma calculado por MPE.....	72
Figura 8.10 Tabla Resumen que genera el modelo MPE.	73
Figura 8.11 Ventana de inicio de Iber y ruta para crear el RTIN, a partir del archivo ASCII.....	75
Figura 8.12 Ventana para ingresar el archivo. ASCII y datos adicionales como Tolerancia, Lado Máximo, Lado mínimo.	75
Figura 8.13 Geometría de la cuenca peñitas.....	76
Figura 8.14 Muestra la ruta para ingresa los Datos del Problema.....	76
Figura 8.15 Ventana que se despliega en el submenú datos de problema (pestaña parámetros de tiempo).....	78
Figura 8.16 Muestra la ventada de Datos del Problema en la pestaña de General.....	78
Figura 8.17 Muestra la ruta para la asignación de las condiciones de contorno.....	79
Figura 8.18 Asignación de salidas en 2D	80
Figura 8.19 Muestra como se ven las salidas cuando ya fueron asignadas a los elementos.....	80
Figura 8.20 Ruta para la asignación de Rugosidad por el método de uso de suelo.....	81
Figura 8.21 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.	81
Figura 8.22 Ruta para la asignación de la precipitación.....	82
Figura 8.23 Asignación de la precipitación por medio de un hietograma de intensidades.....	83
Figura 8.24 Muestra la asignación de las lluvias según los polígonos de Thiessen.....	84

Figura 8.25 Secuencia para asignar las pérdidas en una geometría	85
Figura 8.26 Ventana para la asignación de pérdidas	85
Figura 8.27 Muestra la geometría con las pérdidas según el SCS.....	86
Figura 8.28 Malla de cálculo.....	87
Figura 9.1 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE	88
Figura 9.2 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv2	90
Figura 9.3 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3	91
Figura 9.4 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv4	92
Figura 9.5 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3	94
Figura 9.6 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas, Iber con el proyecto Peñitasv3 sin pérdidas y MPE sin pérdidas.....	95
Figura 9.7 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 01 con $n=0.01$ sin pérdidas.	96
Figura 9.8 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 02 con $n=0.02$ sin pérdidas.	97
Figura 9.9 Mapa de tirantes al final de la simulación en Iber.....	98
Figura 9.10 Mapa de detalle de los elementos 2383 y 2356	99
Figura 9.11 Tirante al final de la simulación en la celda 3291	100
Figura 9.12 Comparación de hidrogramas 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.....	101

Índice de Tablas.

Tabla 6.1 Direcciones de flujo, modelo de los ocho puntos de vertido	54
Tabla 7.1 Estaciones automáticas de CFE utilizadas en la modelación de Peñitas y Chicoasen	62
Tabla 7.2 Muestra el día de inicio y el día del término de las tormentas utilizadas para calibrar el modelo	63
Tabla 8.1 Parámetros de tiempo para cada uno de los proyectos de Iber.	77
Tabla 8.2 Parámetros de cálculo para cada uno de los proyectos de Iber	77
Tabla 9.1 Parámetros de tiempo para cada proyecto de Iber primera etapa.	89
Tabla 9.2 Parámetros de cálculo para cada proyecto de Iber primera etapa.	89
Tabla 9.3 Tabla de volúmenes para las simulaciones de la primera etapa	91
Tabla 9.4 Valores de cota para los vértices 2383 y 2356	100
Tabla 9.5 Tabla de volúmenes.....	101

1 Datos de los participantes en el proyecto, tanto del II-UNAM como de la contraparte (personal académico y becarios).

1.1 Participantes de Instituto FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña

Dr. Ernest Bladé I Castellet
Cargo: Profesor Agregado. Subdirector del Instituto Flumen
Teléfonos: +34 93 401 70 70

Ing. Hans Sánchez-Truebos
Cargo: Investigador
Teléfonos: +34 93 401 73 74

Dr. José Dolz Ripollés
Cargo: Catedrático de Universidad. Director del Instituto Flumen
Teléfonos: +34 93 401 64 74

Dr Martí Sánchez-Juny
Cargo: Profesor Titular de Universidad
Teléfonos: +34 93 401 64 81

1.2 Participantes del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Dr. Ramón Domínguez Mora
Investigador Titular C
Teléfonos: 5623 3666

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez
Investigador Titular A
Teléfonos: 5623 36 00 ext 8644

M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo
Técnico Académico Titular B
Teléfonos: 56233600 8620

M.I. Gabriela Esquivel Garduño
Técnico Académico por honorarios
Teléfonos: 5623 36 00 ext 8644

Ing. Jorge Iván Juárez Dehesa

Becario de Maestría (de CONACYT, con beca cero en IINGEN)

1.3 Información detallada del jefe de proyecto perteneciente al II-UNAM y del jefe de proyecto del grupo de trabajo extranjero. Ésta debe incluir Currículum Vitae detallado y actualizado, lista de publicaciones con citas, índice H, patentes, lista de aportaciones relevantes, reconocimientos y otro tipo de información que se considere pertinente.

Responsable de proyecto del Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña

Dr. Ernest Bladé I Castellet

Cargo: Profesor Agregado. Subdirector del Instituto Flumen

Teléfonos: +34 93 401 70 70

Responsable de proyecto del Instituto de Ingeniería UNAM

Dr. Ramón Domínguez Mora

Investigador Titular C. Instituto de Ingeniería, UNAM

Teléfonos: 5623 3666

1.4 Breve descripción de la capacidad y calidad de la investigación que realiza el grupo extranjero.

El Instituto Flumen tiene las siguientes áreas de investigación consolidadas:

1. Dinámica de ríos.

- Avenidas e inundaciones. Medidas protectoras
- Restauración de espacios fluviales
- Hidráulica de puentes
- Erosión y sedimentación
- Incidencia de las infraestructuras en la dinámica fluvial

2. Dinámica de embalses.

- Limnología de embalses

- Hidrodinámica de embalses
- Incidencia de los embalses en el comportamiento natural del río

3. Hidrología Urbana.

- Lluvia y generación de caudales en zona urbana
- Riesgo de inundación en zona urbana
- Diseño de grandes colectores. Elementos singulares

4. Hidráulica de canales

- Diseño hidráulico
- Control y automatización

5. Hidráulica de presas

- Aliviaderos. Aliviaderos escalonados
- Desagües

Como indicadores de la calidad de la investigación se han publicado 47 artículos en revistas indexadas en el SCI en los últimos 5 años, y se han leído 9 tesis doctorales en el mismo período de tiempo

1.5 Descripción de la infraestructura de laboratorio y equipo de cómputo disponibles en todas las instituciones participantes

Equipo de cómputo disponible

Instituto de Ingeniería

4 Computadoras personales

2 impresoras

1 escáner

Instituto Flumen, UPC, BCN, España

Estructura de laboratorio disponible en el Instituto Flumen, BCN, España

- Laboratorio de Modelos Reducidos (2000 m² de superficie útil y 0.6 m³/s de caudal disponible). La puesta en marcha del laboratorio fue posible gracias a la colaboración de diferentes entes públicos y privados, en especial la empresa ENDESA

- Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos (800 m² de superficie útil y 0.25 m³/s de caudal disponible)
- Laboratorio de Hidrometría

Equipo de cómputo disponible Instituto Flumen UPC, BCNA, España.

El instituto Flumen dispone de ordenadores personales diseñados para optimizar su capacidad de cálculo. Para el mencionado proyecto se podrían destinar:

4 computadoras personales

3 impresoras

1 escáner

1.6 Justificación de la movilidad académica solicitada en el marco del proyecto

Es importante realizar reuniones entre las partes colaboradoras para hacer un análisis y seguimiento de los resultados que se determinen en el estudio propuesto, para tener presencia del Instituto de Ingeniería en universidades del extranjero como también impulsar la presencia de investigadores extranjeras en el Instituto de Ingeniería.

2 NOMBRE DEL PROYECTO

ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN UNA CUENCA USANDO UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO Y UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL EN VOLÚMENES FINITOS.

2.1 Antecedentes

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.

El párrafo anterior tiene la idea de 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: estiman 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 fórmula de fricción de Chezy en 1770, la invención del pluviómetro y la recolección de datos meteorológicos en Europa en el siglo XIX (O'Loughlin, G. et al, 2010).

En 1850 Thomas J. Mulvaney y su Hermano 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-escorrentamiento (O'Loughlin, G. et al, 2010).

Aun 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 de 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 (Hydrologic 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.

2.2 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 (Orduña M. L., 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.

2.2.1 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 (Orduña M. L., 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 períodos largos de tiempo. Los modelos continuos se aplican fundamentalmente para el pronóstico de gastos.

2.2.2 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 ha tendido a utilizar 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 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 topográfica, uso de suelo, tipos de suelo, lluvia, etc., se produce una mayor utilización 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 (Orduña M. L., 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 mejor que el área de la cuenca, el gasto máximo estará muy influenciado por la dirección y velocidad de la tormenta. En esta caso, una tormenta que se mueve hacia aguas debajo 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 distribuidos y modelos 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.

2.3 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, S. B. 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. Este último se conoce como el método de la onda difusa y 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.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(s_0 - s_f) = 0 \quad \text{Ecu. 2.1}$$

Dónde:

$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$	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 momentum del flujo:

- 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.

2.3.1 Ecuaciones fundamentales de la hidráulica que utilizan los modelos hidráulicos

Ecuación de continuidad.

$$Q_1 V_1 = Q_2 V_2 \quad \text{Ecu. 2.2}$$

Ecuación de momentum.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_f) \quad \text{Ecu. 2.3}$$

Para simular el funcionamiento de flujos a presión.

$$-\frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} dxdt = \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} dxdt \quad \text{Ecu. 2.3}$$

Donde:

Q	Gasto, m^3/s
A	Área hidráulica, m^2
y	tirante, m
g	aceleración de la gravedad, m/s^2
x	distancia en la dirección del flujo, m
t	tiempo, s
α	Coefficiente de corrección por la distribución de la velocidad
I_0	Pendiente del fondo
I_f	Pendiente de fricción
ρ	Densidad del Agua. kg/m^3

2.4 Nuevos métodos de obtención de parámetros

Existen diversos artículos y publicaciones que abordan el tema de los modelos en la relación lluvia-escurrimiento, debido a que un modelo lluvia-escurrimiento 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 escurrimiento superficial y el enrutamiento hidráulico a través de cada depósito y el sistema del río se efectúan con una resolución espacial y temporal; (Montaldo N. et al, 2004).

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-escurrimiento 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 en el 2004 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 la 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 K. Jain, et al, 2004 describen un proceso basado en un modelo de lluvia-escorrentamiento 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.

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 K. Jain, et al, 2004 concluyen que el modelo propuesto tiene la limitación de que los valores de algunos parámetros se obtienen mediante calibración.

Wang et al, 2010 compara 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.

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) S. Grimaldi, et al. 2012, 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-escorrimento 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-escorrimento. Sin embargo, en sustitución de datos de gasto por lluvia reduce el problema, pero no lo elimina por completo.

Archana S., et al., 2012, comenta que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se han propuesto como modelos de caja negra eficientes para la predicción de la hidrología. 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 K. 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 D., et al, 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 S. ,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. (Archana S. et. al., 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. (Archana S. et. al., 2012)

Archana S y otros en el 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 entras han sido seleccionadas en base a los conceptos de tiempo de concentración y la recesión de un hidrograma de la tormenta.

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 determinó 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.

2.5 Modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en los últimos años.

Los sistemas hidrológicos suelen presentar una gran heterogeneidad, tanto en los datos de entrada de lluvia, como en las características del terreno a lo largo de la cuenca. La gran ventaja de los modelos hidrológicos distribuidos es que permiten tener en cuenta estas heterogeneidades mediante una desratización de la cuenca en celdas. Los principales modelos hidrológicos de lluvia-escurrimiento de parámetros distribuidos en el espacio que han sido utilizados hasta la actualidad se mencionan a continuación:

2.5.1 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 módulo 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 beta 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.

2.5.2 Modelo SAC-SMA

El modelo SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting) ha sido desarrollado por el National Weather Service de los Estados Unidos (Bunash, 1995; 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 cuál 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.

2.5.3 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 (Garnote 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.

2.5.4 Modelo TOPMODEL

El modelo TOPMODEL se utiliza para simular el comportamiento hidrológico en cuencas de pequeño tamaño (Beven et al, 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 interceptación de la vegetación y el otro el almacenamiento por drenaje que controla la recarga de la zona saturada.

2.5.5 Modelo HBV

El modelo HBV se fundamenta en un balance hidrológico en el cual el escurrimiento o diferencia entre la precipitación y la suma de la evapotranspiración y el gasto, es igual al incremento de la suma del escurrimiento debido al deshielo de nieve, de la humedad del suelo y la profundidad de la zona saturada. Los datos de entrada son la lluvia, la zona cubierta de nieve y la temperatura del aire. La humedad del suelo se calcula a partir de un índice de humedad que tiene en cuenta la interceptación y el almacenamiento de la humedad del suelo. La generación de escurrimiento se simula mediante una representación con dos almacenamientos y un filtro de suavización del flujo generado, a partir de una función de ponderación triangular. El transporte de gasto se simula mediante un modelo de Muskingum. (Bergström, S., 1995)

2.5.6 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. Por otra parte, hay que mencionar el modelo MIKE-SHE que supone un desarrollo del modelo SHE. (DHI, 2003)

2.5.7 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 O. M. V. y Frances G. F., 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 O. M. V. y Frances G. F., 2011)

2.5.8 Modelo LISFLOOD

Recientemente se han desarrollado modelos que utilizan las ventajas derivadas de la disponibilidad de SIG, como por ejemplo, el modelo LISFLOOD. Este modelo se utiliza para simular la generación de escurrimientos en cuencas de gran tamaño mediante la representación de los procesos de lluvia, interceptación, deshielo, evapotranspiración, infiltración, percolación flujo subterráneo y escurrimiento superficial. (Van Der Knijff J. M., Younis J. y De Roo A. P. J., 2008)

El modelo toma como datos de entrada las series temporales de lluvia y temperatura. La infiltración se simula mediante la ecuación de Green-Ampt, En los procesos de escurrimiento superficial y transporte de flujo por el cauce se ha utilizado el módulo de transporte de onda cinemática basado en SIG. El modelo LISFLOOD también permite estimar las zonas inundadas a partir de los datos MDT. (Van Der Knijff J. M., Younis J. y De Roo A. P. J., 2008)

3 PROBLEMA A RESOLVER Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

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.

4 HIPÓTESIS

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

5 OBJETIVOS

Verificar la adecuación y confiabilidad de un modelo hidráulico de flujo bidimensional 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 Esguerrimiento (MPE) que ya ha sido validado y calibrado en algunas cuencas del país.

En caso de verificar su aplicabilidad en la cuenca analizada, se optará por seleccionar una nueva cuenca para continuar con esta validación.

6 METODOLOGÍA

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.

La modelación que permite transformar la lluvia en escurrimiento, se suele dividir en dos partes:

- a) Modelos de producción.- Estiman que parte de la lluvia no se transforma en escurrimiento, es decir las pérdidas, por diferencias, que parte de esta lluvia se transforma en escurrimiento.
- b) Modelos de Transferencia.- Estiman como el escurrimiento se desplaza a través de las distintas partes de la cuenca hasta llegar al sitio de interés.

En este tipo de modelos se desarrolló fundamentalmente en el método del hidrograma unitario.

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, del tipo y uso del suelo y de la precipitación.

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algunas de sus utilerías se pueden dividir la cuenca en estudio en partes tan pequeñas (Generalmente celdas cuadradas o pixeles) cada una con sus características específicas. Con los modelos numéricos del terreno (MNT), 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, ha ido 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.

El programa Modelo para Pronóstico de Escurrimiento (MPE), desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic, tiene la finalidad de obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el número de curva o Soil Conservation Service (SCS), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia. Para ello 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 consideran las pérdidas por evapotranspiración. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado.

6.1.1 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

6.1.2 Métodos empleados en el Modelo para Pronóstico de escurrimiento

6.1.2.1 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 pesa 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:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) hp_j \quad \text{Ecu. 6.1}$$

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

$$w_j(x, y) = \frac{\frac{1}{r_j^\mu}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^\mu}} \quad \text{Ecua 6.2}$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad \text{Ecua. 6.3}$$

Donde

$\emptyset(x, y)$ 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 6.1 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:

$$\xi_j = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{cases} \quad \text{Ecua 6.4}$$

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

$$w_j(x, y) = \frac{\xi_j^u(x, y)}{\sum_{i=0}^N \xi_j^u(x, y)} \quad \text{Ecua 6.5}$$

6.1.3 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:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Ecua 6.6}$$

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad \text{Ecua 6.7}$$

$$I_a = \lambda S \quad \text{Ecua 4.8}$$

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 practicas

La forma más extendida del método se determina a partir de la combinación de las ecuaciones 6.6, 6.7 y 6.8

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; I_a \leq P \quad \text{Ecua 6.9}$$

Sustituyendo $I_a = 0.2S$ en la ecuación

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ecua 6.10}$$

El valor de S, en centímetros, está dado por

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times CN)}{CN} \quad \text{Ecua 6.11}$$

Sustituyendo la ecuación 6.11, se obtiene

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad \text{Ecua 6.12}$$

Donde

CN es el número de curva, determinando a partir de uso y tipo de suelo; también es necesario contemplar las siguientes consideraciones.

P Precipitación total, *cm*

I_a Infiltración inicial, *cm*

F_a Infiltración acumulada, *cm*

P_e Precipitación efectiva, *cm*

S Infiltración potencial máxima, *cm*

6.1.4 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 factos 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.

$$Pa_n = P_1 * fx^{n-1} + P_2fx^{n-2} + \dots + P_nfx^{n-n} \quad \text{Ecuación 6.13}$$

Donde

Pa_n 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 6.12, para estimar la precipitación efectiva.

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

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

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 6.1), 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 .

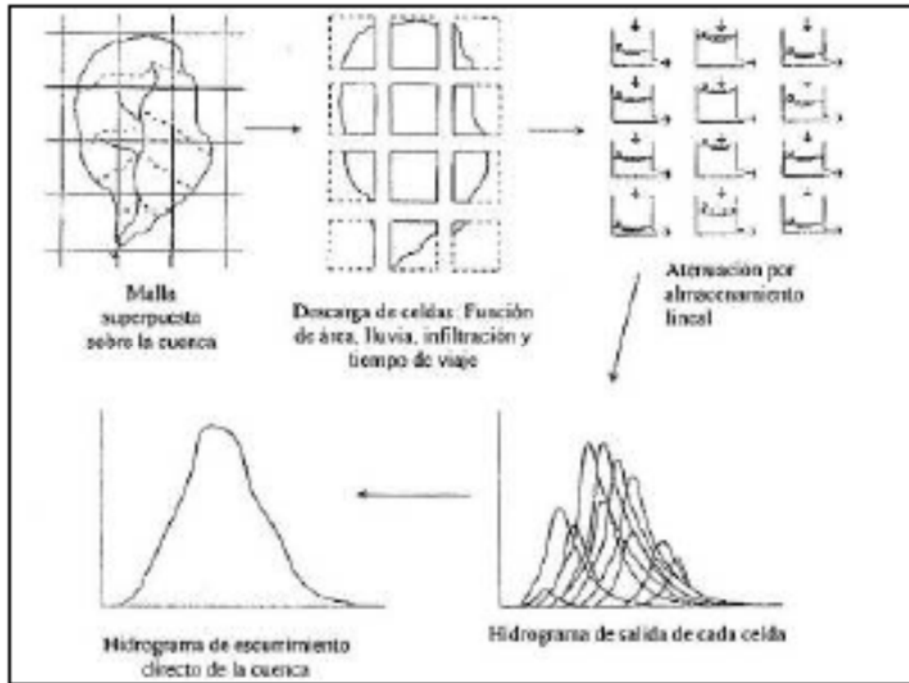


Figura 6.1 Modelo de escurrimiento conceptual Modclark para parámetros distribuidos

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 hidráulico 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:

$$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad \text{Ecuación 6.14}$$

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:

$$k = 0.6T_c \quad \text{Ecua 6.15}$$

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.

$$S_{prisma} = k O \quad \text{Ecua 6.16}$$

$$S_{cuña} = k x (I - O) \quad \text{Ecua 6.17}$$

$$S = k[x I + (1 - x)O] \quad \text{Ecua 6.18}$$

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:

$$S_1 = k[xI_1 + (1 - x)O_1] \quad \text{Ecua 6.19}$$

$$S_2 = k[xI_2 + (1 - x)O_2] \quad \text{Ecua 6.20}$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \quad \text{Ecua 6.21}$$

$$C_0 = \left(\frac{-kx + 0.5\Delta t}{k - kx + .5\Delta t} \right) \quad \text{Ecua 6.22}$$

$$C_1 = \left(\frac{kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad \text{Ecua 6.23}$$

$$C_2 = \left(\frac{k - kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad \text{Ecua 6.24}$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad \text{Ecua 6.25}$$

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

$$C_0 = C_1 = \left(\frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad \text{Ecua 6.26}$$

$$C_2 = \left(\frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad \text{Ecua 6.27}$$

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad \text{Ecua 6.28}$$

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:

$$T_t = T_c \left(\frac{L v_N}{L v_n} \right) \quad \text{Ecua 6.29}$$

Donde:

Tc Tiempo de concentración, h

Tt Tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza, h

Lv_N Longitud de viaje de la celda más lejana

Lv_n Longitud de viaje de la celda que analiza

6.1.5 Calibración

Para cada cuenca será 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.

6.2 Modelo Iber

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina 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.

6.2.1 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.

6.2.2 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.

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad \text{Ecua 6.30}$$

Donde:

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

ρ .- Es la densidad del agua

6.2.3 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.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = -i \quad \text{Ecua 6.31}$$

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.

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

Ecua 6.32

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

6.2.3.1 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 de infiltración potencial f se calcula con la siguiente expresión:

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

Ecua 6.33

$$F = \int_0^t f dt$$

Ecua 6.34

$$L = L_0 + \frac{F}{\Delta\theta}$$

Ecua 6.35

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i$$

Ecua 6.36

Donde:

k_s La permeabilidad saturada del suelo

h El calado

ψ La succión en la región de suelo no saturada

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

θ_i El contenido de humedad inicial del suelo

ϕ La porosidad total del suelo

L La anchura 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:

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_e} \quad \text{Ecua 6.37}$$

Siendo θ_r la capacidad de retención (humedad irreductible o 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:

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i = \phi - \theta_r - \theta_e S_e = \theta_e(1 - S_e) \quad \text{Ecua 6.38}$$

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

6.2.3.2 Horton

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

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

Ecua 6.39

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.

6.2.3.3 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 6.2).

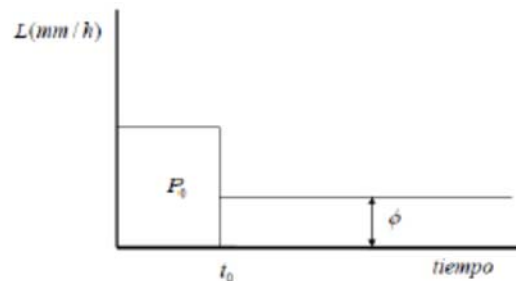


Figura 6.2 Evolución de la tasa de infiltración según el modelo lineal

6.3 Conceptos de Hidrología

El objetivo principal de este apartado es plantear los conceptos de hidrología y estadística que serán mencionados en los capítulos siguientes.

6.3.1 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.

6.3.2 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, 2009).

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 atmósfera 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 cumulonimbos 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 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-frío) 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).

6.3.3 Esgurrimiento

Durante la precipitación existen diversos factores que atenúan el proceso de lluvia-esgurrimiento, 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 esgurrimiento 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 esgurrimiento 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 (2009) define el esgurrimiento 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.

6.3.4 Hidrograma

La medición del gasto que escurre por una sección determinada durante un periodo de tiempo definido proporciona un hidrograma, Chow, 1959 definió 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 tormenta y fisiografía, de acuerdo con Aparicio (2009), los principales elementos de un hidrograma son (Figura 6.3):

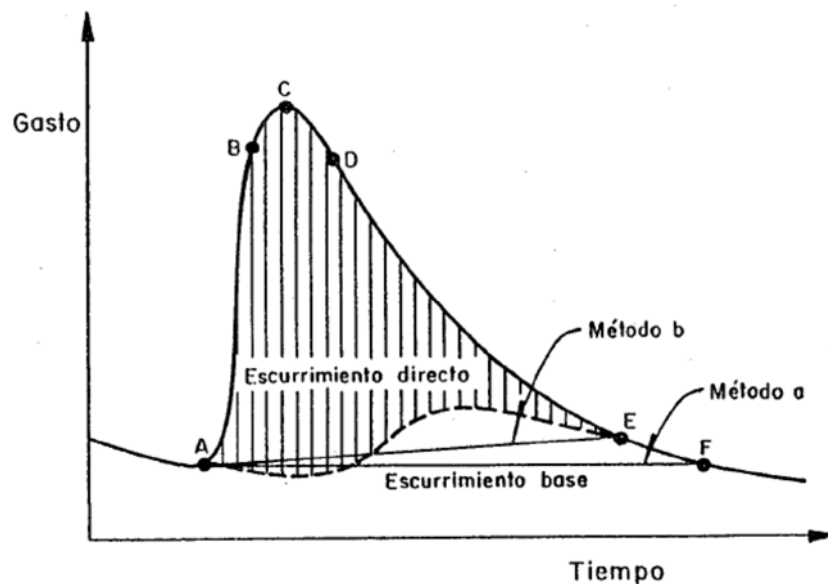


Figura 6.3 Hidrograma Aislado

(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.

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

(D): 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.

(E): 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 6.3) hasta que corte con la curva de recesión del hidrograma (punto F de la Figura 6.3) (Fuentes y Franco 1999).

Método 2: se dibuja una línea horizontal a partir del inicio del escurrimiento directo (Punto A de la Figura 6.4; hasta la proyección que corresponde al gasto máximo y se designa como el punto C'.

Se calcula el tiempo de vaciado del escurrimiento directo como:

$$M = 0.827A^2 \qquad \text{Ecuación 6.40}$$

Donde

M Tiempo de vaciado del escurrimiento directo, días

A Área de la cuenca, km^2

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.

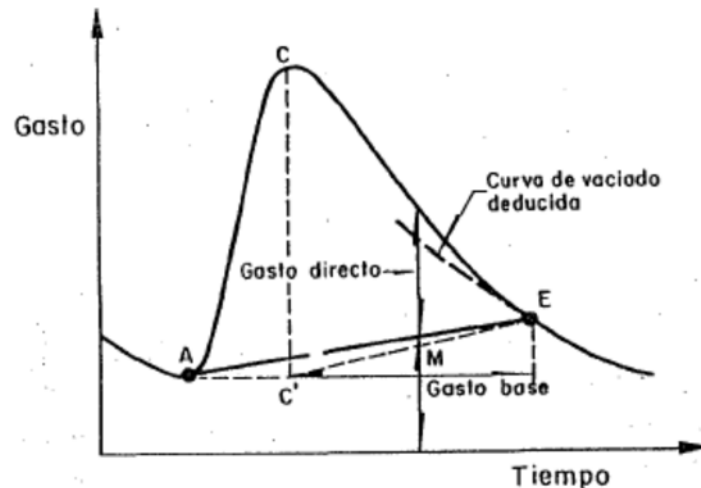


Figura 6.4 Separación del escurrimiento base y directo, usando la curva de vaciado

El volumen total de escurrimiento se puede obtener como el área bajo la curva del hidrograma, es decir $\int_{t_0}^t Q dt$, el volumen de escurrimiento directo es entonces $\int_{t_0}^t (Q - Q_b) dt$ (Aparicio, 2009).

6.3.5 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, 2009), 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 6.41:

$$V_p = V_{LL} - V_{ED} \quad \text{Ecu. 6.41}$$

Donde:

V_p Volumen de pérdidas

V_{LL} Volumen llovido

V_{ED} Volumen de escurrimiento directo

6.3.6 Infiltración

La medición de la infiltración puede ser realizada mediante distintos métodos entre los que destacan: *La capacidad de infiltración media*, *Coefficiente 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 llueva 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 “lámina de lluvia en exceso” con dicho hidrograma. 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:

$$C_E = \frac{V_{ED}}{V_{LL}} \quad \text{Ecuación 6.42}$$

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

$$P_e = \frac{(P - \frac{508}{CN} + 5.08)^2}{p + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad \text{Ecuación 6.43}$$

Donde

CN Número de Curva que puede calcularse con la ecuación 6.43 o con la ecuación 6.44, cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvias y escurrimientos, o bien con base en el tipo y uso de suelo como se verá más adelante.

P Precipitación total, en cm

p_e Precipitación efectiva, en cm

Si se dispone de la información de varias tormentas para las que se conoce la precipitación total p y la precipitación efectiva pe el valor del número de curva se despeja de la ecuación 6.43, lo que resulta:

$$CN = \frac{2540}{25.4 + 5p - 10pe - 5\sqrt{pe * (4pe - 5p)}} \quad \text{Ecuación 6.44}$$

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.

6.3.7 Sistemas de Información Geográfica

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 ArcHydro (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 30 x 30 m y fueron obtenidos por el mismo instituto a partir de sus propias cartas topográficas 1:50 000.

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 *Feature class*, 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 qué 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 rodeadas de celdas cuya elevación es mayor a la que tiene la celda o celdas 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 6.1

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 parar 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 6.1 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 una 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

DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS DEL RÍO GRIJALVA

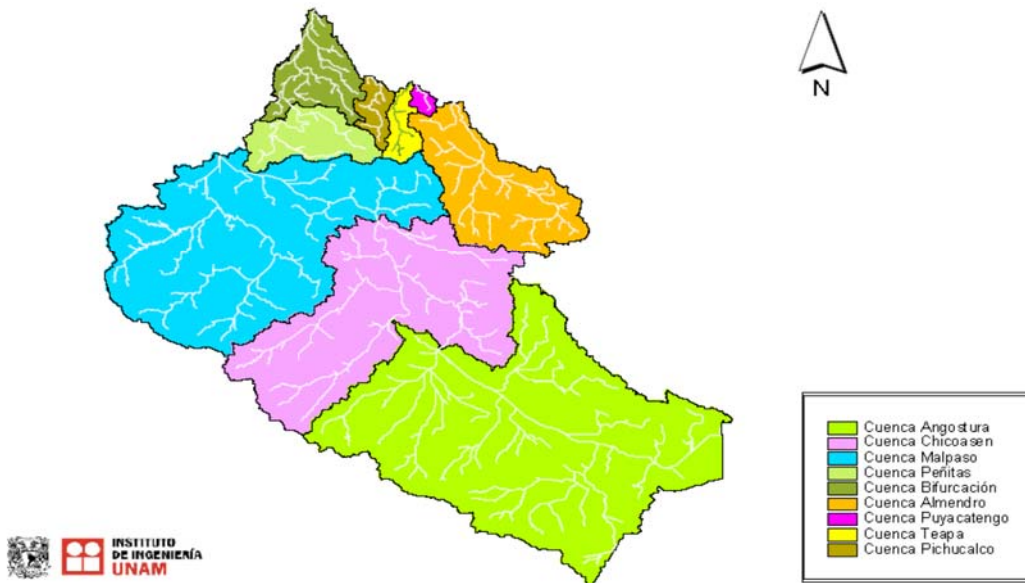


Figura 7.1 Cuencas delimitadas que forman parte del Río Grijalva

7.2 Hidrología de las cuencas del Grijalva

Con un área de 53 mil km^2 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. (Instituto Nacional de Ecología, 2005).

7.3 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, a partir de la cortina de la presa Malpaso hasta la salida de la cuenca peñitas es de $1\,300\text{km}^2$. Su cauce principal formado de las aportaciones por cuenca propia y del agua turbinada por la presa Malpaso tiene una longitud de 116 km y su pendiente es de 0.019. El escurrimiento medio anual es de 3 686 millones de m^3 (Figura 7.2)



Figura 7.2 Cuenca Peñitas con sus corrientes principales

7.4 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 Chipas, 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 Chipas 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 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. (Instituto Nacional de Ecología, 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 7.3, por ser un suelo abundante en arcillas, Figura 7.4. 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 7.5.

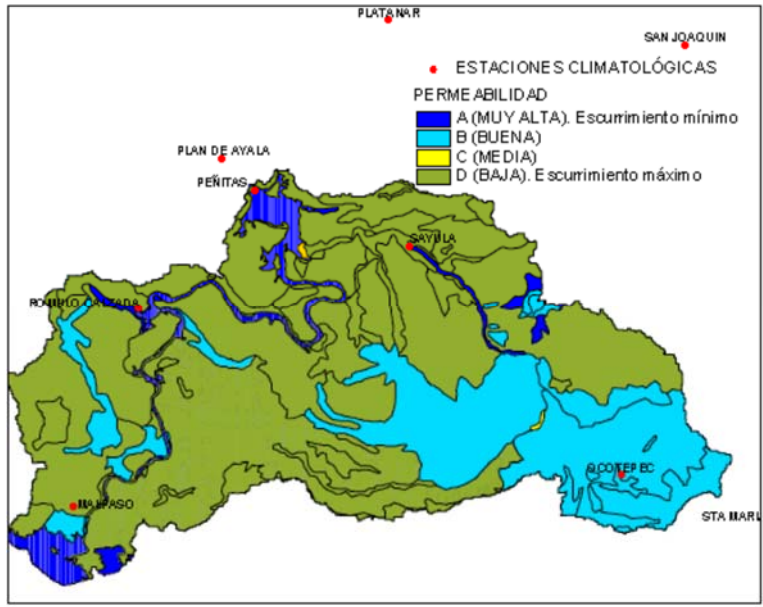


Figura 7.3 Permeabilidad de la cuenca Peñitas

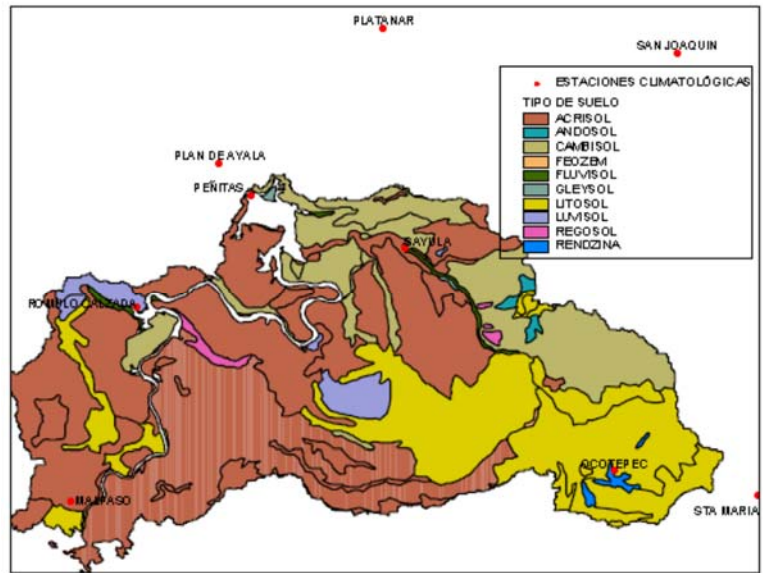


Figura 7.4 Tipos de suelo de la cuenca Peñitas

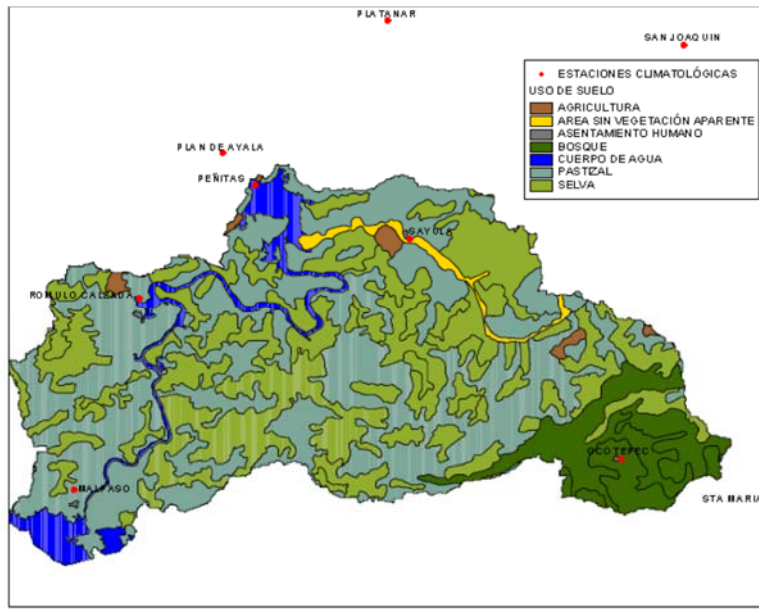


Figura 7.5 Usos de suelos de la cuenca Peñitas

7.5 Infraestructura hidráulica de la cuenca Peñitas

Dentro de la cuenca en estudio se localiza una presa llamada 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 7.1 se pueden dan algunas especificaciones técnicas de cada una de las estaciones antes mencionadas.

Tabla 7.1 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
Ocotepc 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 7.6 se muestran las estaciones climatológicas e hidrométricas de CONAGUA y CFE utilizadas en la cuenca en estudio.

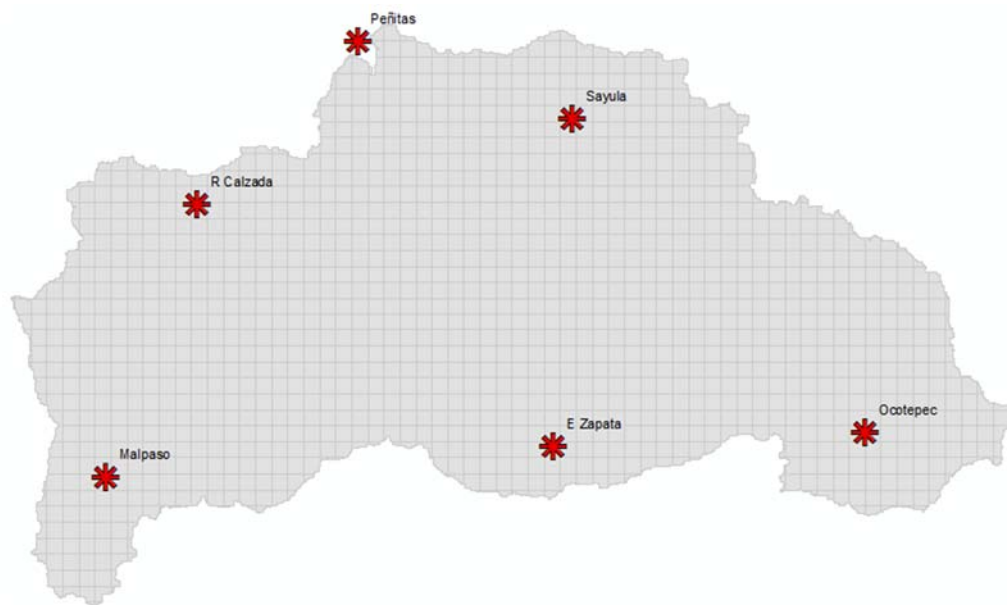


Figura 7.6 Estaciones que se utilizaron para el análisis de la cuenca Peñitas

7.6 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 7.2 se enlistan las tormentas seleccionadas para la calibración del modelo en la cuenca Peñitas.

Tabla 7.2 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

8 APLICACIÓN

En esta sección se realizara una descripción de cómo es que se aplica el modelo MPE y el modelo Iber al caso de estudio, explicando la manera en la que se generan los archivos previos con los que se alimenta cada programas y las consideraciones que se tomaron para los cálculos.

8.1 Aplicación del modelo MPE

En este apartado se presentará la aplicación del MPE a la cuenca Peñitas y los resultados que se obtienen.

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:

8.1.1 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 de la lluvia a analizar, el ΔT en (min.), y se de Aceptar (Figura 8.1).

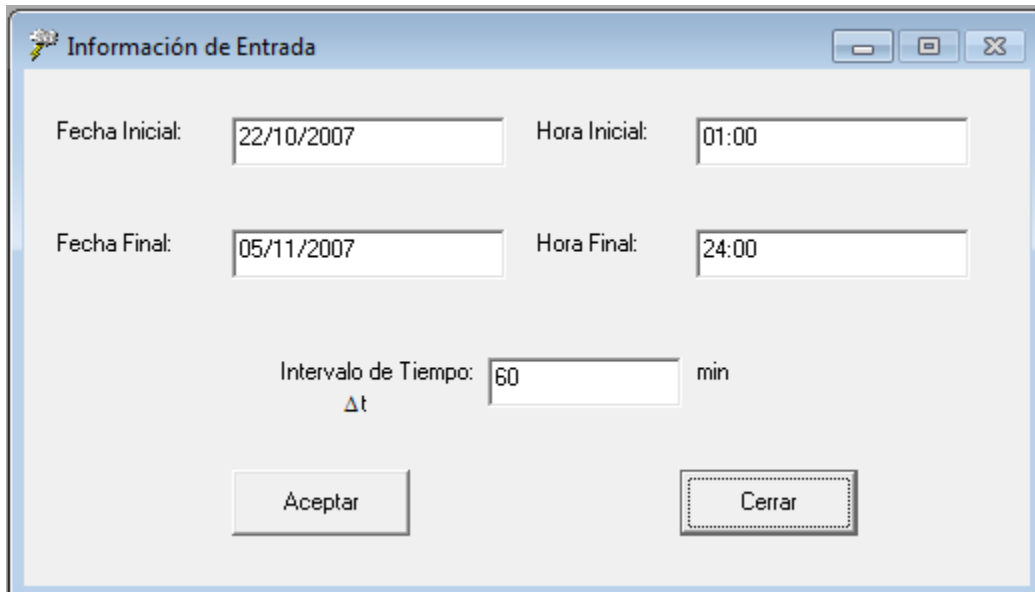


Figura 8.1 Ventana donde se ingresan la información inicial.

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 archivo es “modclarkcnpeñitassinmalpaso.txt”. También se busca y se selecciona el archivo que contiene la información de la lluvia en el caso de aplicación es “llupelitas22octal5nov07.txt” y se da aceptar ver Figura 8.2.

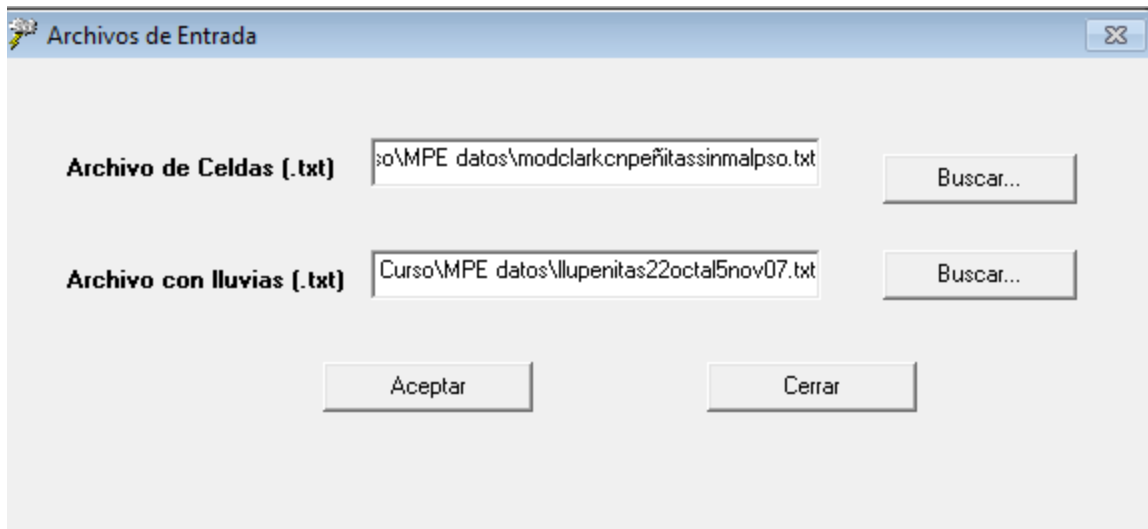


Figura 8.2 Ventana donde se ingresa el archivo de parámetros hidrológicos y el archivo de lluvia.

8.1.2 Precipitación.

Se selecciona el menú **Precipitación**, el cual es capaz de calcular la precipitación total, precipitación media y el hietograma de la precipitación media.

Dentro del menú **Precipitación**, está el submenú **Precipitación Media** se selecciona y se da *click*, se desplegará una nueva ventana ver Figura 8.3.

La ventana anterior tiene el botón **Calcular** se da *click*, y el programa realiza el cálculo de la precipitación total, precipitación media y el hietograma de la precipitación media con los datos la información contenida en los archivos de parámetros hidrológicos y de llluvias.

Una forma de verificar que el archivo de celdas (parámetros hidrológicos) se está leyendo correctamente es por medio de la comparación del área de la cuenca que se obtiene por medio del SIG y la que muestra el MPE en la ventana de *Precipitación Media* ver Figura 8.4.

FECHA	HORA	LLUVIA mm

Figura 8.3 Ventana del submenú Precipitación Media.

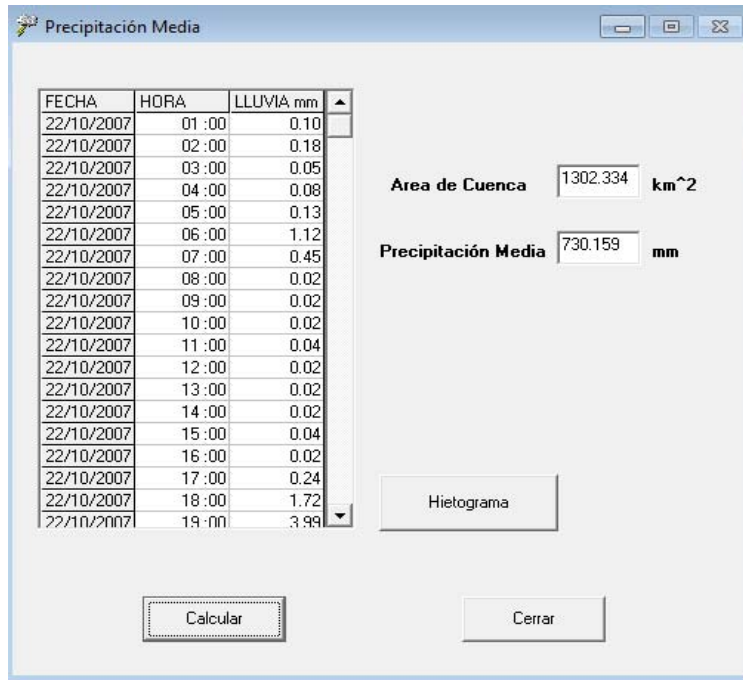


Figura 8.4 Resultados calculados por MPE.

En la Figura 8.4 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 8.5.

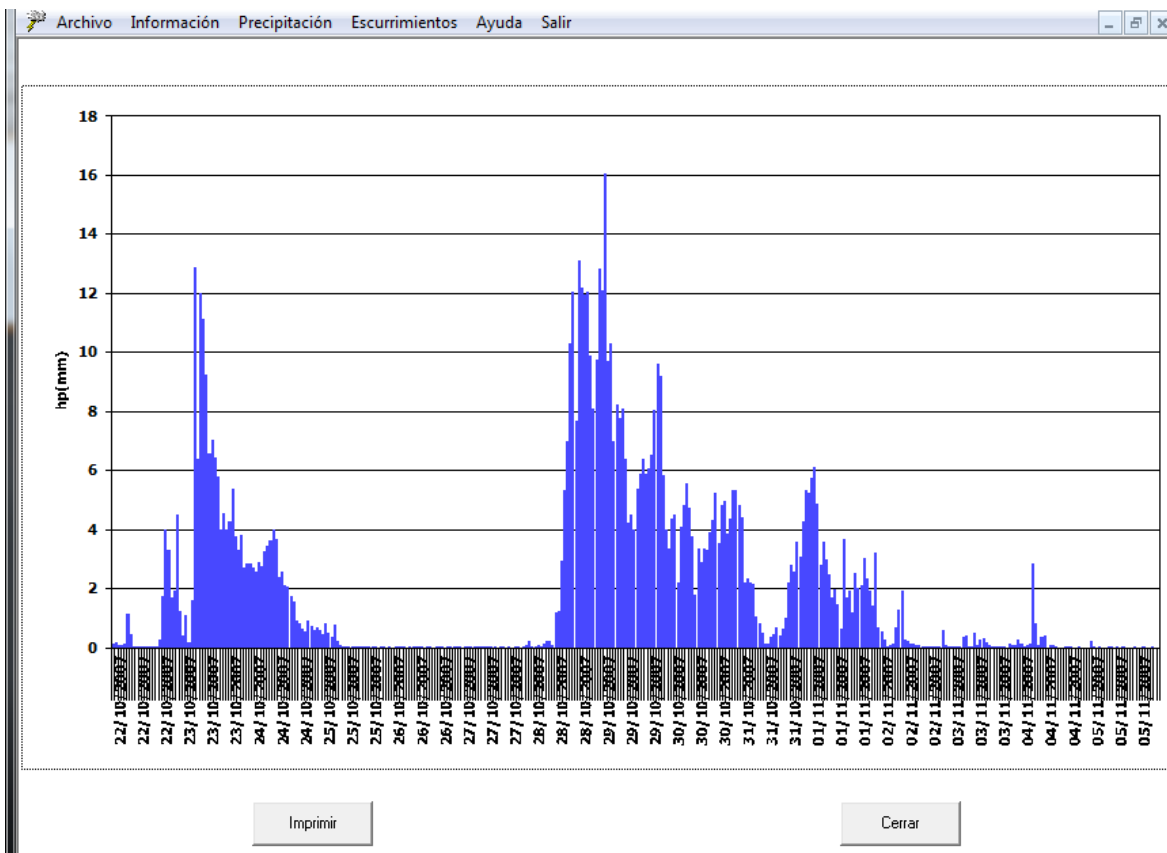


Figura 8.5 Hietograma que proporciona el MPE.

En la Figura 8.5 se puede observar que cada barra del hietograma tiene una duración de una hora y la lámina de lluvia máxima es de 16 (mm).

8.1.3 Escurreimiento

Dentro del menú **Escurreimiento** está el submenú **Observado**, se selecciona y aparece una ventana que se muestra en la Figura 8.6. 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 minutos.

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 *Aceptar*.

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 8.6 Ventana de Ecurrimiento Observado

Dentro del menú *Ecurrimientos* se selecciona el submenú *Hidrograma*, el cual despliega la tabla *Parámetros de Calibración* que se muestra en la Figura 8.7.

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 calibrados para el caso de estudio en la cuenca de Peñitas.

El siguiente apartado son los *Parámetros de Formar* 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.

Después quedan los parámetros del *Escorrimento Base*, los cuales contemplan 3 posibles opciones: Escorrimento Constante, Sin Escorrimento Base y el Método de Recesión, en el caso de peñitas se utilizo el Método de Recesión donde: el Gasto Inicial es de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, La constante de Recesión es de 1 y el Gatos Final es de $200 \text{ m}^3/\text{s}$

The screenshot shows a software window titled "PARAMETROS DE CALIBRACIÓN" with three main sections:

- PARAMETROS DE PERDIDAS**:
 - Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ): 0.2
 - Factor de Escala de Retención Potencial: 1
 - Factor de olvido: 0.995
- PARAMETROS DE FORMA**:
 - Tiempo de concentración (hr): $T_c > \Delta t$: 8
 - Coefficiente de Almacenamiento (hr): $C_a > \Delta t/2$: 6
- ESCURRIMIENTO BASE**:
 - Escorrimento Constante: 200 m^3/s
 - Método de Recesión:
 - Gasto Inicial: 500 m^3/s
 - Cte de Recesión: 1
 - Gasto Final: 200 m^3/s
 - Sin Escorrimento Base

At the bottom of the window are three buttons: "Hidrograma", "Restaurar", and "Cerrar".

Figura 8.7 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 gráficas que se pueden ver en la Figura 8.8 Donde en la primera gráfica se muestra la lluvia en exceso y las pérdidas, en la segunda gráfica de la figura se muestra el hidrograma que se observó y el hidrograma calculado.

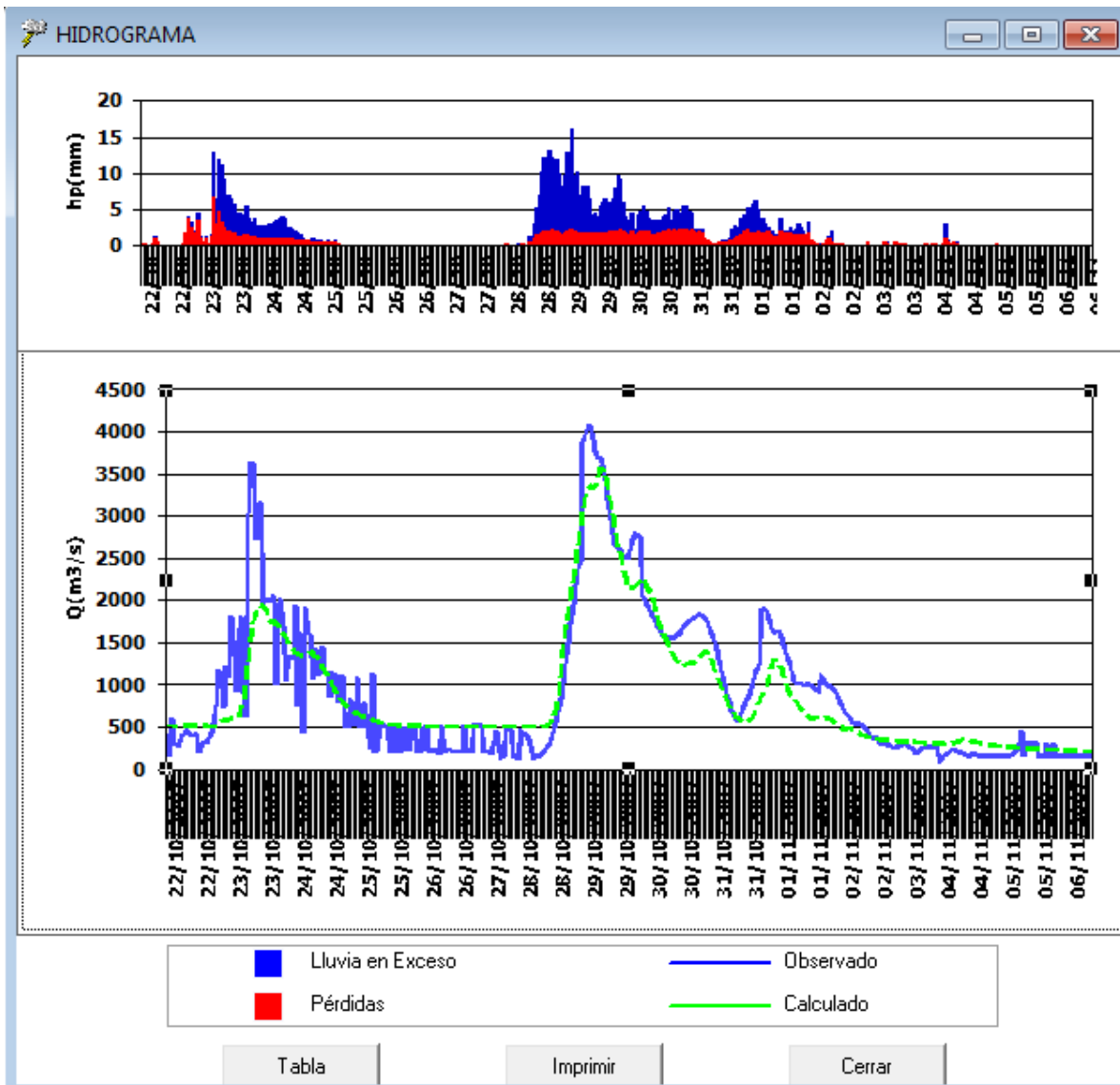


Figura 8.8 Resultados que da el MPE cuando se calcula el Hidrograma.

Dentro de la nueva ventana mostrada en la Figura 8.8 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 (m^3/s), Q Base (m^3/s), Q Total (m^3/s), Q DirectoObs (m^3/s), Q BaseObs (m^3/s) y Q TotaObsl (m^3/s). La Tabla se puede ver en la Figura 8.9 y también se puede exportar con una extensión .csv (Compatible con Excel).

Hidrograma

Proyecto:

Fecha Inicial de lluvia: 22/10/2007

Fecha final de lluvia: 05/11/2007

Fecha	Hora	Precip.(mm)	Pérdidas(mm)	Exceso(mm)	Q Directo(m ³ /s)	Q Bas
22/10/2007	01 :00	0.10	0.10	0.00	0.00	
22/10/2007	02 :00	0.18	0.18	0.01	0.00	
22/10/2007	03 :00	0.05	0.05	0.00	0.01	
22/10/2007	04 :00	0.08	0.07	0.00	0.03	
22/10/2007	05 :00	0.13	0.13	0.00	0.07	
22/10/2007	06 :00	1.12	0.99	0.13	0.17	
22/10/2007	07 :00	0.45	0.42	0.03	2.35	
22/10/2007	08 :00	0.02	0.02	0.00	4.61	
22/10/2007	09 :00	0.02	0.02	0.00	4.91	
22/10/2007	10 :00	0.02	0.02	0.00	5.40	
22/10/2007	11 :00	0.04	0.04	0.00	5.96	
22/10/2007	12 :00	0.02	0.02	0.00	5.86	
22/10/2007	13 :00	0.02	0.02	0.00	5.13	
22/10/2007	14 :00	0.02	0.02	0.00	4.36	
22/10/2007	15 :00	0.04	0.04	0.00	3.69	
22/10/2007	16 :00	0.02	0.02	0.00	3.13	
22/10/2007	17 :00	0.24	0.24	0.00	2.65	
22/10/2007	18 :00	1.72	1.72	0.00	2.25	
22/10/2007	19 :00	3.99	3.70	0.28	1.92	

Guardar tabla... Cerrar

Figura 8.9 Tabla resumen del Hidrograma calculado por MPE.

Finalmente del menú **Escurremientos** se selecciona el submenú **Tabla Resumen**, con el cual se abre una ventana adicional (Figura 8.10), 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 Escurreido*, donde se obtienen los volúmenes de Gasto Total Calculado, Gasto Directo Calculado, Gasto Base Calculado, Gasto Total Observado, Gatos 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	
Qmáximo	4066.562	3557.266	m3/s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Figura 8.10 Tabla Resumen que genera el modelo MPE.

8.2 Aplicación del Modelo Iber

Además de aplicar el Modelo de Producción de Escurrimiento (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 las condiciones para una primera etapa de cálculos, si los resultados no son concluyentes se realizaron cambios al proyecto más alentador que se

obtuvo de ésta y se procedió a mejorarla con adecuación de parámetros y de información inicial.

8.2.1 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 cargó el archivo .ASCII en la interfaz de Iber por medio de su menú **Herramientas_Iber**, submenú **RTIN**, en la opción **crear RTIN** (Figura 8.11), 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 8.12).

En la ventana mostrada en la Figura 8.12 se ingresó una tolerancia de 0.1 un lado máximo de 1000 y un lado mínimo de 500, para crear elementos parecidos a los que se utilizaron en el MPE, donde sus celdas median 1 km por 1 km. 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.

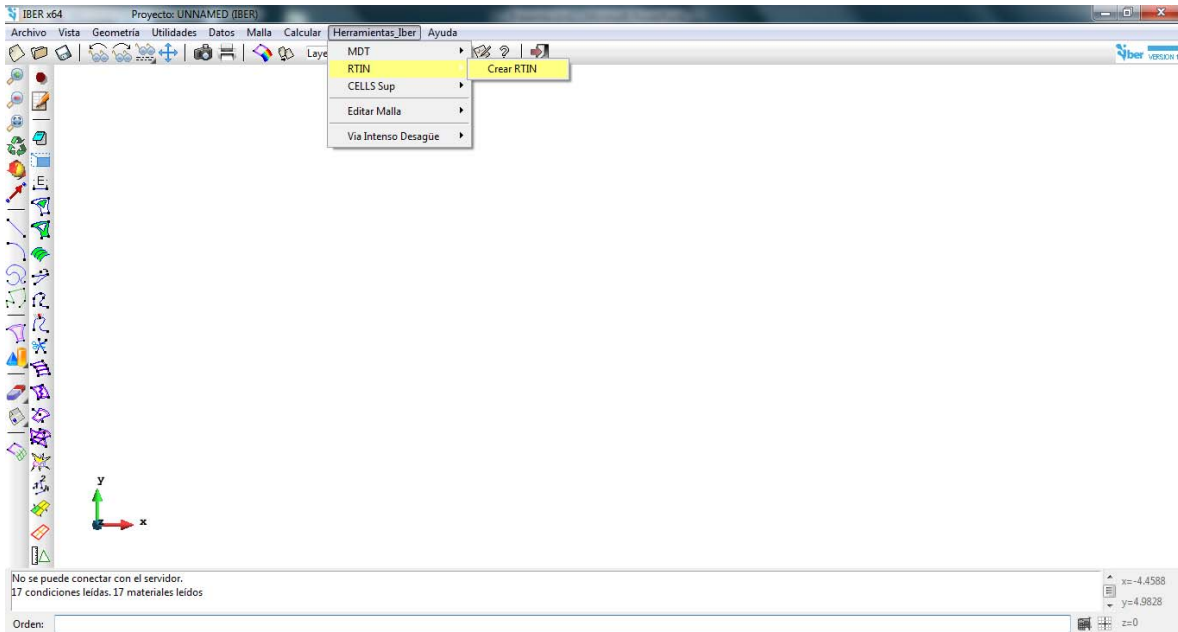


Figura 8.11 Ventana de inicio de Iber y ruta para crear el RTIN, a partir del archivo ASCII.

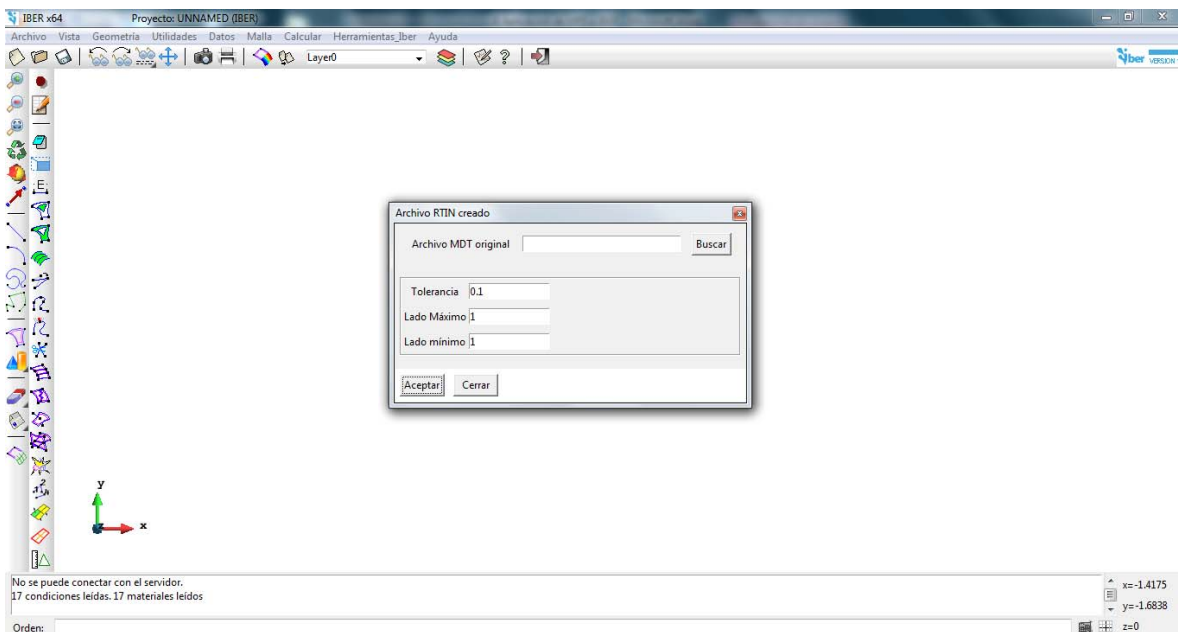


Figura 8.12 Ventana para ingresar el archivo. ASCII y datos adicionales como Tolerancia, Lado Máximo, Lado mínimo.

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 8.13.

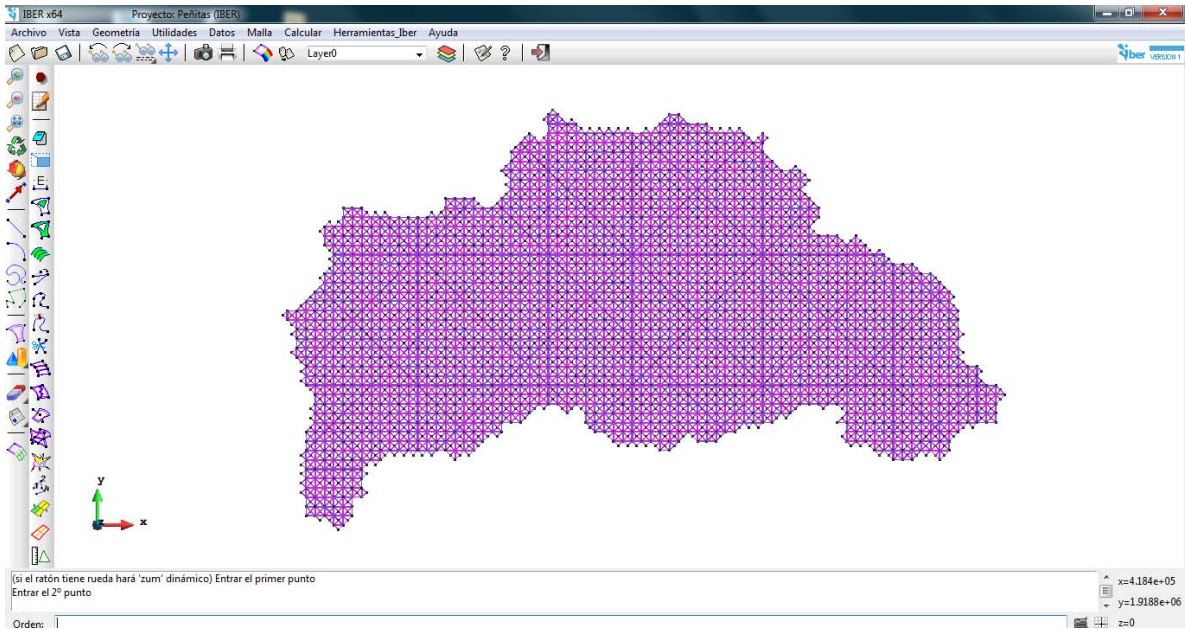


Figura 8.13 Geometría de la cuenca peñitas.

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 8.14.

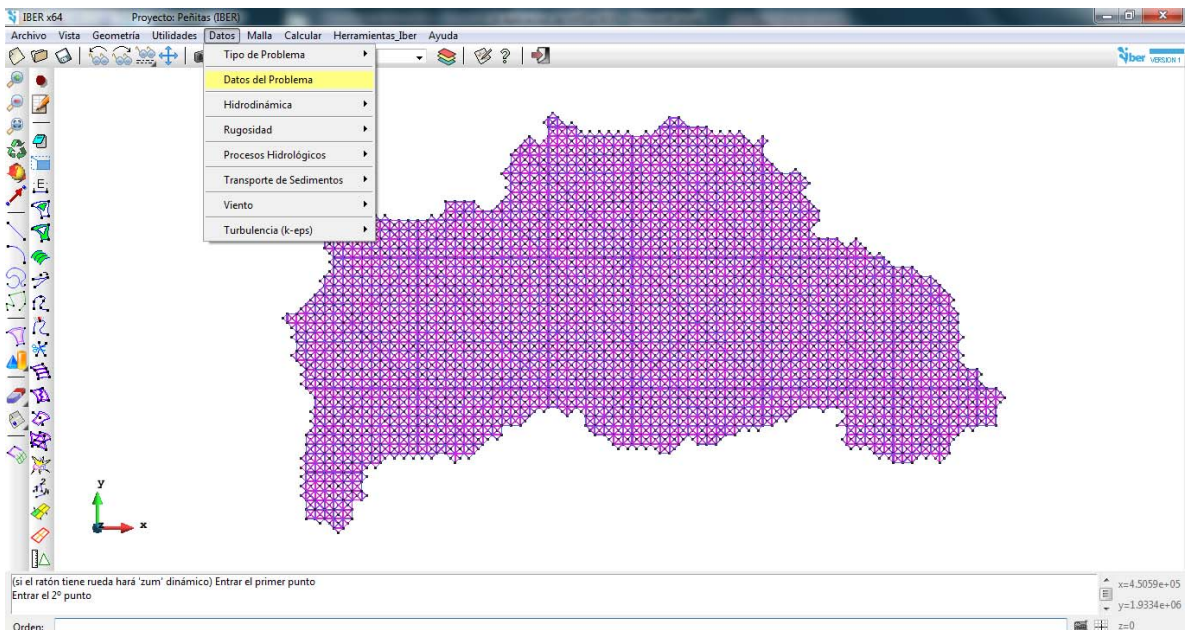


Figura 8.14 Muestra la ruta para ingresa los Datos del Problema

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 8.1 y

la Tabla 8.2 se muestran los principales cambios que existen entre cada una de las versiones propuestas, como primera etapa de la comparación.

Tabla 8.1 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 8.2 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 8.15 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 determinó que fuera un múltiplo o igual al intervalo que se usó en MPE.

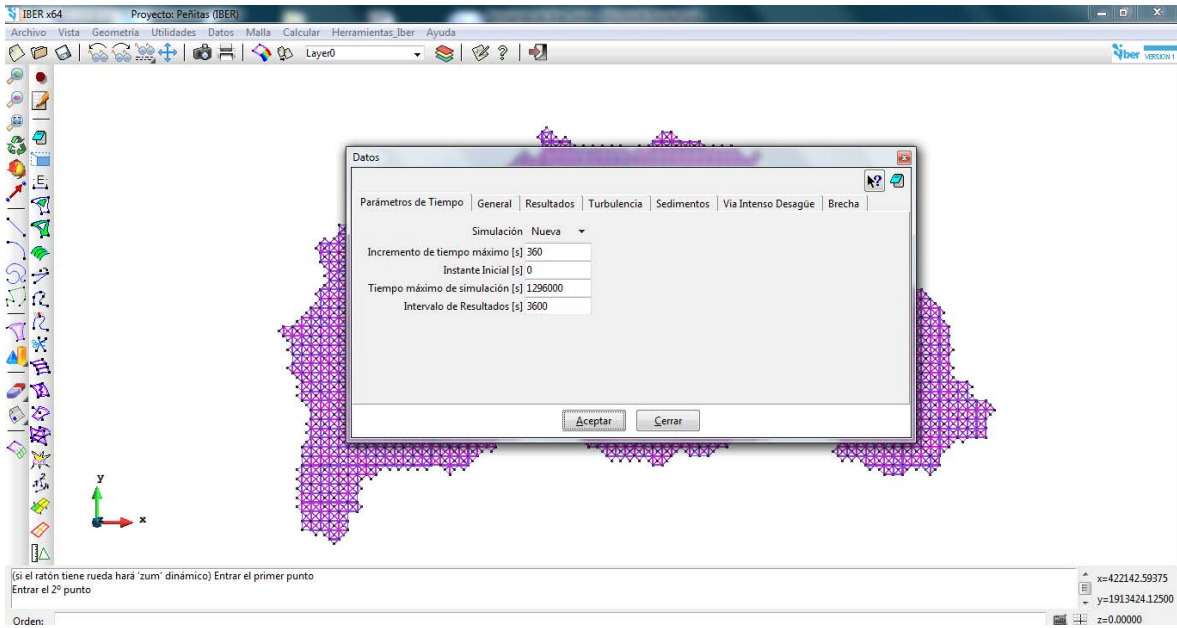


Figura 8.15 Ventana que se despliega en el submenú datos de problema (pestaña parámetros de tiempo).

En la Figura 8.16 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.

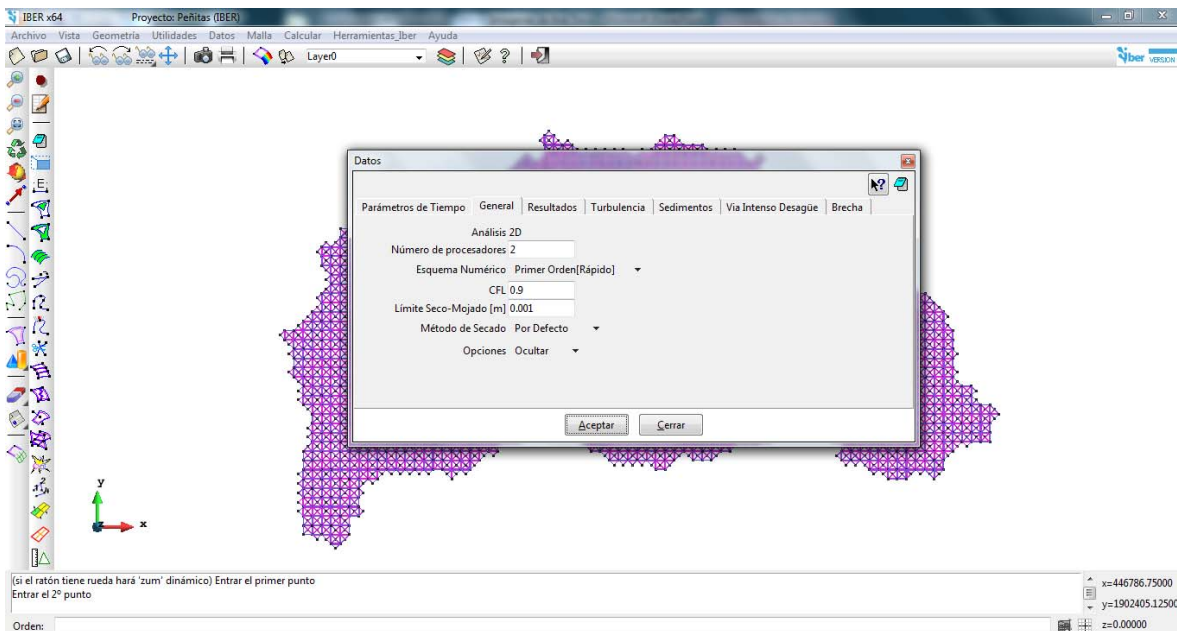


Figura 8.16 Muestra la ventana de Datos del Problema en la pestaña de General

El siguiente paso es entrar al módulo de **Hidrodinámica** en su submenú de **Condiciones de Contorno** como se muestra en la Figura 8.17; 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 asignó el atributo a 7 lados de los elementos que son fronteras de la geometría, en la Figura 8.18 se muestra la ventana que se despliega para la asignación de condiciones de salida. En la Figura 8.19 se muestran los elementos que tiene asignados las condiciones de salidas.

En el módulo 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 8.20 se muestra la ruta para poder asignar una rugosidad según el uso de suelo.

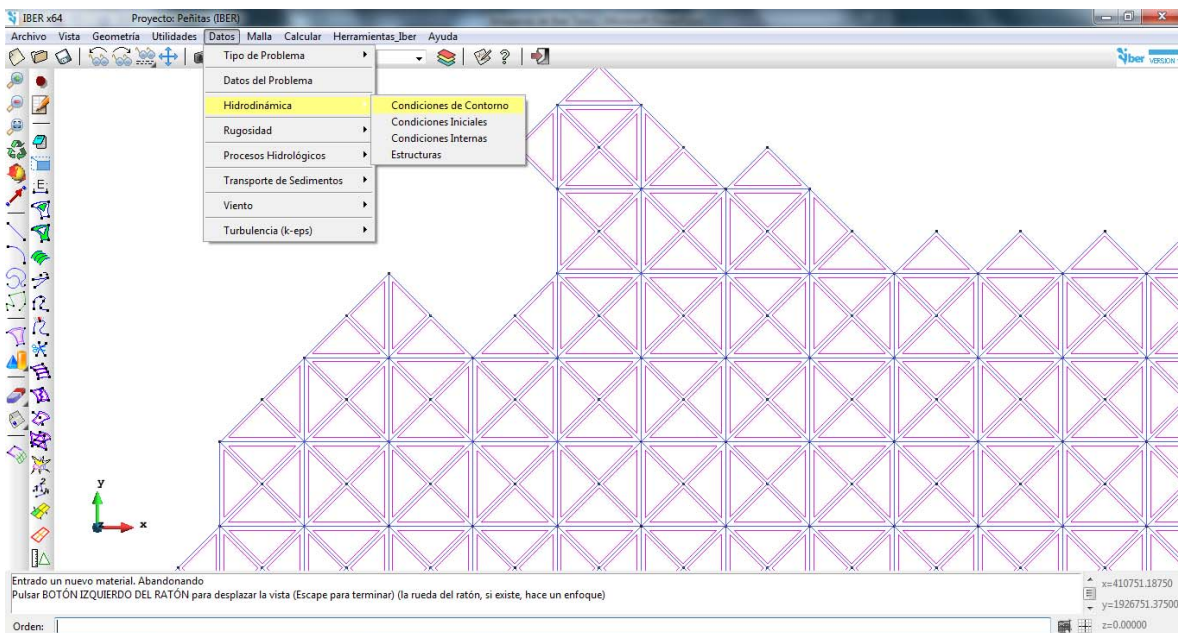


Figura 8.17 Muestra la ruta para la asignación de las condiciones de contorno

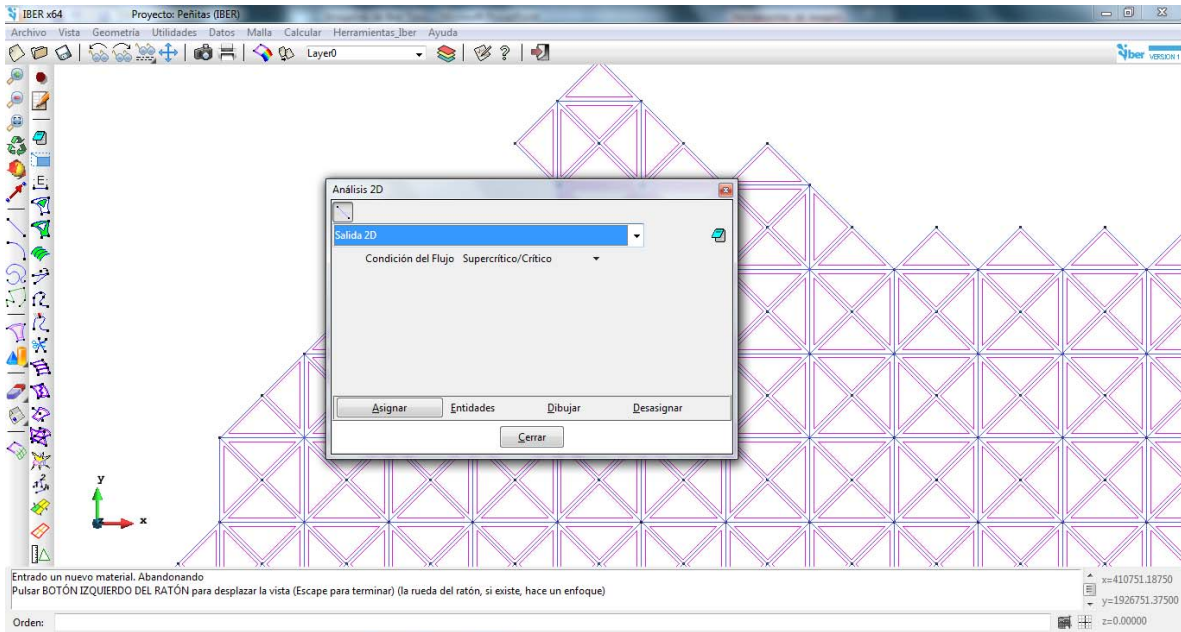


Figura 8.18 Asignación de salidas en 2D

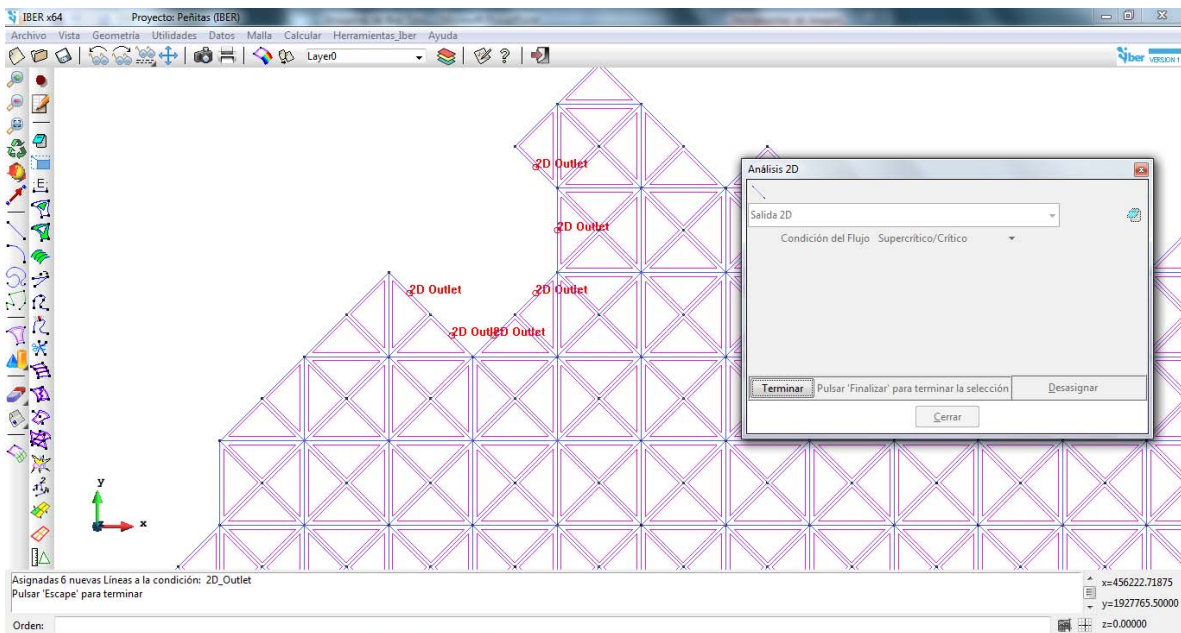


Figura 8.19 Muestra cómo se ven las salidas cuando ya fueron asignadas a los elementos.

En la primera etapa de estudio se consideró 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.

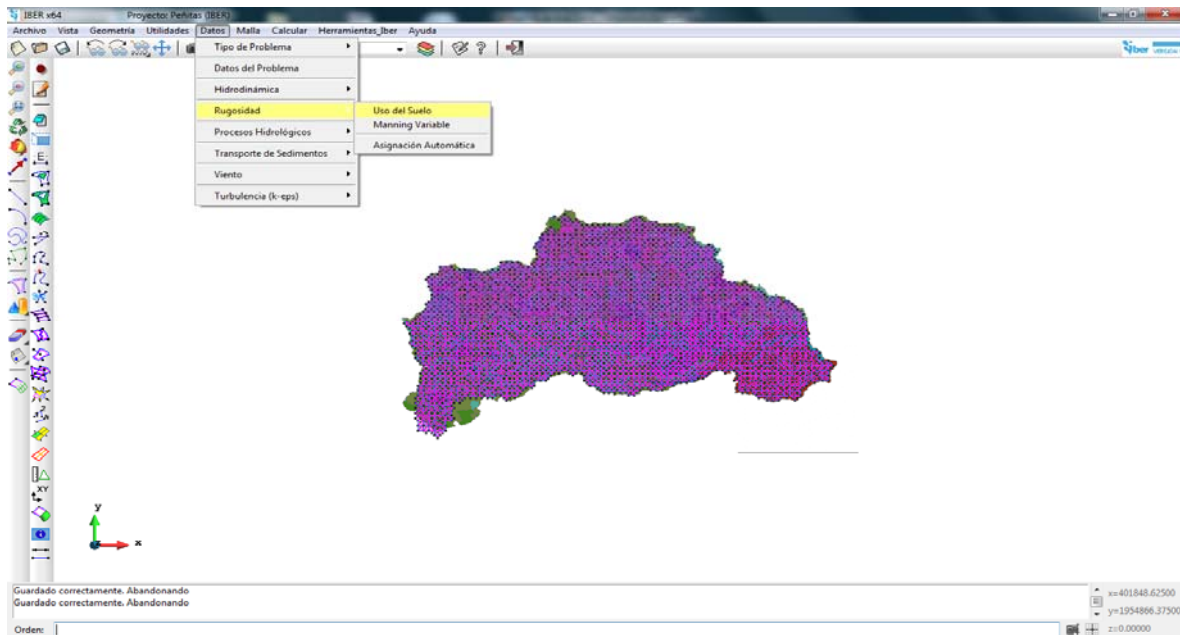


Figura 8.20 Ruta para la asignación de Rugosidad por el método de uso de suelo

En la Figura 8.21 se muestra como se ve la cuenca de Peñitas después de que fueron asignados los usos de suelos en cada uno de sus elementos.

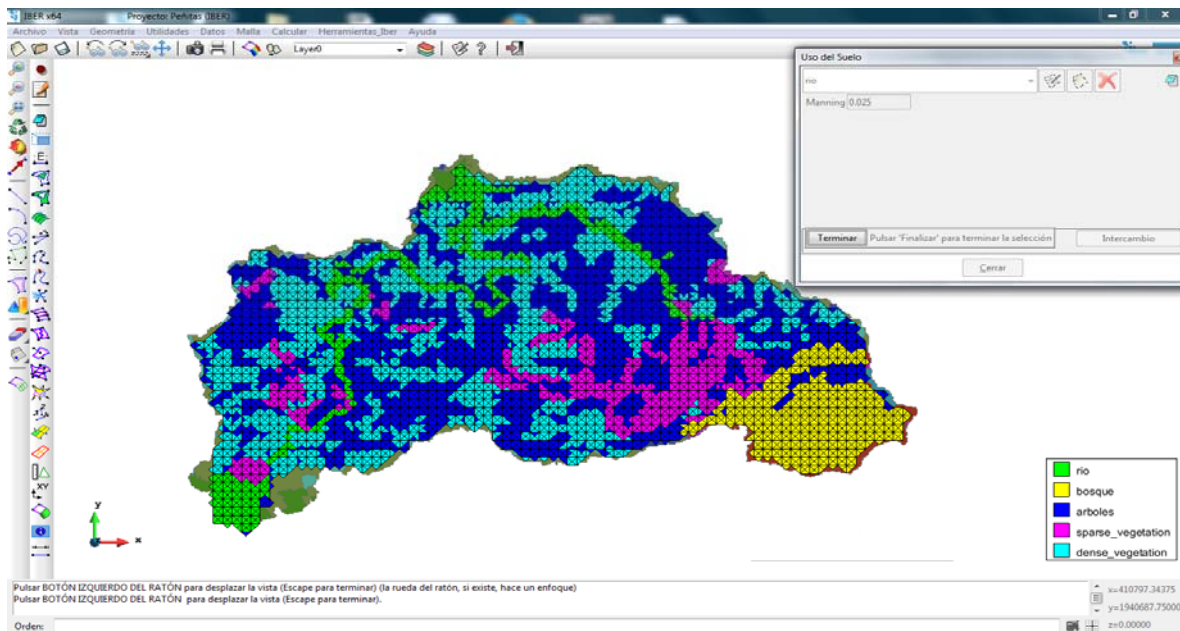


Figura 8.21 Muestra cómo se ven los elementos de la geometría cuando ya se les asigno un valor de rugosidad de acuerdo a su uso de suelo.

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 8.22.

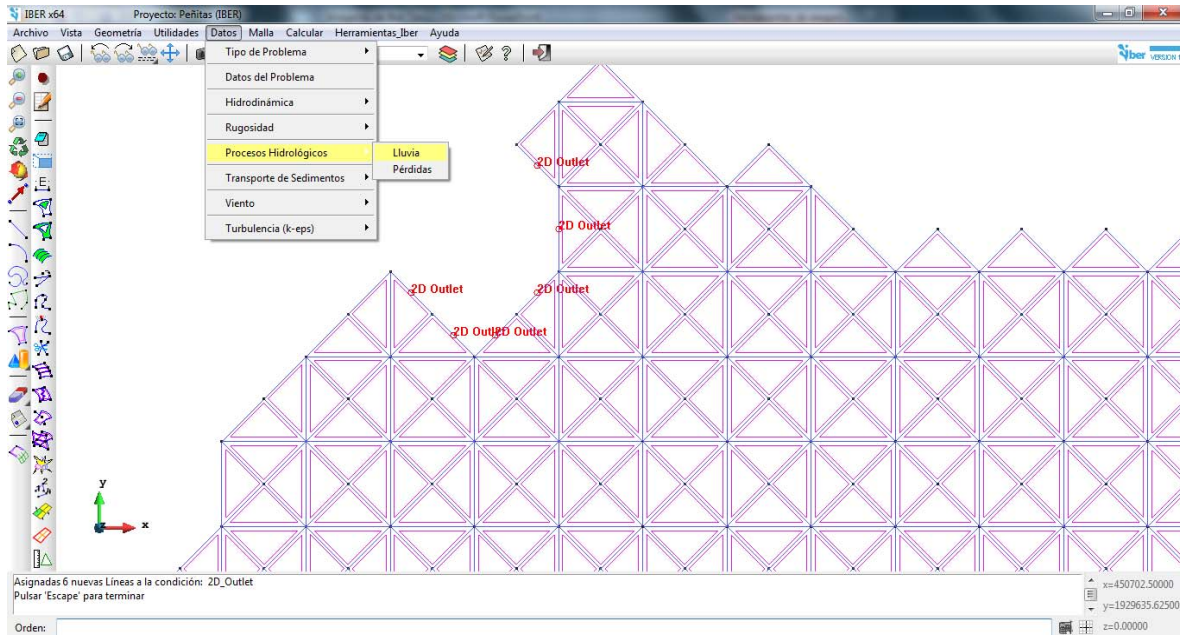


Figura 8.22 Ruta para la asignación de la precipitación.

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.

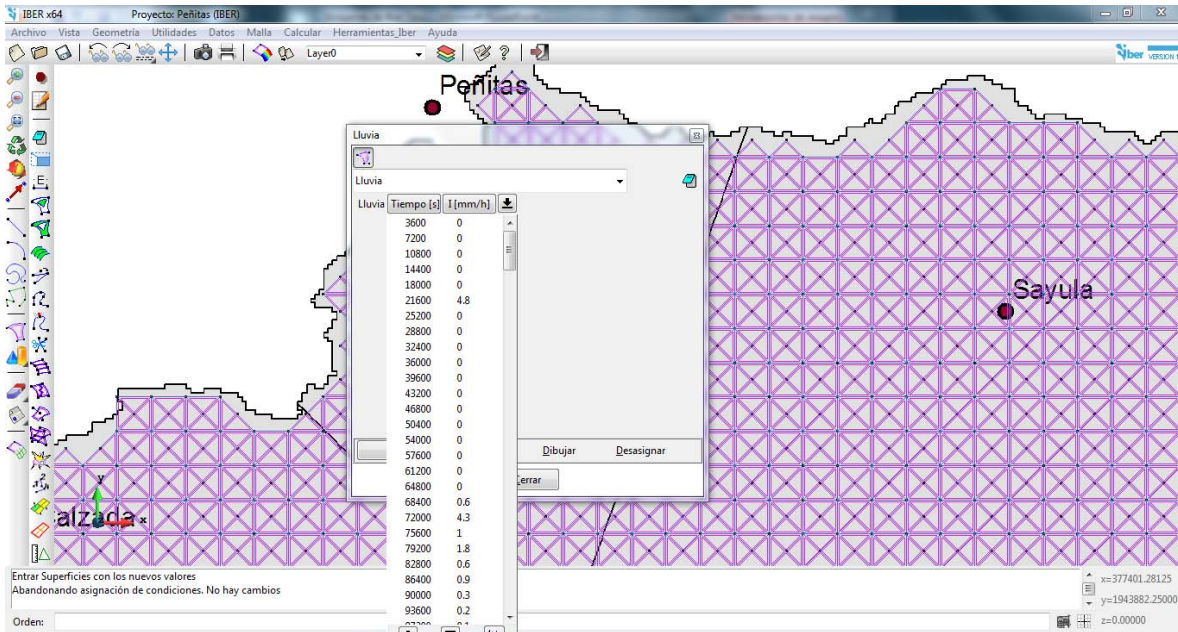


Figura 8.23 Asignación de la precipitación por medio de un hietograma de intensidades

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 8.23)

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 8.24 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.

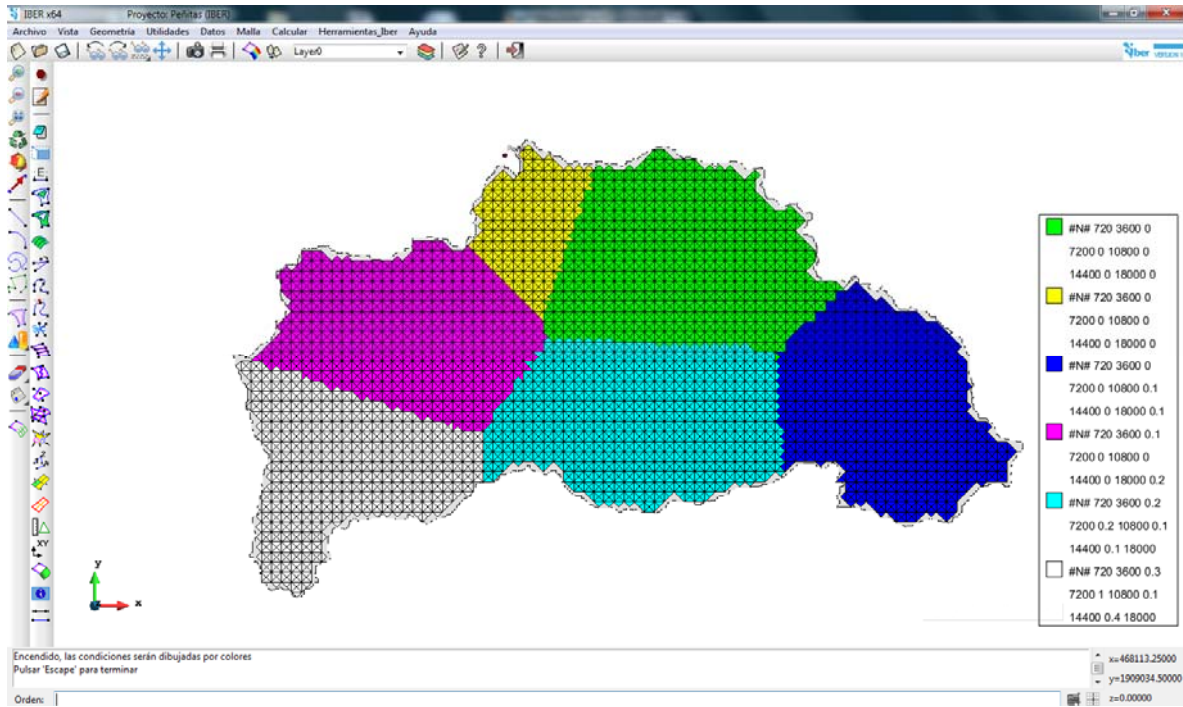


Figura 8.24 Muestra la asignación de las lluvias según los polígonos de Thiessen.

El último paso es la asignan las pérdidas, como MPE e Iber pueden usar el método de SCS y se quieren comparar los resultados se asignaron los valores de las pérdidas según la SCS a los elementos de la geometría. En la Figura 8.25 se muestra la ruta para asignar las pérdidas a la geometría de la cuenca Peñitas.

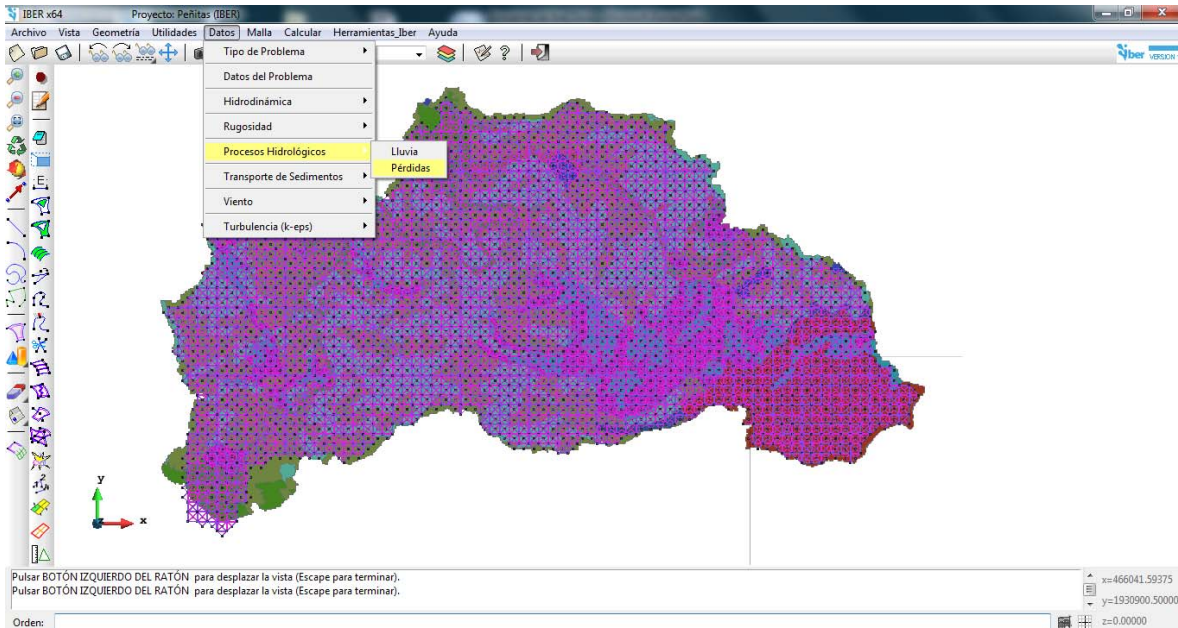


Figura 8.25 Secuencia para asignar las pérdidas en una geometría.

Para poder asignar las pérdidas se colocó una imagen de fondo que se utilizó para el MPE, 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 venta como la se muestra en la Figura 8.26.

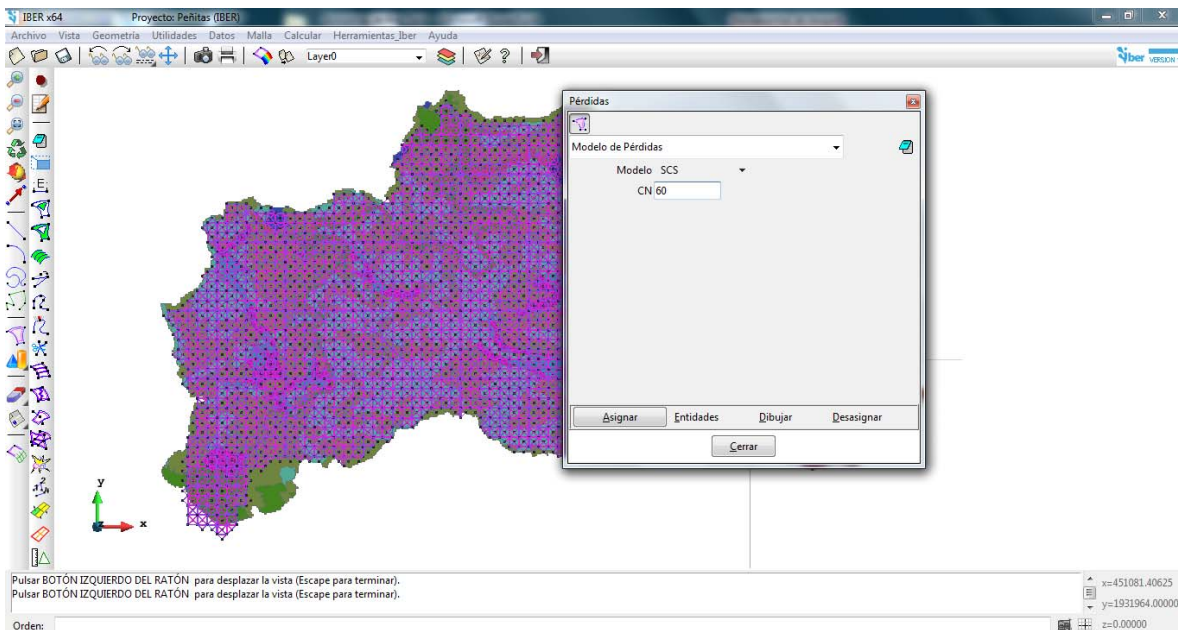


Figura 8.26 Ventana para la asignación de pérdidas

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 8.27 se muestra la geometría después de asignarle pérdidas a todos los elementos.

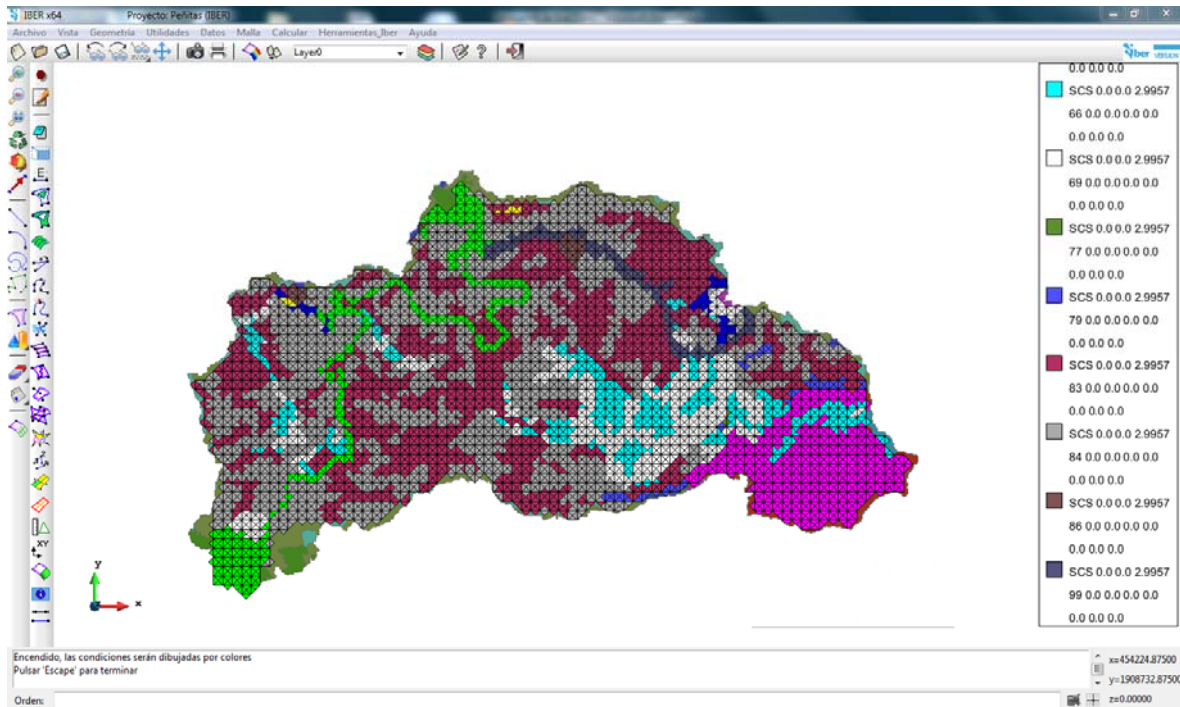


Figura 8.27 Muestra la geometría con las pérdidas según el SCS.

Con la asignación de pérdidas se termina el ingreso de información al modelo, cuando se realiza un estudio como el del presente informe. 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.

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 8.28, esta malla contiene elementos triangulares y la ruta para generarla es: menú [Malla](#), submenú generar [Malla](#).

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.

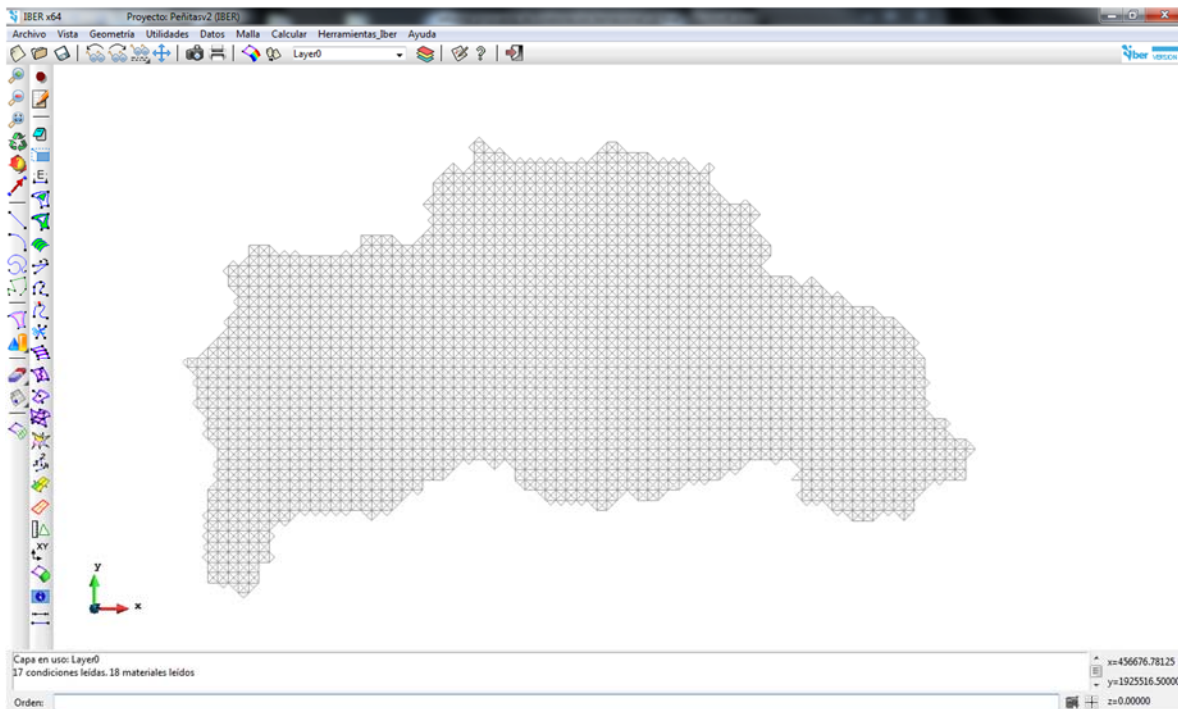


Figura 8.28 Malla de cálculo.

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se realizara el análisis de los hidrogramas de salida que se calculó con el MPE el modelo Iber y el hidrograma de salida registrado en la estación Peñitas.

9.1 Resultados del MPE

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

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 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 usara para todas las comparaciones y será el mismo que se le sumara a los resultados de Iber)

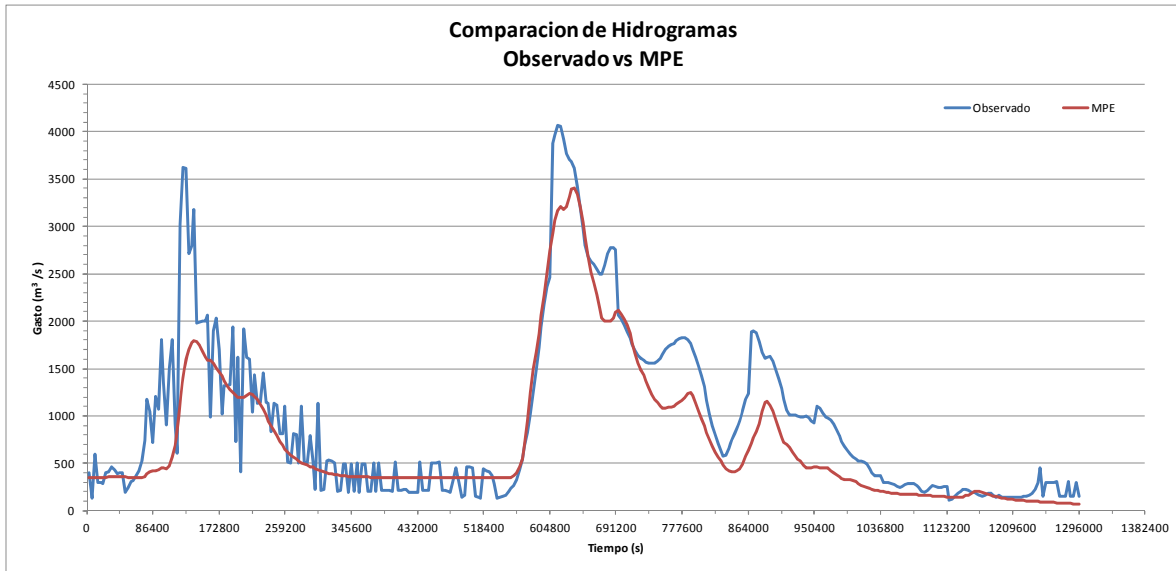


Figura 9.1 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE

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.

9.2 Resultados de Iber

9.2.1 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 el 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 última consideración fue para comparar los efectos de las pérdidas en un modelo hidráulico.

En la Tabla 9.1 se muestran los parámetros de tiempo que se propusieron para cada uno de los proyectos generados en la primera etapa, en la

Tabla 9.2 se muestran los parámetros de cálculo para los mismos proyectos.

Tabla 9.1 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 9.2 Parámetros de cálculo para cada proyecto de Iber primera etapa.

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

Para el proyecto denominado "Peñitasv2", el cálculo realizado por Iber arrojó como resultado que no existía escurrimiento en el punto de salida, durante el tiempo de simulación. En la Figura 9.2 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".

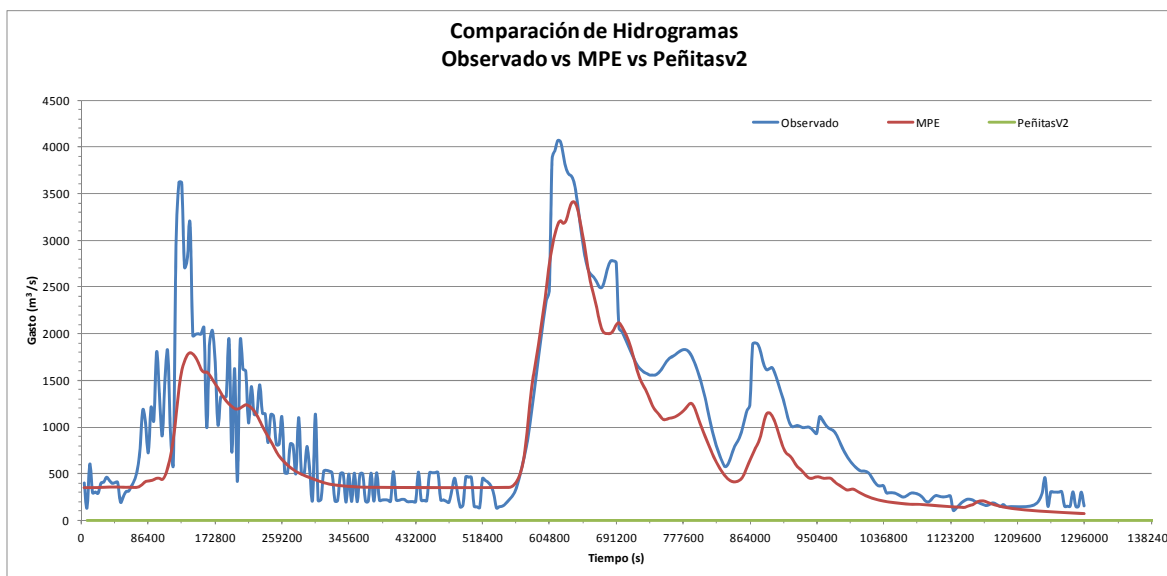


Figura 9.2 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv2

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 9.3 en color azul está el hidrograma observado, en color rojo está el hidrograma calculado con MPE y en color morado el hidrograma calculado en Iber con el proyecto Peñitasv3.

Aun 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 $12.99 \text{ m}^3/\text{s}$, en la Figura 9.4 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 con el proyecto Iber Peñitasv4.

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 el tiempo que se tardaba a realizar la simulación con otros métodos de secado, como el hidrológico o el de por defecto, sin embargo, se realizó para ver si se mejoraban los resultados.

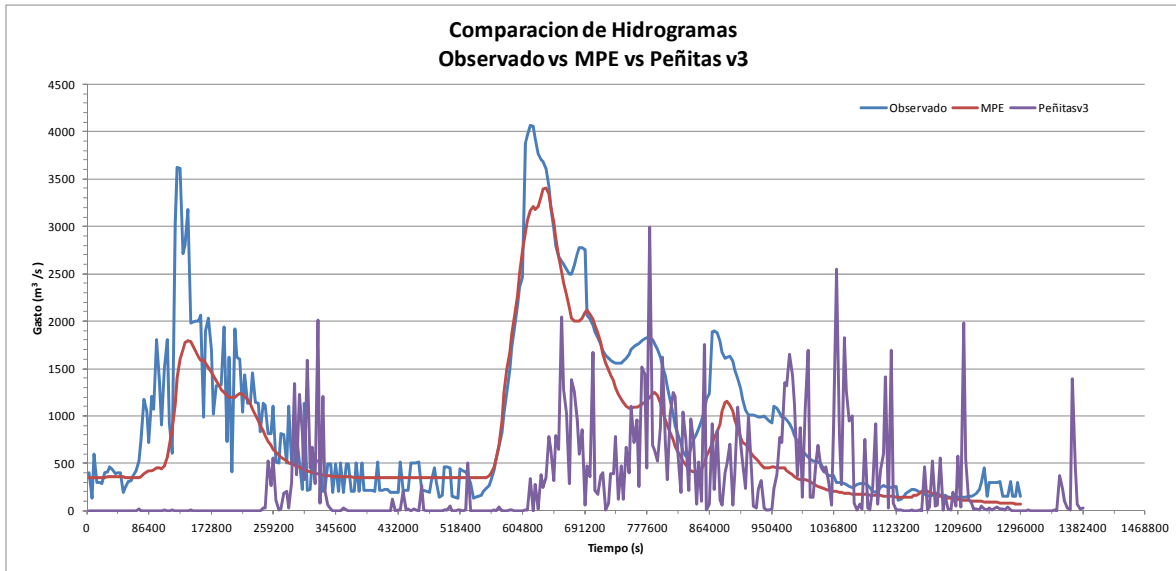


Figura 9.3 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3

En la Tabla 9.3 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 9.3 Tabla de volúmenes para las simulaciones de la primera etapa

Hidrograma	Observado	MPE	Peñitasv2	Peñitasv3	Peñitasv4
Volumen <i>mill m³</i>	1230.501	961.7575	0	401.964	0.001882
Diferencia con el hidrograma real		268.743	1230.501	828.536	1230.499

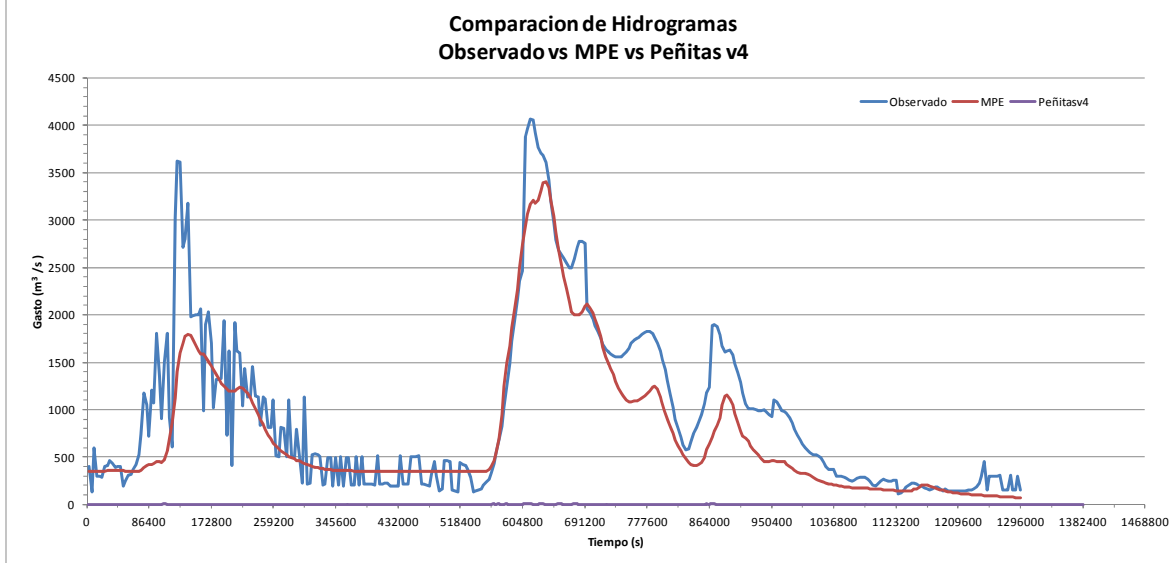


Figura 9.4 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv4

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 tomara como proyecto base para una segunda etapa de simulaciones.

9.2.2 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 deben de tomar.

Tomando 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 de hidráulico, sin embargo, en cálculos de tipo hidrológico con celdas de varios cientos de metros, el coeficiente de “ n ” de Manning funciona no sólo como un coeficiente de fricción también considera todos los posibles obstáculos que enfrénate el agua en su recorrido en el interior de cada celda, convirtiendo la “ n ” de Manning 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 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, el intervalo de resultados se fijó en 1 000 s, 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 9.5 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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.

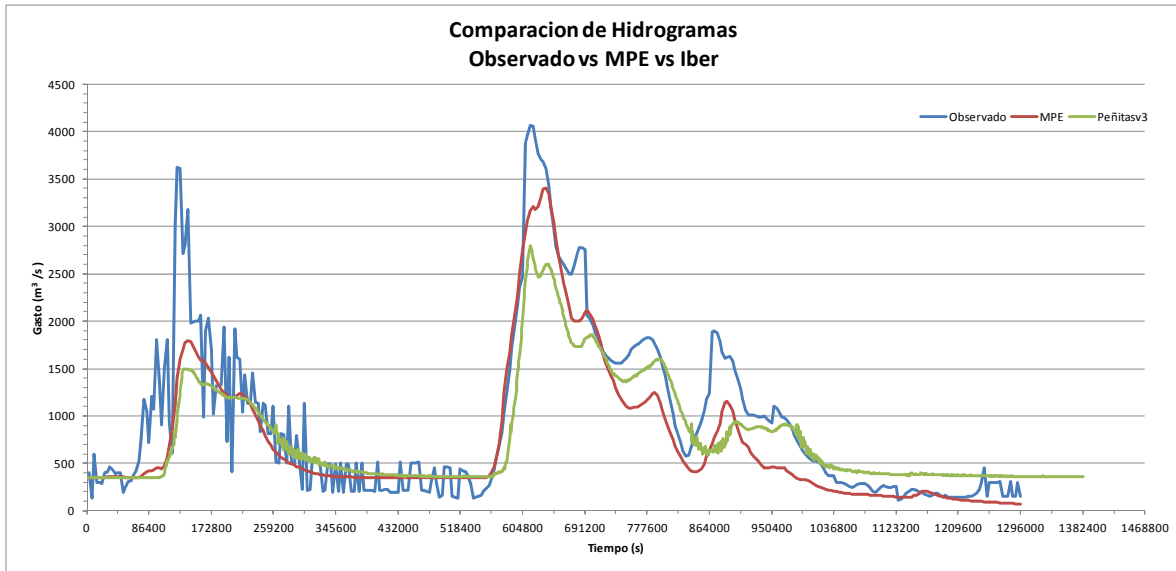


Figura 9.5 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE y el modelo Iber con el proyecto Peñitasv3

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 9.5, se observa que se elimina 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 calculo el modelo Iber se les sumo un gasto a base de $350 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Como parte de las comparativas 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 9.6 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.

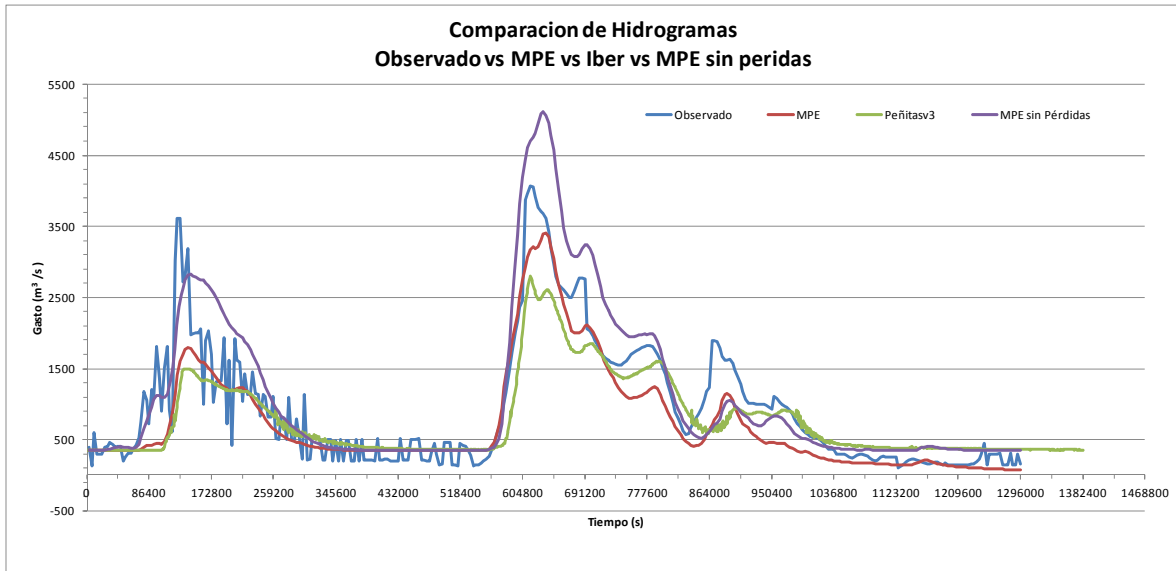


Figura 9.6 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas, Iber con el proyecto Peñitasv3 sin pérdidas y MPE sin pérdidas.

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 $2\,000\text{ m}^3$.

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 9.7, en color azul se encuentra el hidrograma observado, en color rojo el calculado por MPE considerando pérdidas y en color verde el hidrograma calculado con Iber.

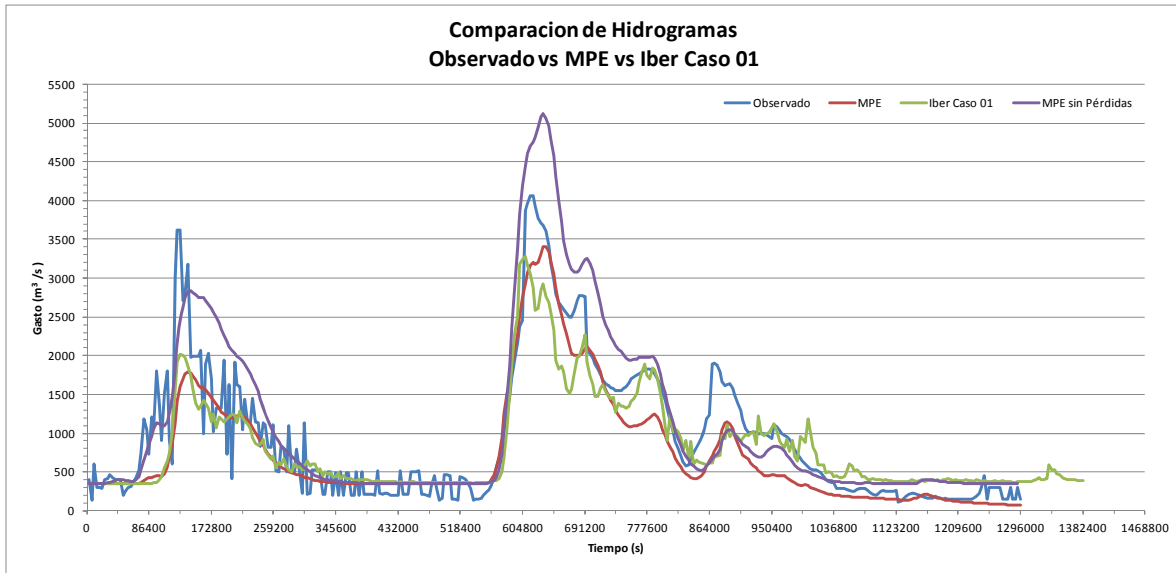


Figura 9.7 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 01 con $n=0.01$ sin pérdidas.

Los resultados para el caso 02 se muestran en la Figura 9.8, en color azul el hidrograma observado, en color rojo el hidrograma calculado por MPE considerando pérdidas y en color verde el hidrograma calculado por Iber para el caso 02.

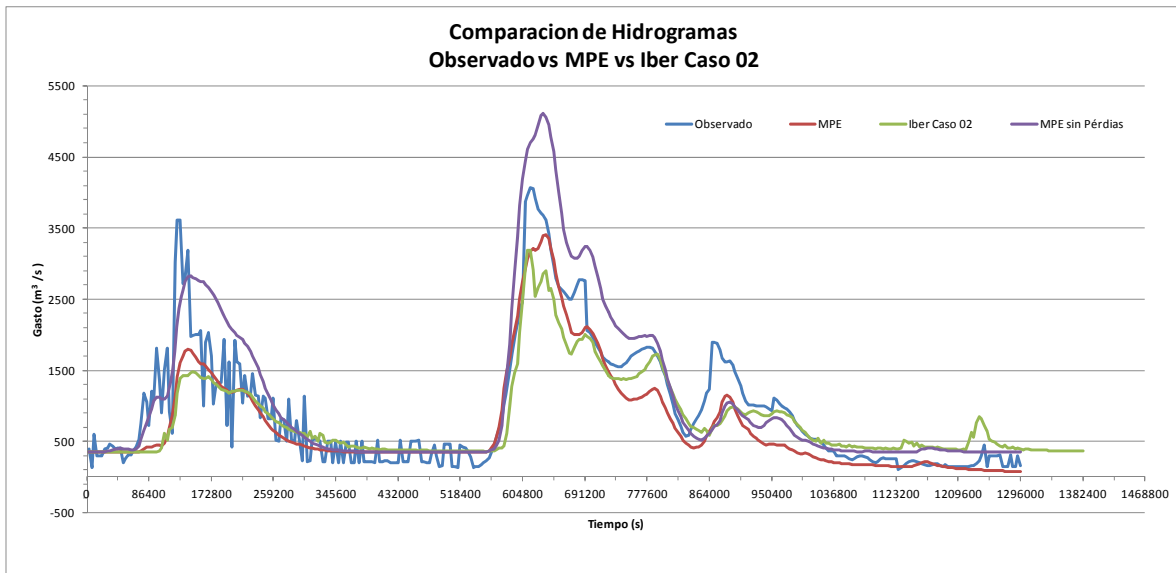


Figura 9.8 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas e Iber con el caso 02 con $n=0.02$ sin pérdidas.

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 9.9, 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.

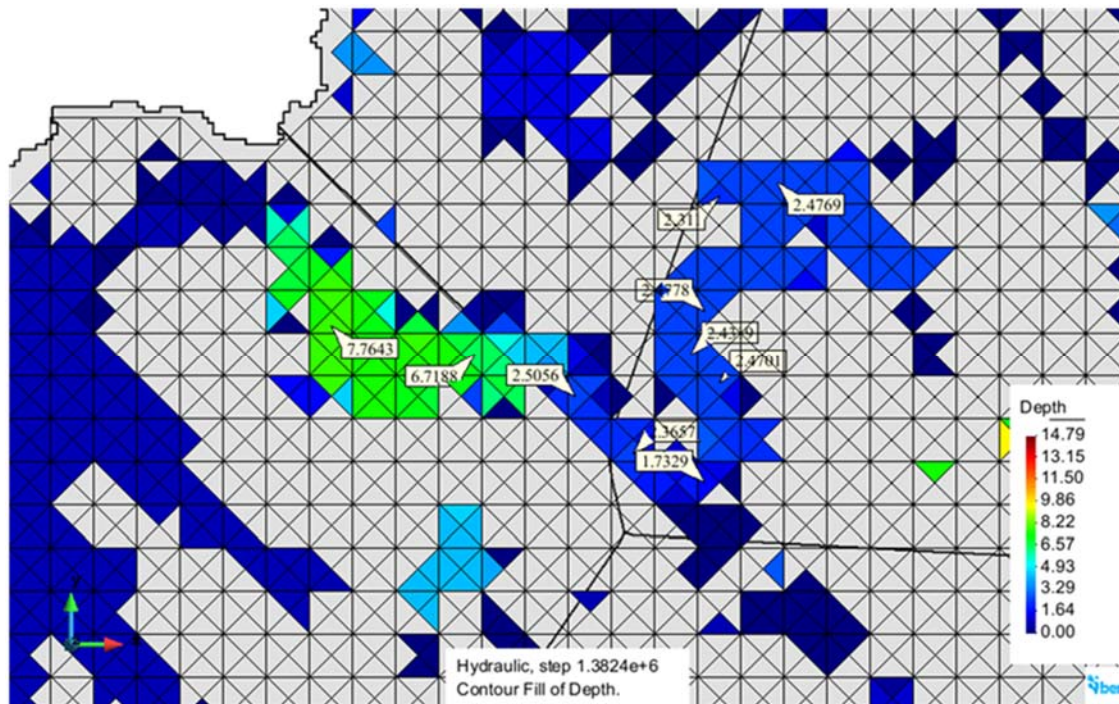


Figura 9.9 Mapa de tirantes al final de la simulación en Iber.

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 implementadas 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) anterior 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 9.10.

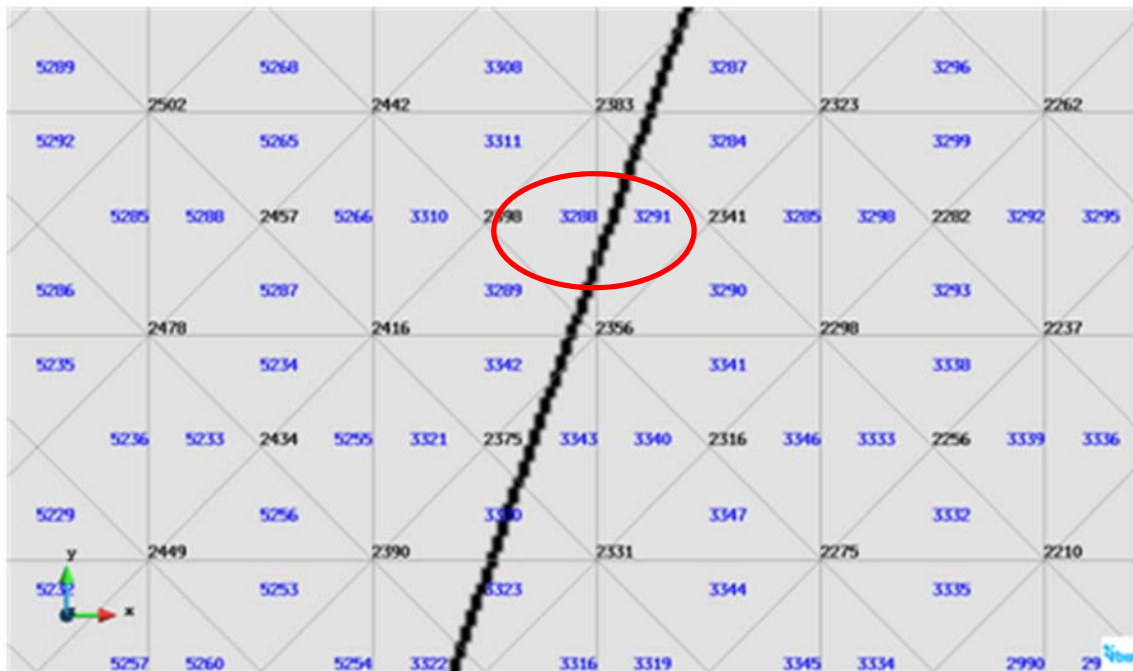


Figura 9.10 Mapa de detalle de los elementos 2383 y 2356

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 2.88m, Figura 9.11, y esto se mantiene así indefinidamente al final del cálculo:



Figura 9.11 Tirante al final de la simulación en la celda 3291

Para explicar esto, observando las cotas de los vértices de la malla, Tabla 9.4:

Tabla 9.4 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 a cota 145.33 si la arista está a 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 9.12 se muestra los resultados obtenidos en esta última simulación, en color azul está el hidrograma observado, en color rojo el hidrograma calculado por MPE y en color verde el hidrograma calculado por Iber.

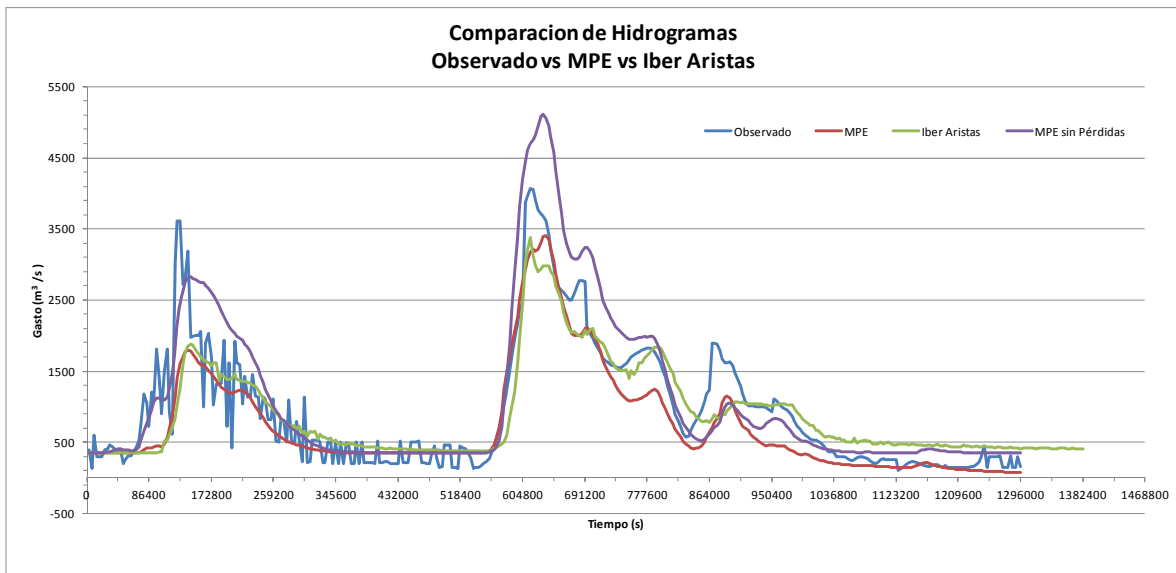


Figura 9.12 Comparación de hidrogramas entre el hidrograma observado, el modelo MPE con pérdidas, Iber con el proyecto Peñitasv3 sin pérdidas y con la versión de Iber 2.0.1 modificada para cálculos hidrológicos.

En la Tabla 9.5 se muestra la tabla resúmenes de los volúmenes que tiene cada hidrograma calculado en la segunda etapa.

Tabla 9.5 Tabla de volúmenes

Hidrograma	Observado	MPE	MPE sin Pérdidas	Peñitasv3	Caso 1	Caso 2	Peñitasv3 con aristas
Volúmenes <i>mill m³</i>	1230.501	961.757	1444.615	1068.430	647.434	627.124	1229.262
Diferencia		268.743	-214.114	162.070	583.066	603.376	1.2385

9.3 Conclusiones del estudio

Deben continuarse realizando las simulaciones con IBER, pero con las comparaciones hechas respecto a los resultados del modelo MPE se pueden resaltar las siguientes conclusiones

- 1) No utilizar incremento de tiempo de cálculo muy grande. Aunque IBER lo reduce automáticamente esto siempre tiene tendencia a provocar oscilaciones y se mostró en el caso del proyecto Peñitasv3.
- 2) El CFL (Coeficiente de Estabilidad) se debe de mantener por debajo de 0.5, para descartarlo como causante de oscilaciones.
- 3) El umbral del límite seco-mojado se debe de tener un valor menor a 1 *mm*, para evitar que el agua se mueva como pulso.
- 4) El Método por secado de tipo hidrológico tiene algunos errores ya que causa velocidades muy grandes que no pueden ser posibles y en algunos casos impide el cálculo.
- 5) El método estricto es demasiado tardado para las condiciones que se manejaron. En pláticas con los asesores del Instituto Flumen recomendaron usar el método de secado por defecto.
- 6) Se debe de realizar un preproceso a los datos del terreno para evitar acumulación de flujo en ciertos puntos, con este preproceso se previene los errores.
- 7) El modelo MPE debe probarse con la geometría suavidad, para revisar la sensibilidad del mismo ante cambios en las elevaciones del modelo digital del terreno.
- 8) El caso de Peñitas ha permitido observar que Iber realiza bien la transformación lluvia caudal localmente, pero que para utilizar Iber para la obtención de los hidrogramas a la salida de una cuenca es necesario “rellenar depresiones” para que no aparezcan estas barreras. Cuando se observó la necesidad de rellenar depresiones se implementó un método basado en cambiar la cota de los elementos, pero ahora se ha visto que el método debería basarse en modificar la cota de los vértices. Esperamos poder realizar y verificar el cambio en breve para incluirlo en la próxima versión de Iber.

10 Desarrollo de trabajo de tesis de maestría

El alumno Jorge Iván Juárez Dehesa realizó el análisis y recopilación de la información, preparó los archivos de datos para realizar la aplicación del el modelo MPE y el modelo IBER; realizó su tesis con un avance del 90 por ciento al inicio del mes de febrero del 2014.

11 ASESORÍAS PRESENCIALES

Se recibieron asesorías vía electrónica por parte de los investigadores del grupo FLUMEN, además de la asesoría presencial de un miembro del Instituto de Ingeniería que realizó estudios de doctorado con el grupo Flumen y que recientemente regresó a México (Dr. José Luis Aragón Hernández), además de personal del Instituto formado en conceptos del Iber (M.I. Darío Espinoza Figueroa) ; adicionalmente se recibió asesoría de IBERAULA por parte del investigador Hans Sánchez; se realizaron reuniones presenciales con miembros del grupo FLUMEN en el mes de octubre del 2013 en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, en Barcelona y en la Universidad Politécnica de Valencia en el entorno de las III Jornadas de Ingeniería del Agua. En abril del 2014 acudirá el Dr. Ernest Bladé del grupo Flumen a sostener reuniones sobre las conclusiones de este proyecto de colaboración además de que impartirá asesorías del programa IBER.

12 Preparación de Artículo en revista arbitrada

El artículo se encuentra en preparación ya que se considerarán todos los cálculos realizados con el modelo IBER y MPE.

13 Preparación de artículo en congreso

Se elaboró un resumen extendido de dos hojas para el Congreso Latinoamericano de Hidráulica del 2014 y se cuenta con un primer borrador de la versión del artículo completo.

14 METAS TÉCNICAS Y DE FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

14.1 METAS TÉCNICAS ALCANZADAS

Se elaboró el informe final de actividades.

Se encuentra en preparación un artículo para revista internacional con arbitraje.

Se desarrolló al 90% un trabajo de tesis de maestría.

Se elaboró el resumen y se cuenta con un borrador de un artículo extenso para Congreso Internacional.

14.2 FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

Dirección y avances de una tesis de maestría relacionada con el tema desarrollado.

15 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS ESTANCIAS DE INVESTIGACIÓN REALIZADAS O POR REALIZAR

Se efectuaron reuniones en el mes de octubre en la Universidad Politécnica de Catalunya de miembros del Instituto de Ingeniería para recibir asesoría por parte del Instituto Flumen además de analizar y discutir los resultados del estudio, adicionalmente se tuvieron reuniones en las III Jornadas de Ingeniería del Agua en la Universidad Politécnica de Valencia, también en el mes de Octubre del 2013.

Posible asistencia a un congreso internacional en el 2014 por parte de uno o dos miembros del Instituto de Ingeniería y uno o dos miembros del Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Acudirá al Instituto de Ingeniería un miembro del Instituto Flumen durante una semana en abril del 2014.

16 RESULTADOS OBTENIDOS AL TÉRMINO DEL AÑO

Elaboración de informe anual 100%.

Elaboración de tesis de maestría 90%.

Elaboración de artículo para revista internacional con arbitraje 70%.

Elaboración de un resumen y reparación de un artículo para congreso internacional 100%.

En pláticas la selección de nueva cuenca de estudio o descarte de hipótesis

Se sostuvieron y continúan las pláticas con los autores del modelo MPE sobre su posible trámite de patente, aunque prevalece aún la idea de que sea un software del dominio público.

17 PRESUPUESTO SOLICITADO

Se realizó la apertura del proyecto durante el mes de octubre del 2013, se utilizó parte de los recursos para la asistencia del colaborador del grupo Flumen de la UPC, BNA, España en el mes de abril; además se compraron 2 computadoras, 3 discos duros, mobiliario y toners.

18 REFERENCIAS

Ajami, N. K.m H. Gupta, t. Wagener y S. Sorooshian “Calibration of a semidistributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system”, *Journal of Hidrology*, 198, pp. 112-135, 2004.

Aparicio, F., “Fundamentos de Hidrología de Superficie”, Limusa, México, 2009, ISBN: 978-968-18-3014-4. Ed.

Archana S., Rakesh K. “Aritificial Neural Networks for Evente Based Rainfall-Runoff Modeling”, *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 4, 891-897, 2012

Arganis J. M. L. “Operación Optima de un Sistema de Presas en Cascada para Generación Hidroeléctrica Tomando en Cuenta Condiciones Reales de Operación y el uso de muestras Sinteticas para el Pronóstico”, Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrados , Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 2004.

Arganis, J. M. L., Bladé, E., Dolz, J., Sánchez, M., Fuentes, M. O., Franco, V., De luna, F. Dam break simulation by means of a high resolution algorithm applied to La Parota, Guerrero, México. Para el XIII World Water Congress, Montpellier, France, 2008.

Arganis, J. M. L., Bladé E., Dolz, J. Sánchez, M., Fuentes, M. O. A. Franco, V. De Luna, C. F. Simulación de la ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México, usando un algoritmo de alta resolución. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 3, julio-septiembre de 2009, pp 101 a la 106. FI 0.138 ISSN: 0186-4076

Bergström, S. 1995. The HBV model. In: Singh, V.P. (Ed.)” *Computer Models of Watershed Hydrology*”. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 443-476.

Beven, K. J. Lamb, P. Quinn, R. Romanowicz y J. Freer “TOPMODEL. En V. P. Singh: *Computers Models of watershed Hydrology* Water Resource Publications”, Highlands Ranch, pp. 219-23, 1995.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., Dolz, J., and Coll, A. 2012. "Iber - Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos." Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería (en prensa).DOI:10.1016/j.rimni.2012.07.004

Bunash, R. J. C. "The NWS river forecast system – Catchment modeling. En V.P. Singh: Computers Models Waterhed Hydrology Water Resource Publication, Highlands Ranch", pp. 311-366, 1995.

Caro, C., Bladé, E. "Modelo hidráulico-hidrológico continuo basado en esquemas en volúmenes Finitos." xxv Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica, 9 al 12 de septiembre de 2012

CENAPRED," Guía Básica de elaboración de Atlas estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Hidrometeorológicos", Centro Nacional de Prevención de Desastres, Capítulo 1 p.p. 485 ISBN: 970-628-905-4.

Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W. "Hidrología Aplicada", Capítulo 1 p.p. 584, ISBN 07-010810-2. Colombia

Dávila O. M.V. y Fránces G. F. "modelación Distribuida con TETIS dentro del marco del proyecto comparación del NWS de EEUU aplicado en la región de Oklahoma", Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica y medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

Domínguez M. R., Esquivel G.G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L. (2008). Modelo de Pronóstico de Esguerrimiento (MPE). Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. ISBN 978-958-719-075-5.

Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Baldemar, M. A., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L.. Carrizosa, E.E. Manual del Modelo para pronóstico de esguerrimiento. Serie Manuales Instituto de Ingeniería (ISBN: 970-32-1593-9) SM/12. Octubre del 2008.

D. Hmamerstorm, "Neural Network at Work", IEEE spectrum, Vol 30 No.7,1993, pp. 46-53

DHI. Software "Mike 11 User Guide" y "Mike 11 Reference Manual". DHI Water and Enviroment, 2003.

DHI. Software "Mike SHE User Guide" y "Mike SHE Reference Manual". DHI Water and Enviroment, 2007.

Echavarría, S. B. "Modelo de simulación del funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje del área metropolitana del valle de México. Aplicación a las políticas de operación", Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 2013

Escalante A., Reyes L., " Técnicas Estadísticas en Hidrología" 2 . Ed, primera reimpresión, Capítulo VIII, p.p. 228, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN 970-32-0173-3,2008

Escalante A., "Apuntes de Hidrología Urbana", Maestría en Ingeniería Civil, área de Hidráulica, Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN 970-32-0173-3,2008

ESRI (Enviromental Systems REsearch Institute), "ArcHydro for ArcGIS 9 ", Readlands: ESRI, 2007

Fuentes M. O., Franco V., "Estudio hidrológico para Obras de Protección", Capitulo 3, manual de Ingeniería de ríos, 1999.

Fuentes, O.A., Arganis, M.L., Bladé, E. , Sánchez, M., De Luna, F., Cruz, J.A., Mendoza, J. E.1, Aragón, J.L.. Simulación de la onda de avenida por ruptura de tanque de enfriamiento. Revista Digital Tláloc No. 46. 11 pp. 2010

Garnote L. y R. L. Bras " A distributed model for a real-tme forecasting using digital elevation models". Journal of Hydrology, 167, pp. 279-306, 1995.

García N., Intensity-duration-recurrence relationship for maximum precipitation data: Frequency factor approach, lognormal-case. Ingeniería hidráulica en México, Volumen 14, No 3, pp 37-44, 1999

Grimaldi S., Petroselli A., Romano N. Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrol. Process.* (2012)

Instituto Nacional de Ecología, “LA cuenca de los ríos Grijalva y Usumaciantas”, 2005.

K. Chakraborty, K. Mehrotra, C.K. Mohan and S. Ranka, “Neural Networks and Their Applications” *Review of Scientific Instruments*, Vol 65, 1992, pp. 1803-1832.

Mehrdad A. “Simulation of rainfall-runoff process by artificial neural networks and Hec-Hms model (case study Zard river basin)” *Proceedings of the Fourth International Iran and Russia Conference*

Kavvas M.L., Chen Z.Q., Anderson M.L., Ohara N., Yoon J.Y., Fu Xiang, A study of water balances over the Tigris-Euphrates watershed. *Physics and Chemistry of the Earth*, No 36, pp. 197-203, 2011.

Manoj K. Jain, Umesh C. Kothiyari, Kittur G. Ranga Raju, A GIS based distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* No. 299 107-135 pp. 2004

Montaldo N., Mancini M. and Rosso R. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrol. Process.* No. 18, 545-563 pp. 2004.

Morbidelli R., Corradini C., Govindaraju R. S. A simplified model for estimating field-scale surface runoff hydrograph. *Hydrol. Process.* No. 21, pp. 1772-1779, 2007.

Orduña, M. L., “Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E. T.S. I. Caminos, Canales y Puertos, 2007.

O’Loughlin, G. Huber, W. y Chocat, B. “Rainfall-Runoff processes and modelling”, *Journal of Hydraulic Research*, 2010

Ponce, V. M. "Engineering hydrology. Principles and Practices". Ed Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

S. Haykin, "Neural Networks-A Comprehensive Foundation", Macmillan, New York, 1994.

Springal, R. "Hidrología", Primera parte. Serie Azul del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 1970

Van Der Knijff J. M., Younis J. y De Roo A. P. J., 2008 "LISFLOOD: a GIS- based distributed model for river basin scale wáter balance and flood simulation". International Journal of Geographical information Science, pp. 189-212

Vieux, B. E. "Distributed hydrological modeling using GIS". Ed. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, Holanda, 2004.

Wang Y.-Ch., Yu P.-S. and Yang T.-Ch., Comparison of genetic algorithms and shuffled complex evolution approach for calibrating distributed rainfall-runoff model. Hydrol. Process. No. 24, 1015-1026 pp. 2010.

Yu P.-S., Yang T.-Ch., Chen S.-J., Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed Rainfal runoff model. Journal of Hydrology No. 244 43±59 pp. 2001.