INSTRUCTIVO
DE MODELACIÓN
Y PREDICCIÓN
HIDROLÓGICA
FORSAT

Contenido

1. Introducción....4
2. Herramientas y requerimiento de software y hardware....5
3. Organización de la información y flujo de trabajo....6
4. Confección del modelo hidrológico....7
4.1 Confección del modelo de la cuenca....7
4.1.1 Crear un nuevo proyecto....7
4.1.2 Definir el modelo de la cuenca....8
4.1.3 Salvar el proyecto....10
4.1.4 Incluir base cartográfica (mapas de la cuenca, red fluvial, etc)....10
4.1.5 Agregar elementos hidrológicos....13
4.2 Creación del modelo meteorológico....27
4.3 Introducción de series cronológicas, rejillas de datos de precipitación y pares de datos....32
4.3.1. Series cronológicas....32
4.3.2 Rejillas de datos de precipitación....35
4.3.3 Pares de datos....36
4.4 Especificaciones de control....37
4.5 Creación de corridas de simulación....38
4.6 Calibración del modelo....40
5. Asimilación de datos de lluvia....43
5.1. Datos de lluvia generados por estimación cuantitativa y por pronóstico cuantitativo....43
5.1.1 Funcionamiento de las aplicaciones de asimilación de matrices de precipitación....46
5.1.1.a. Entrada de datos....46
5.1.1.b. Consultas prediseñadas....48
5.1.1.c. Exportación de rejillas ASCII de ArcInfo....53
5.1.1.d. Informes prediseñados....55
5.1.2. Importación de las rejillas de lluvia en HEC-DSS....55
5.2. Datos de lluvia medidos en estaciones pluviométricas convencionales....61
5.3. Datos de lluvia medidos en estaciones pluviométricas automáticas....67
5.4. Estimación de curvas Precipitación-Duración-Frecuencia regionales a partir de láminas de precipitación acumulada en 24 horas....67
5.4.1. Obtención de las curvas PDF....69

6. Operación del sistema para la evaluación del peligro de inundaciones (contribución a las salidas del estudio de peligro de inundaciones por intensas lluvias de los estudios de PVR). 72

7. Operación del sistema en tiempo real (proceso de predicción hidrológica). 76

8. Referencias y bibliografía.....82

Anexo I. Análisis regional de las series de lluvias máximas diarias anuales. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza. 84

1. Introducción

Los hidrólogos tienen la misión de proveer información para una variedad de actividades y estudios sobre recursos hídricos que incluyen: el planeamiento y diseño de nuevas obras de conducción hidráulica y de control o almacenamiento de agua; la operación y/o la evaluación de obras de conducción y de control de agua existentes; la preparación para y el control de inundaciones; y la regulación de actividades en llanuras de inundación.

En raras ocasiones los registros históricos de caudales, niveles y lluvias son suficientes. Más comúnmente, el escurrimiento en la cuenca debe predecirse para proveer la información. Por ejemplo, un estudio de reducción de daños por inundaciones pudiera requerir un estimado del incremento de volumen de escurrimiento para propuestos cambios del uso del terreno en una cuenca. Sin embargo, no habrá disponible ningún registro para proveer esta información porque el cambio aún no ha ocurrido. De forma similar, un pronóstico del caudal de entrada a un embalse puede necesitarse para determinar el desembalse de agua en caso de que una tormenta tropical altere su curso y se mueva sobre una cuenca. En ambos casos, esperar a observar el caudal no es aceptable. La alternativa es usar un modelo para proveer la información.

Un modelo es una herramienta que relaciona algo desconocido (la salida) con algo conocido (la entrada). En el caso de los modelos incluidos en el sistema de modelación hidrológica HEC-HMS, la entrada conocida es la precipitación y la salida desconocida es el escurrimiento, o la entrada conocida es el caudal aguas arriba y la salida desconocida es el caudal aguas abajo.

Los modelos toman una variedad de formas. Los modelos físicos son representaciones a escala reducida de sistemas del mundo real. El modelo físico de una cuenca puede ser una gran superficie con aspersores de agua para representar la entrada de precipitación. La superficie puede ser alterada para simular diferentes usos del terreno, tipos de suelo, pendientes, etc; y la intensidad de lluvia puede controlarse. El escurrimiento puede medirse directamente en el modelo.

Los investigadores han desarrollado los llamados modelos analógicos que representan el flujo del agua con el flujo de la electricidad en un circuito. Con estos modelos la entrada se controla ajustando el amperaje y la salida se mide con un voltímetro.

En el HEC-HMS se incluye una tercera categoría de modelos, los modelos matemáticos. Este término define una ecuación o un conjunto de ecuaciones que representan la respuesta de un componente de un sistema hidrológico a un cambio en las condiciones hidrometeorológicas.

Los modelos matemáticos, incluidos aquellos presentes en HEC-HMS, pueden clasificarse en base a los siguientes criterios: la forma en que consideran el tiempo (modelos continuos y modelos eventuales); la variación espacial de las características y los procesos (agregados y distribuidos); la base de conocimiento sobre la que se desarrolla el modelo (empíricos y conceptuales); la forma en que abordan la aleatoriedad (determinísticos y estocásticos); y la disponibilidad de observaciones de parámetros de entrada y salida (parámetros observados y parámetros ajustados). Estas

clasificaciones no son necesarias para utilizar el sistema pero son útiles a la hora de decidir cuáles de los modelos utilizar para varias aplicaciones.

2. Herramientas y requerimiento de software y hardware

Para la ejecución de las disímiles actividades y procesos comprendidos en el presente sistema de modelación/predicción hidrológica, se requieren las siguientes aplicaciones informáticas de almacenamiento, procesamiento, simulación, visualización y edición de datos e información tanto alfanumérica como geográfica:

- MS-Office 2007 o superior con Access instalado
- Sistema de Información Geográfica ArcGIS versión 10.2
- Extensión de procesamiento hidrológico ArcHydro para ArcGIS versión 10.2.
- Sistema de Modelación Hidrológica HEC-HMS versión 4.0
- Sistema de Análisis de Ríos HEC-RAS versión 4.1
- Extensión geoespacial de modelación hidrológica HEC-GeoHMS versión 10.2
- Herramientas de apoyo al HEC-RAS usando ArcGIS, HEC-GeoRAS versión 4.3
- Motor utilitario visual del sistema de almacenamiento de datos HEC-DSSVue versión 2.01
- Programa utilitario de manejo de rejillas HEC-GridUtil versión 2.0
- Aplicación de Base de datos Pronostico Numérico de Lluvia
- Aplicación de Base de datos Estimación Numérica de Lluvia
- Aplicación de Base de datos Red Especial Informativa Lluvia en Eventos Extraordinarios

Los requerimientos mínimos de hardware y software son similares a los de ArcGIS. Sin embargo, cuando se trabaja con sistemas de información geográfica, es importante tener en cuenta el tamaño de los paquetes de datos así como la complejidad del análisis a la hora de determinar los recursos informáticos adecuados. Aun cuando las aplicaciones pueden trabajar en máquinas más lentas, el usuario experimentará a menudo largos tiempos de cómputo. Para asegurar que no se comprometa el desempeño, las siguientes recomendaciones de hardware deben considerarse con la idea de que más recursos informáticos, en términos de velocidad de la unidad central de procesamiento (CPU), memoria y espacio en disco duro, puede mejorar el desempeño de las aplicaciones.

Por ejemplo, en el caso de HEC-HMS, el equipamiento mínimo será adecuado para la simulación de eventos con modelos de cuenca que contengan solo entre 20 y 30 elementos hidrológicos. Sin embargo, necesitará mejor equipamiento si intenta confeccionar modelos de cuenca con más de cien elementos, realizar simulaciones continuas para grandes ventanas de tiempo, o usar el método de transformación de Mod Clark distribuido.

- Memoria RAM: mínimo 1 GB, recomendado 2 GB o superior
- Velocidad del Procesador Central: recomendado 1,6 GHz o superior

- Capacidad del disco duro: debe ser, al menos, 20 veces el tamaño de los datos del modelo digital de elevación empleado en el GeoHMS. En muchos casos, contar con amplia capacidad disponible en el disco duro mejorará el desempeño pues las operaciones espaciales a veces generan varios archivos temporales intermedios y repetidamente realizan acumulación de archivos.
- Resolución de pantalla: mínimo 1024x768

3. Organización de la información y flujo de trabajo

Con el objetivo de facilitar el manejo y el intercambio de datos entre las diferentes aplicaciones informáticas que intervienen en el sistema de modelación/predicción se ha creado una estructura de carpetas organizadas en correspondencia con las aplicaciones, la naturaleza de los datos, el origen o el destino de los datos, actividades o etapas del proceso, etc. Como directorio general para todo el proceso de captación, almacenamiento, procesamiento, simulación, análisis y entrega de datos e informaciones se definió el directorio "ModelacionFORSAT" ubicado en la raíz de la partición de trabajo de la PC. Esto sería, por ejemplo, "D:\ModelacionFORSAT".

Se recomienda utilizar la raíz de la partición de trabajo y nombres de carpeta sin espacios para que las rutas de los archivos sean lo más cortas posible y así evitar errores de lectura/escritura de archivos tanto definitivos como temporales e interrupciones de procesos.

En el directorio "D:\ModelacionFORSAT" se incluyen las siguientes carpetas:

- ArchivosDSS
- ArchivosDSSUTL
- Documentos: para el almacenamiento de manuales, instructivos de todas las herramientas del sistema.
- EstimacionNumLluvia: para la gestión de datos e información de estimados cuantitativos de lluvia.
- PronosticoNumLluvia: para la gestión de datos e información de predicciones cuantitativas de la lluvia.
- ProyectosGeoHMS
- ProyectosRAS

4. Confección del modelo hidrológico

Para simular la respuesta hidrológica en una cuenca mediante el Sistema de Modelación Hidrológica HEC-HMS se desarrolla y corre un modelo hidrológico cuyos componentes primarios son los modelos de cuenca, los modelos Meteorológicos y las especificaciones de control.

El modelo de cuenca representa la cuenca física. El usuario desarrolla un modelo de cuenca mediante la adición y conexión de elementos hidrológicos los cuales usan modelos matemáticos para describir procesos físicos en la cuenca. Los elementos hidrológicos disponibles en HEC-HMS son: subcuenca, tramo, confluencia, fuente, sumidero, embalse y derivación.

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación requerida por un elemento de tipo subcuenca en el modelo de cuenca. El modelo meteorológico puede utilizar tanto datos puntuales como rejillas de datos y tiene la capacidad para modelar precipitación líquida y helada junto con la evapotranspiración.

Las especificaciones de control definen el período y la resolución temporal de la corrida de simulación. La información en las especificaciones de control incluye la fecha y hora de inicio, la fecha y hora de cierre y el incremental de tiempo para el cálculo.

Existen, además, componentes de entrada de datos tales como las series cronológicas, los datos apareados, y las rejillas de datos los cuales son, a menudo, requeridos como parámetros o como condiciones de frontera en los modelos de cuenca y meteorológico.

De modo general, una simulación calcula la transformación lluvia – escurrimiento en el modelo de cuenca a partir de una determinada entrada del modelo meteorológico.

4.1 Confección del modelo de la cuenca

Para desarrollar un modelo de cuenca en HEC-HMS, pueden utilizarse bases cartográficas, archivos de modelo de cuenca, archivos de modelo meteorológico y archivos de parámetros de celdas de rejilla, generados mediante el empleo del software ArcGIS y su extensión HEC-GeoHMS. Al disponer de un Modelo Digital de Elevación detallado, el analista puede utilizar estas herramientas para delinear subcuencas, establecer líneas de drenaje y calcular parámetros físicos de la cuenca hidrográfica como la longitud, la localización del centroide y la pendiente media. Una descripción paso a paso de este proceso se puede consultar en el Capítulo 13 del manual de usuario de HEC-GeoHMS.

La construcción del modelo de la cuenca en el HEC-HMS, significa representar gráficamente en el "Escritorio" la información obtenida en el procesamiento previo de la cuenca, mediante los elementos hidrológicos disponibles en el software. A continuación se presenta de forma sintetizada este proceso.

Para ejecutar el software HEC-HMS v. 4.0 se debe hacer doble clic sobre el ícono de acceso directo que se encuentra en el "Escritorio" del ordenador.

4.1.1 Crear un nuevo proyecto.

- En el menú “File” elegir “New” o presionar la combinación de teclas (Ctrl +N). Con esto se abre la ventana “Create a new Project”. En esta ventana:

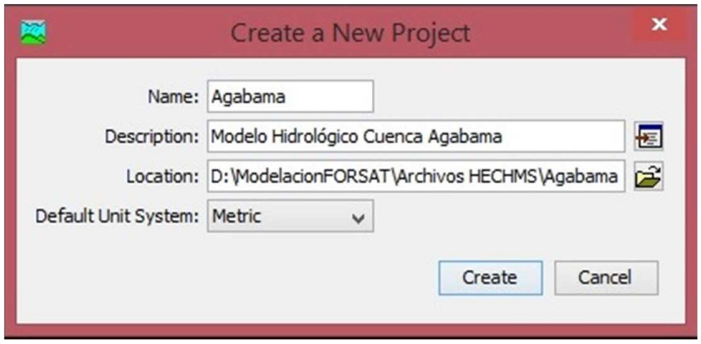


Figura 4.1. Caja de diálogo “Create a New Project”

- Escribir en la caja de texto “Name” el nombre con que se identificará el modelo, este será el nombre del proyecto que se crea y también el nombre del directorio donde se guardarán todos los ficheros del proyecto.
- En la caja de texto “Description” se puede registrar, opcionalmente, información de interés de la cuenca, por ejemplo: el área, la ubicación, o bien la condición que se quiere simular.
- En “Location”, seleccionar el directorio donde se almacenará el proyecto, se recomienda siempre guardar el proyecto en direcciones cerca de la raíz del disco duro, para evitar luego errores en la simulación.
- En “Default Unit System”: Mantener el sistema Métrico (“Metric”), además se puede optar por el sistema “U. S. Customary”, si así fuese el caso del origen de sus datos.
- Luego hacer clic en el botón “Create”.

4.1.2 Definir el modelo de la cuenca.

Los modelos de cuenca son una de los principales componentes de un proyecto. Su principal propósito es convertir condiciones atmosféricas en escurrimientos fluviales en lugares específicos dentro de la cuenca. Se usan elementos hidrológicos para dividir la cuenca en pedazos manejables. Estos elementos se conectan entre sí en una red dendrítica para formar una representación del sistema fluvial Pueden utilizarse bases cartográficas digitales para auxiliar durante la colocación de los elementos hidrológicos en un contexto espacial.

Para definir el modelo de la cuenca en el HEC-HMS, ejecutar la orden “Basin Model Manager” del menu “Components”. Aparecerá la ventana “Basin Model Manager” donde se hará clic en “New” para abrir la ventana “Create A New Basin Model”. Ver figura 4.2.

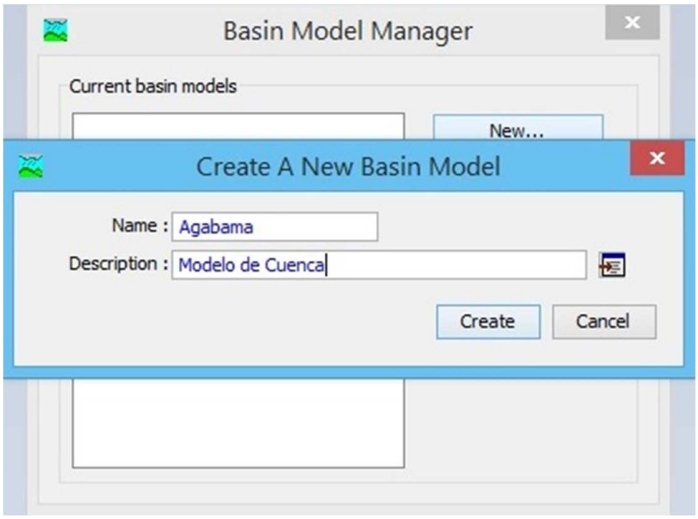


Fig. 4.2 Administrador del modelo de la cuenca (Basin Model Manager) y ventana “Create A New Basin Model”.

- En la caja “Name” se escribirá el nombre de la cuenca del proyecto que se crea que también será el nombre del fichero donde se guardarán todos los datos correspondientes a la cuenca creada para el proyecto.
- En Description: Esta descripción es opcional.
- Hacer clic en el botón “Create” con para regresa a la ventana “Basin Model Manager” y, luego, cerrar esta ventana haciendo clic en el botón de la esquina superior derecha.
- Automáticamente, en el panel del Explorador de la cuenca, se mostrará el modelo de la cuenca anteriormente creado. (“Basin Models”). Ver figura 4.3.

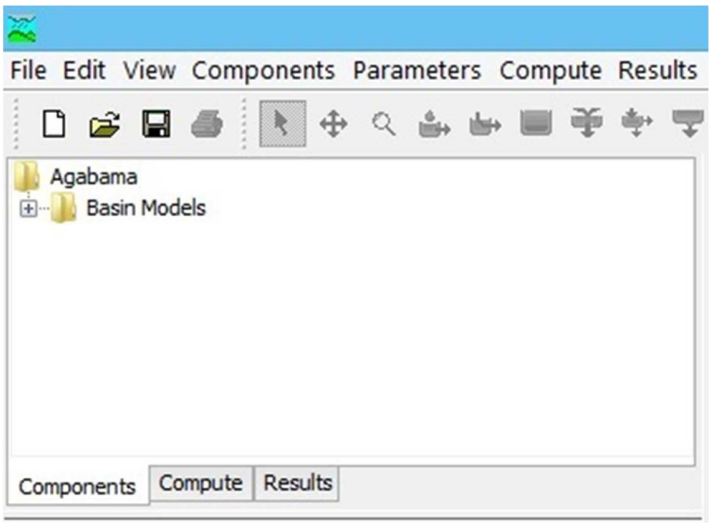


Figura 4.3 Explorador de la cuenca mostrando el modelo creado

Al hacer doble clic en “Basin Models” se muestra el nombre de la cuenca creada y al hacer clic en este se muestran sus componentes, tanto en el Panel del editor de componente, como en el área de Escritorio, lugar este donde se va a representar gráficamente el modelo de la cuenca. A continuación se activan automáticamente los íconos de la Barra de herramientas que muestran los

siete tipos de elementos hidrológicos (encerradas dentro de una elipse roja en la figura 4.4) que sirven para representar el modelo de la cuenca.

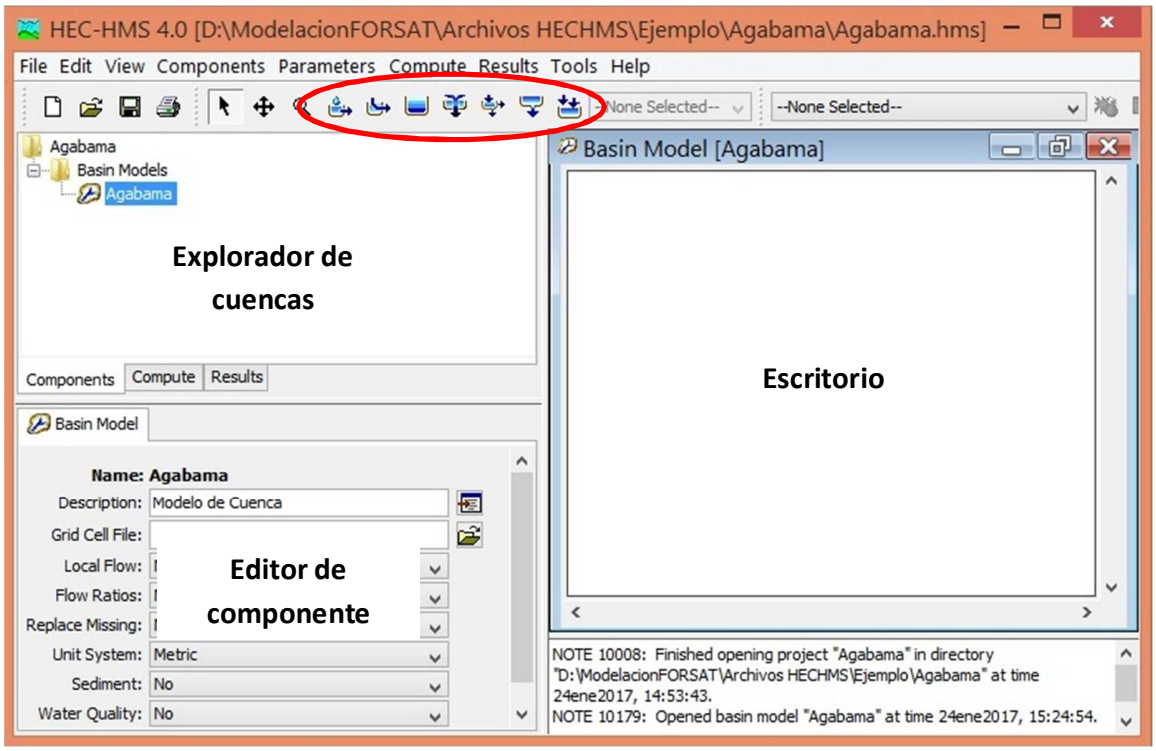


Figura 4.4. Ambiente general de HEC-HMS (herramientas de elementos hidrológicos encerradas dentro de la elipse roja).

4.1.3 Salvar el proyecto

Hacer click en el comando “Save” del menú “File”. El proyecto se guardará automáticamente en la dirección fijada al inicio de estas instrucciones en el directorio ya definido.

4.1.4 Incluir base cartográfica (mapas de la cuenca, red fluvial, etc)

El mapa de la cuenca, constituye una base de orientación en el proceso de colocación de los elementos hidrológicos, que le permite al usuario logar una distribución de los componentes lo más cercano a la realidad, por tanto no posee ningún efecto real sobre las simulaciones y cálculos que se realicen en el proyecto HEC-HMS. HEC-HMS no genera los mapas, pero sí permite la utilización de mapas digitalizados, por ejemplo desde ArcView, Auto CAD Map, entre otros.

En el caso de los mapas digitalizados con ArcView, se crea el fichero mapa con extensión .shp, y a su vez otros dos ficheros de extensiones, .dbf y .shx. Se debe Tener el cuidado de copiar los tres ficheros al subdirectorio Maps, en este caso dentro del directorio del proyecto, toda vez que son necesarios para que se visualice el de extensión .shp. El proceso general es el siguiente:

- Copiar el archivo de extensión .map (o archivos de extensiones .shp, .dbf, .shx) del mapa de la cuenca digitalizado, a la carpeta “Maps”, que está en el directorio donde se está guardando el proyecto.

- Seleccionar, en el Explorador de cuenca, la cuenca del modelo. Esto activará el Escritorio de trabajo.
- Desde el menú principal, ejecutar la orden: View/ Background Maps. En la ventana "Background Maps" que se abrirá (Figura 4.5), seleccionar "Add…". Se abrirá el cuadro de diálogo estándar de apertura de archivos "Select".

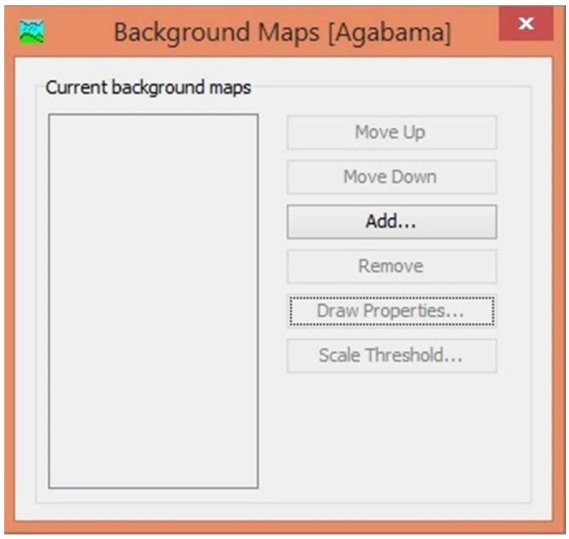


Figura 4.5. Ventana "Background maps"

- Buscar el directorio donde se copió el archivo que se desea mostrar. Si el archivo de mapa se generó en ArcView, (con extensión .shp) se mostrará automáticamente. En caso de ser un mapa de extensión .map se debe cambiar el tipo de extensión seleccionando de la lista desplegable "Archivos de tipo:" (Figura 4.6). Una vez seleccionado el mapa, se hará clic en el botón "Select" para regresar a la ventana "Background maps" donde se mostrará, entonces, el nombre del mapa seleccionado. En caso de que se requiera mostrar información contenida en más de un mapa (ej: el contorno de la cuenca y las subcuencas en un mapa y en otro la red fluvial), se deberá repetir el proceso "Add…" para cada mapa en cuestión.

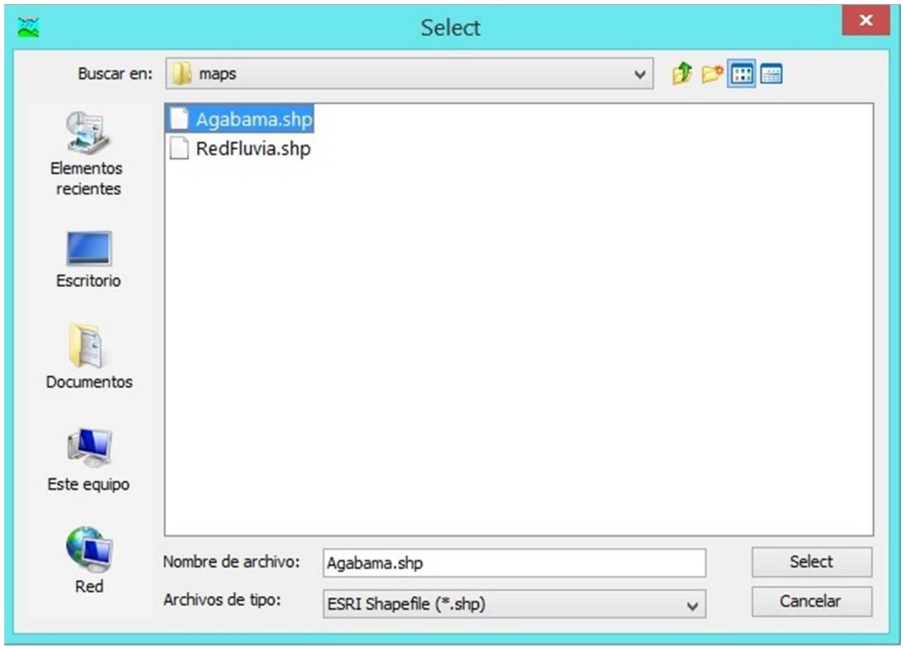


Figura 4.6. Cuadro de diálogo "Select"

- Cerrar la ventana "Background maps" haciendo clic en el botón de la esquina superior derecha. En el área de Escritorio se mostrará el mapa como en el ejemplo de la Figura 4.7. Se puede repetir este proceso para importar otros mapas como el de la red fluvial, las estaciones de medición, etc.

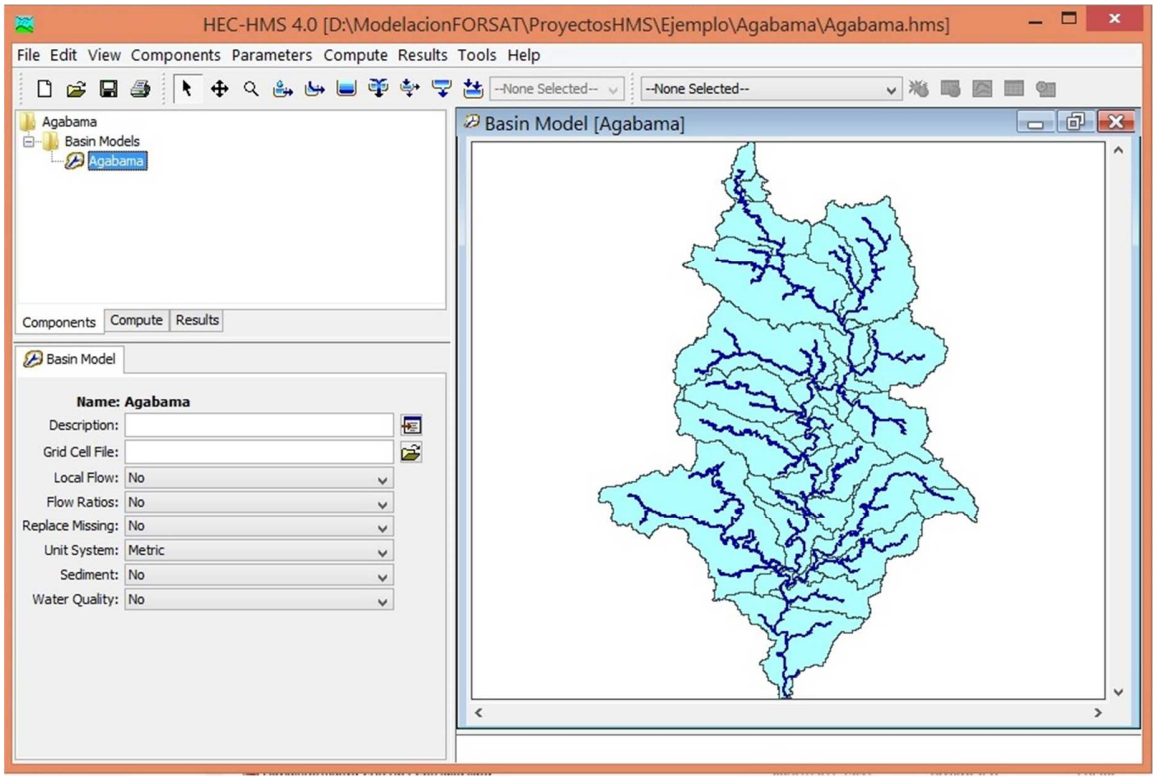


Figura 4.7. Mapa de la cuenca cargado en el área de Escritorio.

4.1.5 Agregar elementos hidrológicos

HEC-HMS dispone de 7 tipos de elementos para la conformación de los modelos hidrológicos. Son estos:

- **Subcuenca ("Subbasin"):** Se usa para representar la cuenca física. Teniendo la precipitación, el efluente del elemento Subcuenca puede calcularse restando las pérdidas de precipitación, calculando el escurrimiento superficial y añadiendo el caudal base.
- **Tramo ("Reach"):** Se usa para conducir el escurrimiento en el modelo de cuenca. El caudal afluente puede proceder de uno o más elementos localizados aguas arriba. El caudal efluente se calcula infiriendo procesos de conversión y atenuación.
- **Confluencia ("Junction"):** Se usa para combinar los escurrimientos procedentes de elementos hidrológicos situados aguas arriba. El caudal de entrada puede proceder de varios elementos y el de salida se calcula totalizando los caudales entrantes.
- **Fuente ("Source"):** Se usa para introducir caudal en el modelo de la cuenca. No tiene caudal de entrada y el de salida lo define el usuario.
- **Sumidero ("Sink"):** Se usa para representar la salida de la cuenca física. El caudal de entrada puede proceder de uno o varios elementos aguas arriba y no hay caudal de salida.
- **Embalse ("Reservoir"):** Se usa para modelar la detención o la atenuación del hidrógrafo en un embalse natural o artificial. El caudal de entrada puede proceder de uno o varios elementos aguas arribas mientras el efluente se puede calcular por alguno de los tres métodos de tránsito de avenida con que cuenta el sistema.
- **Derivación ("Diversion"):** Se usa para modelar el caudal que sale del canal principal. Puede recibir caudales de cualquier elemento aguas arriba. El efluente se divide en caudal derivado y caudal no derivado. Ambos pueden conectarse a cualquier elemento aguas abajo.

Para la modelación de la cuenca Agabama, esta se ha dividido en 21 subcuencas asociadas a los cierres de los tres embalses y las tres estaciones de aforo existentes; y los cierres en asentamientos vulnerables. Además, se incorporaron otras nueve subcuencas llamadas Anexa01, Anexa02,…, Anexa09, para representar las áreas comprendidas entre un cierre determinado y el próximo cierre aguas abajo. A los elementos para representar en el modelo las 30 subcuencas y los tres embalses se les sumó 21 confluencias, 20 conexiones y un sumidero, para un total de 75 elementos. En la figura 4.8 se muestra el diagrama de conexión de dichos elementos.

Una vez definidos los elementos a representar en el modelo, se procede a la conformación del mismo para lo cual, de forma ordenada, se irán colocando en el Escritorio cada uno de los elementos con los parámetros correspondientes según los métodos de cálculo a utilizar; a la vez que se van enlazando dichos elementos. El lugar donde se coloquen los elementos no tiene relevancia alguna pues lo que realmente importa son las relaciones entre los elementos.

Para la modelación hidrológica HEC-HMS (en su versión 4.0) ofrece diferentes métodos para simular las pérdidas por infiltración que incluyen: pérdidas iniciales y tasa de infiltración constante, Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), SCS CN para rejillas y Green & Amp, entre otros. Se dispone de siete métodos para la transformación del exceso de precipitación en escurrimiento superficial (escurrimiento directo) incluyendo métodos de Hidrógrafo Unitario como el de Clark, el de Snyder y el del SCS. También se incluye una implementación del método de la onda cinemática. Cinco métodos se encuentran disponibles para la representación del caudal base tales como el método de recesión (función de decrecimiento exponencial), el método del caudal base constante mensual y el método no lineal de Bossiness. Pueden usarse seis métodos de

tránsito de avenida para simular el flujo en conducciones abiertas, incluyendo un método de retardo para la modelación sin atenuación y los métodos de Muskingum y “Straddle stagger” para aproximaciones simples de la atenuación. Para el caso del modelo hidrológico de la cuenca Agabama se han seleccionado, y en base a ello parametrizado los elementos, los métodos relacionados en la tabla 4.1.

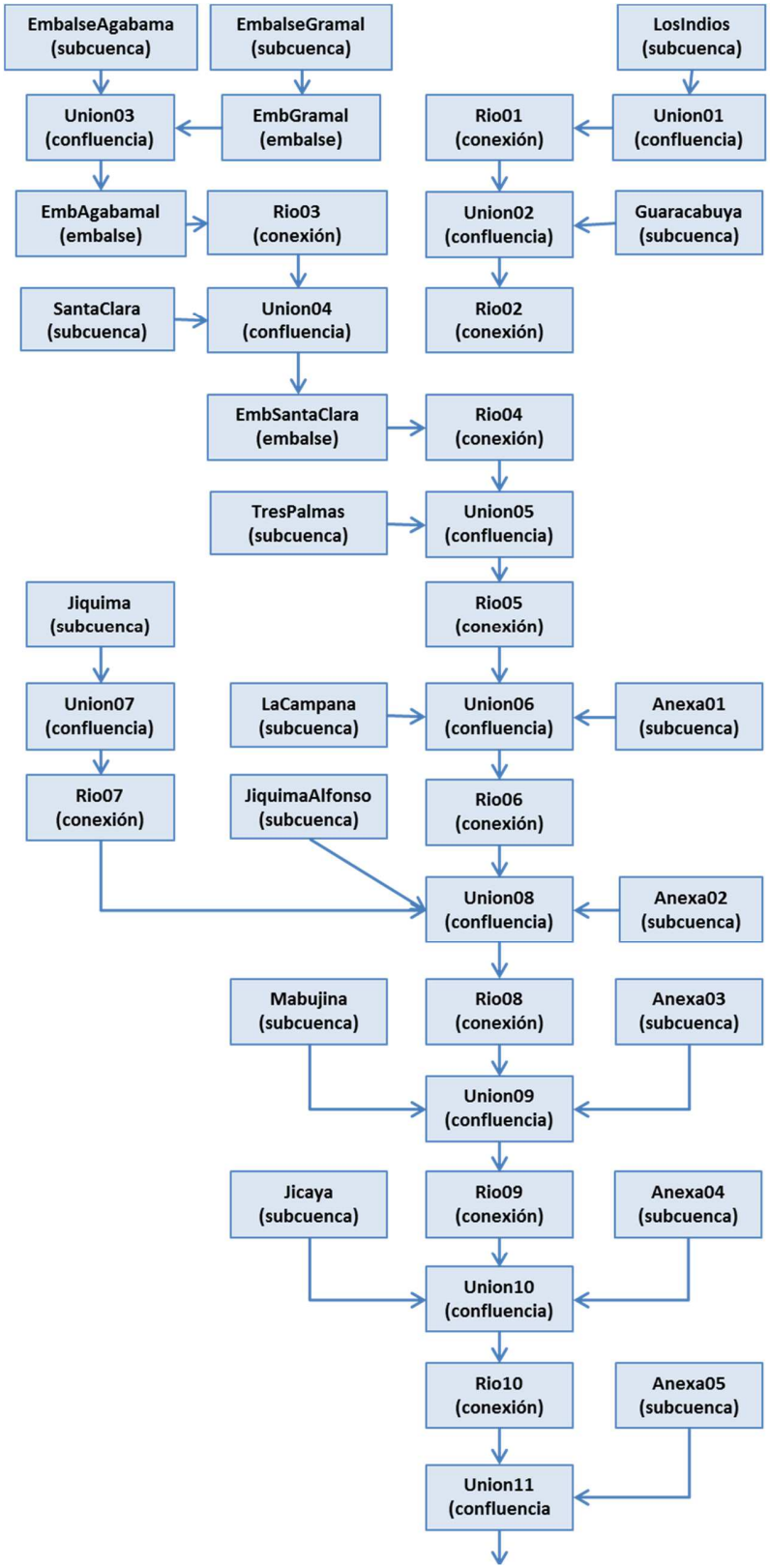


Figura 4.8a. Diagrama de conexión de los elementos hidrológicos de la cuenca Agabama.

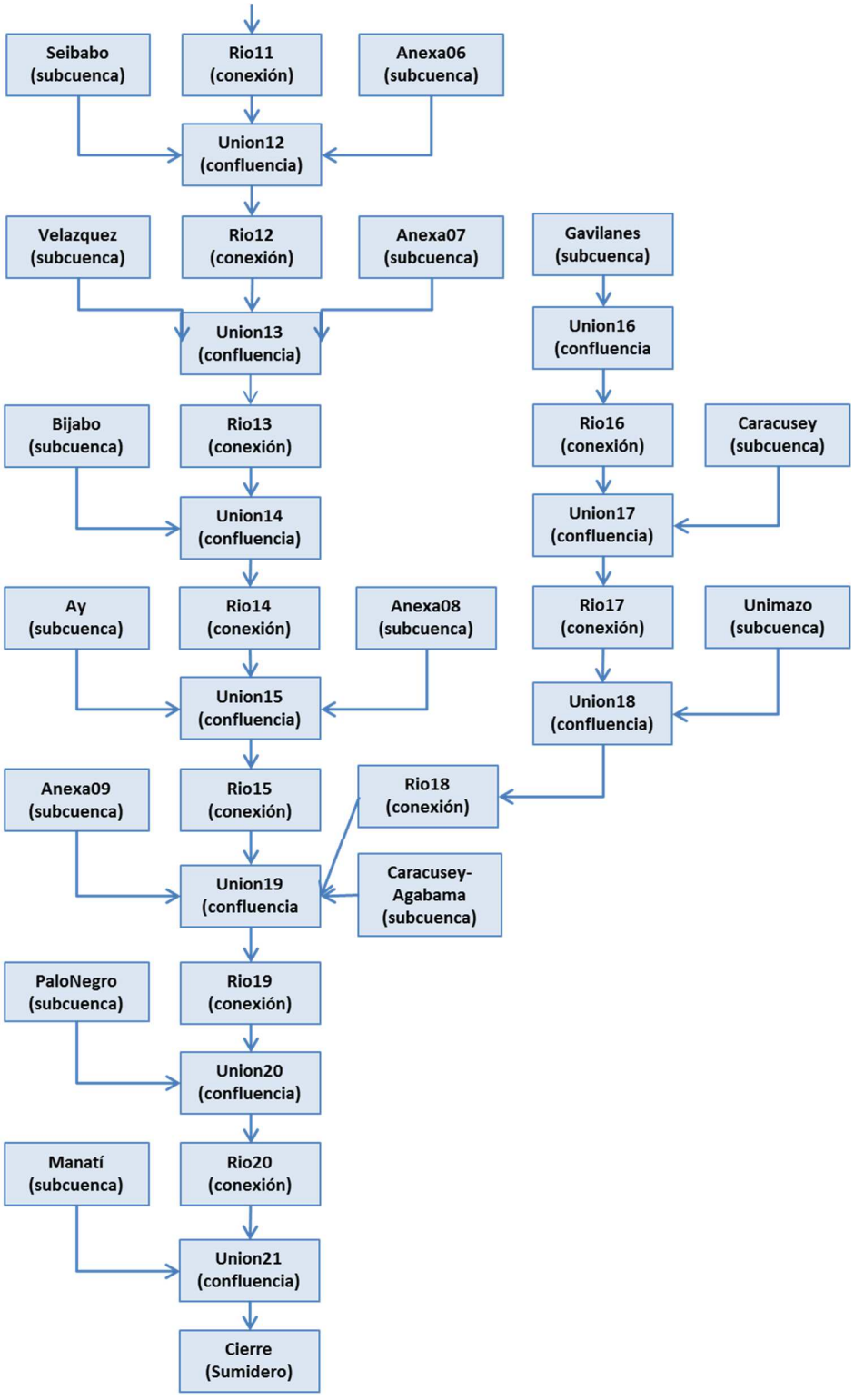


Figura 4.8b. Diagrama de conexión de los elementos hidrológicos de la cuenca Agabama (continuación).

Tabla 4.1. Métodos de cálculo empleados en el modelo hidrológico de la cuenca Agabama.

Proceso	Método	Parámetros
Pérdidas por infiltración	Número de curva del SCS	• Abstracción inicial (mm) • Número de curva • Porcentaje de superficie impermeable
Transformación lluvia neta - escurrimiento	Hidrógrafo Unitario del SCS	• Tipo de hidrógrafo • Tiempo de (min)
Caudal base		
Tránsito de avenida	Muskingum	• K de Muskingum (Hr) • X de Muskingum • Cantidad de subtramos

Para representar las subcuencas en el modelo, se procede:

- Seleccionar en el menú “Edit” el comando “Subbasin Creation Tool” o seleccionar la herramienta correspondiente en la barra de herramientas. Al pasar sobre el Escritorio el puntero del mouse cambiará su forma habitual (flecha) por la de una cruz.
- Hacer clic en el lugar del Escritorio donde se colocará la subcuenca
- En la ventana “Create A New Subbasin Element” que se mostrará a continuación, escribir en la caja “Name” el nombre que se le asignará al nuevo elemento subcuenca que se está creando (ej. “LosIndios”) y en la caja “Description” agregar (opcional) una descripción para dicho elemento. Hacer clic en el botón “Create”.

Después de este proceso, en el panel del explorador de la cuenca se tendrá lo siguiente:

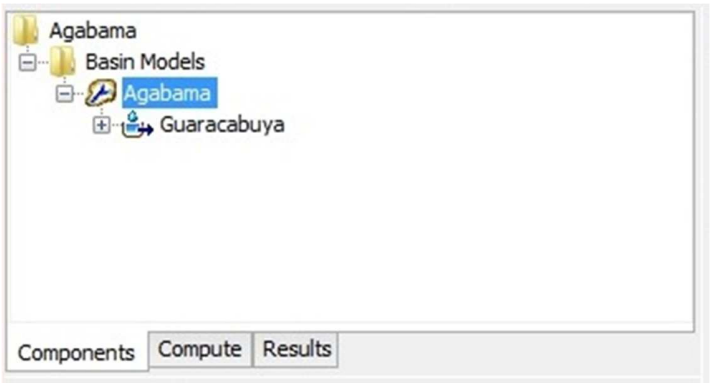


Figura 4.9. Explorador de cuenca expandido mostrando el elemento hidrológico “Subcuenca” para la subcuenca Guaracabuya en el modelo de la cuenca Agabama.

Mientras, en el Escritorio se tendrá:

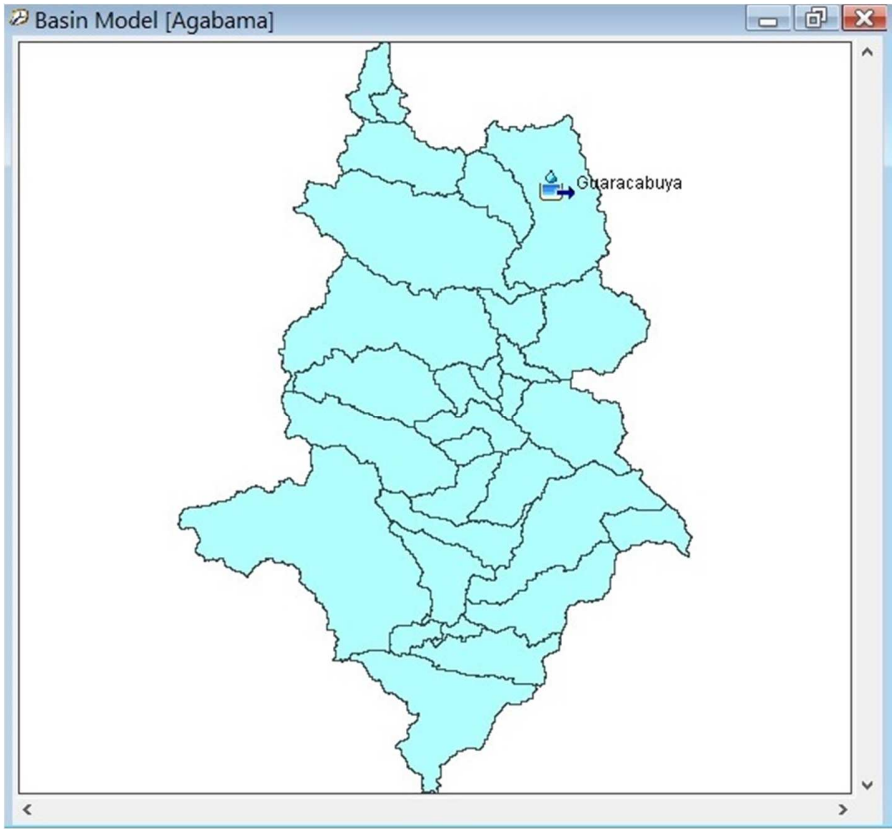


Figura 4.10. Mapa de la cuenca Agabama y elemento hidrológico “Subcuenca” para la subcuenca Guaracabuya.

- Se repetirá este proceso para crear las restantes subcuencas del modelo. Como la herramienta “Subbasin” está activa, solo hay que hacer clic en lugares convenientemente seleccionados del Escritorio para crear los demás elementos. Cuando se hayan creado todos los elementos necesarios presionar la tecla “Esc”, para regresar el puntero a la forma clásica. Una vez creadas todas las subcuencas, el Explorador y el Escritorio lucirían como en la figura 4.11.

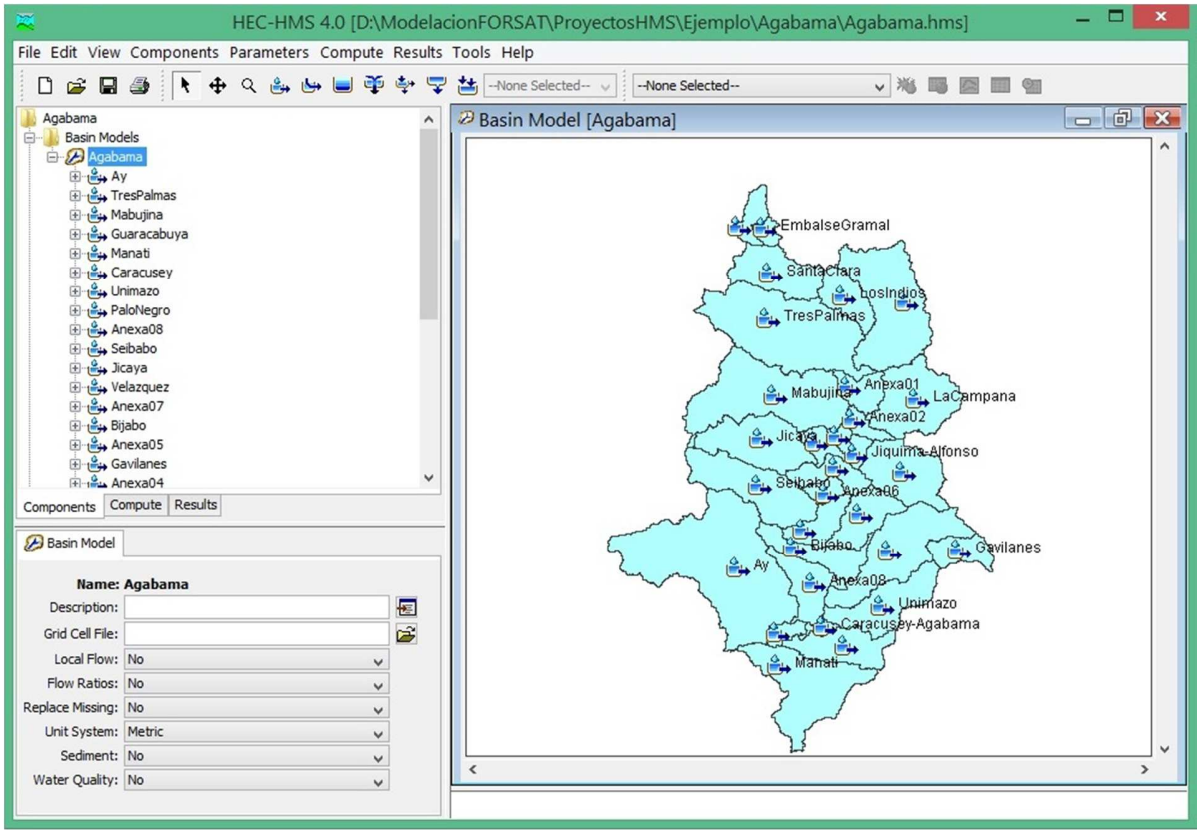


Figura 4.11. Vista del Explorador y el Escritorio luego de creadas todos los elementos “Subcuenca”.

Para representar las confluencias en el modelo, se procede:

- Seleccionar en el menú “Edit” el comando “Junction Creation Tool” o seleccionar la herramienta correspondiente en la barra de herramientas. Al pasar sobre el Escritorio el puntero del mouse cambiará su forma habitual (flecha) por la de una cruz.
- Hacer clic en el lugar del Escritorio donde se colocará la confluencia
- En la ventana “Create A New Junction Element” que se mostrará a continuación, escribir en la caja “Name” el nombre que se le asignará al nuevo elemento confluencia que se está creando (ej. “Union01”) y en la caja “Description” agregar (opcional) una descripción para dicho elemento. Hacer clic en el botón “Create”.
- Después de este proceso, en el panel del Explorador de la cuenca y en el Escritorio se tendrá lo siguiente:

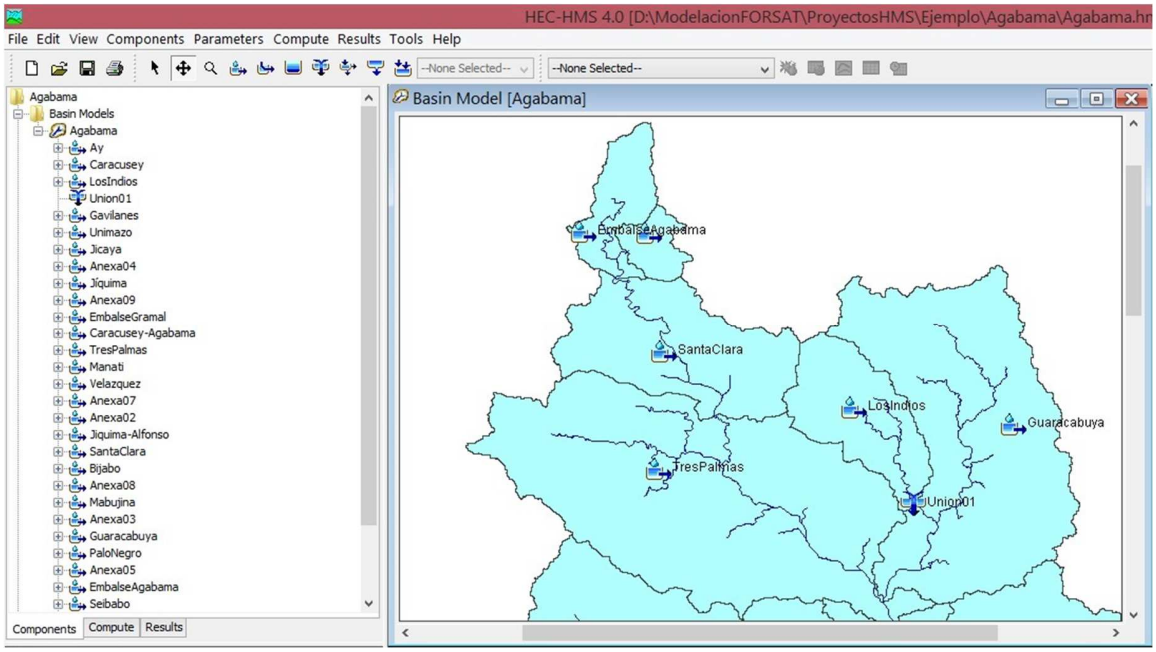


Figura 4.12. Vista del Explorador y el Escritorio luego de la inserción del elemento “Confluencia” nombrado “Union01”.

- Se repetirá este proceso para crear las restantes confluencias del modelo. Como la herramienta “Junction” está activa, solo hay que hacer clic en lugares convenientemente seleccionados del Escritorio para crear los demás elementos. Cuando se hayan creado todos los elementos necesarios presionar la tecla “Esc”, para regresar el puntero a la forma clásica. Una vez creadas todas las confluencias, el Explorador y el Escritorio lucirían como en la figura 4.13.

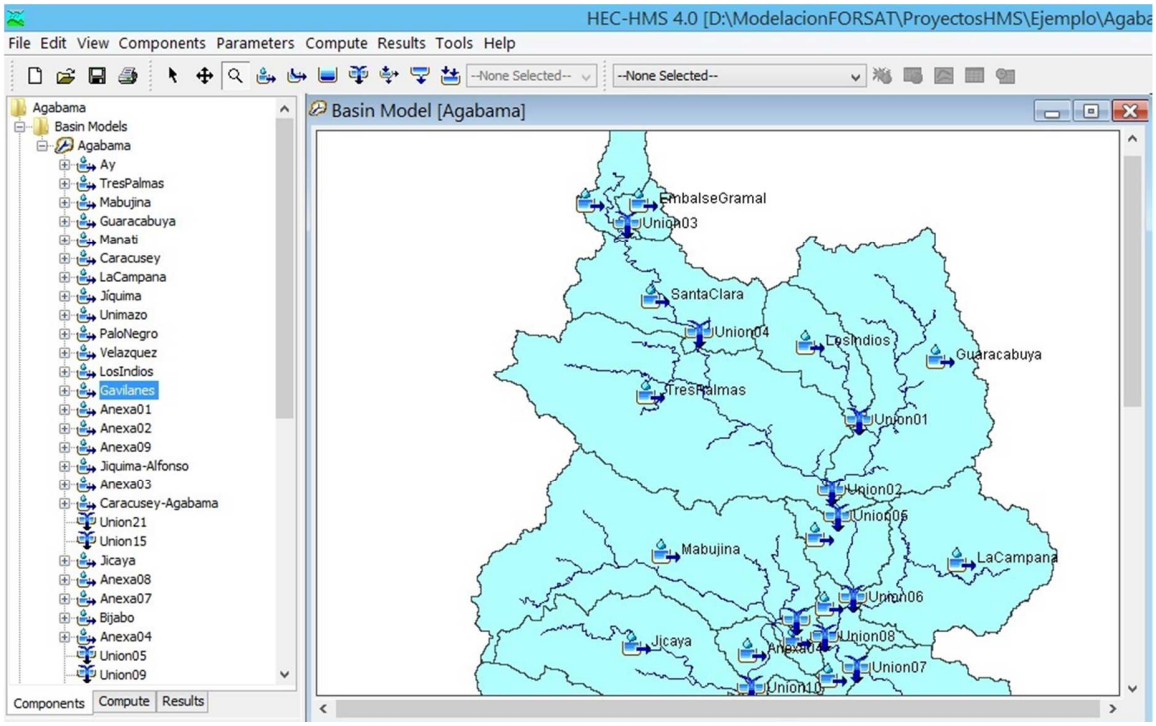


Figura 4.13. Vista del Explorador y el Escritorio luego de la inserción de todos los elementos de tipo “Confluencia”.

Para representar los embalses:

- Seleccionar en el menú “Edit” el comando “Reservoir Creation Tool” o seleccionar la herramienta correspondiente en la barra de herramientas. Al pasar sobre el Escritorio el puntero del mouse cambiará su forma habitual (flecha) por la de una cruz.
- Hacer clic en el lugar del Escritorio escogido donde se colocará el embalse.
- En la ventana “Create A New Reservoir Element” que se mostrará a continuación, escribir en la caja “Name” el nombre que se le asignará al nuevo elemento embalse que se está creando (ej. “EmbGramal”) y en la caja “Description” agregar (opcional) una descripción para dicho elemento. Hacer clic en el botón “Create”.
- Se repetirá este proceso para crear los restantes embalses del modelo haciendo clic en lugares convenientemente seleccionados del Escritorio. Cuando se hayan creado todos los elementos necesarios presionar la tecla “Esc”, para regresar el puntero a la forma clásica. Una vez creadas todas las confluencias, el Explorador y el Escritorio lucirían como en la figura 4.14.

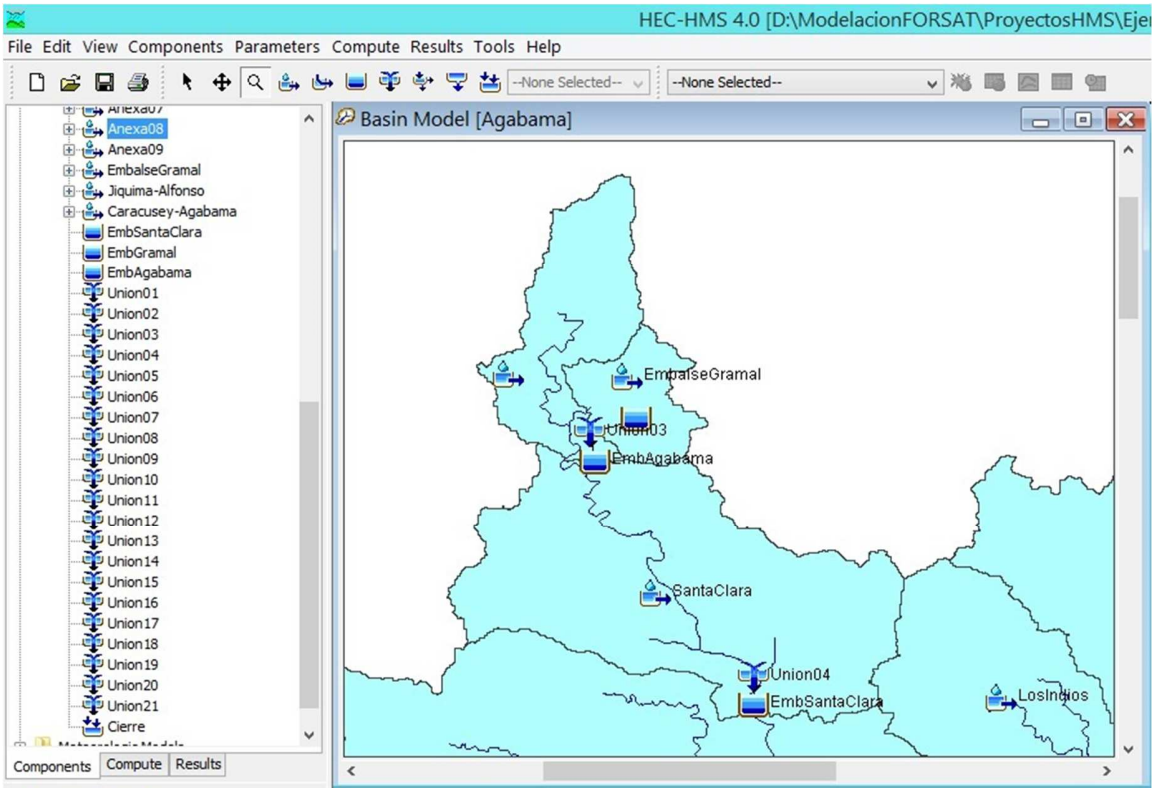


Figura 4.14. Vista del Explorador y el Escritorio luego de la inserción de todos los elementos de tipo “Embalse”.

Para representar el cierre de la cuenca:

- Seleccionar en el menú “Edit” el comando “Sink Creation Tool” o seleccionar la herramienta correspondiente en la barra de herramientas. Al pasar sobre el Escritorio el puntero del mouse cambiará su forma habitual (flecha) por la de una cruz.
- Hacer clic en el lugar del Escritorio escogido para representar el cierre de la cuenca.
- En la ventana “Create A new Sink Element” que se mostrará a continuación, escribir en la caja “Name” el nombre que identificará al cierre de cuenca que se está creando (ej. “Cierre”) y en la caja “Description” agregar (opcional) una descripción para dicho elemento. Hacer clic en el botón “Create”.

Para representar las conducciones o los tramos de río se recomienda revisar el esquema de conexión de los elementos de la cuenca (Figura 4.8) pues para ellos es muy importante respetar el sentido de circulación, el cual regirá la definición de los puntos inicial y final de cada tramo. También se recomienda activar la opción “Draw Flow Directions” en el menú “View”. Con ello, cuando se fijen los puntos extremos del tramo de río, se mostrará automáticamente el sentido de circulación del mismo. Entonces, se procede como sigue:

- Seleccionar en el menú “Edit” el comando “Reach Creation Tool” o seleccionar la herramienta correspondiente en la barra de herramientas. Al pasar sobre el Escritorio el puntero del mouse cambiará su forma habitual (flecha) por la de una cruz.

· ! : , ; !
G2 !/ ! I. : , ;
GB I.
· 2 % G# / E 0 I + - !
GE I ! + % : +
, G0 * I. G' & I , & . & &
! G# I
· 0 & & & :
2 ! & % &
& G2 I- &
& + B % - 25&
2 :

3 9 25& 2
& GH I

/ & & 6
+ ! -
& & % 5 % 1 -
! & ! ! -
& 3 (

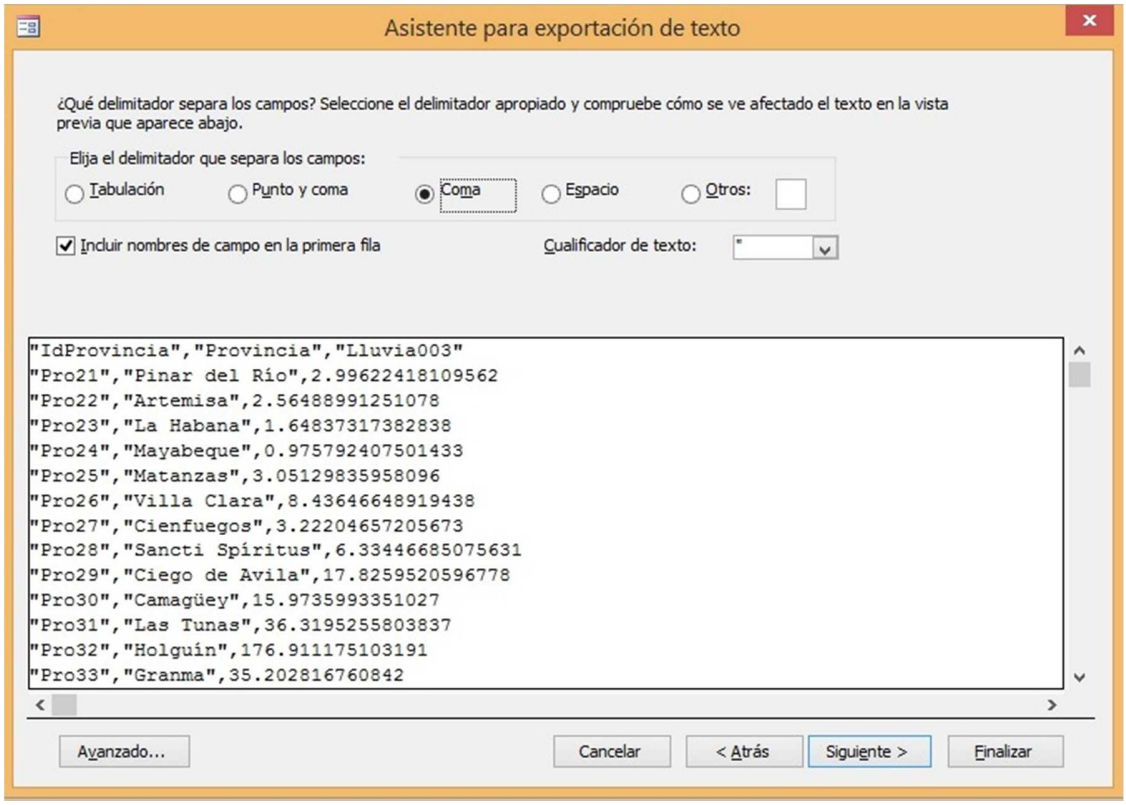


Figura 5.7. Asistente para exportación de archivos de texto, tercera sección.

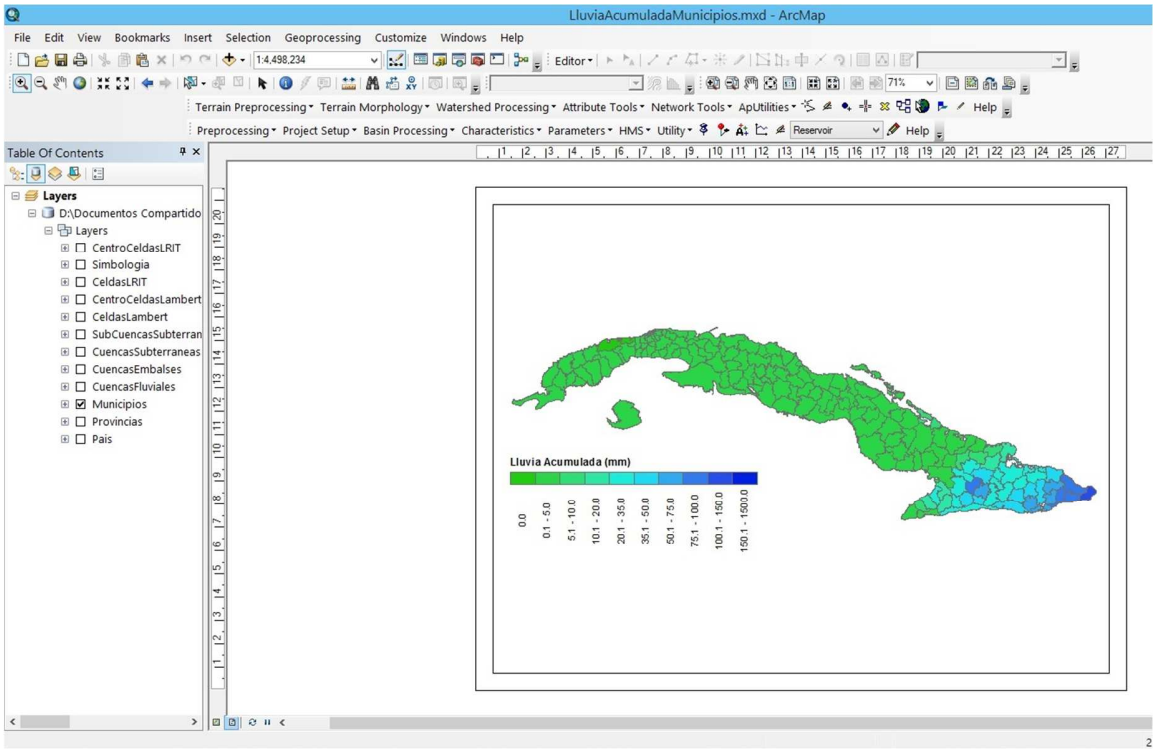


Figura 5.8. Mapa de lluvia acumulada por municipios.

5.1.1.c. Exportación de rejillas ASCII de ArcInfo

En el extremo superior derecho de la ficha "Consultas prediseñadas" se ha situado el botón de comando "Exportar rejilla ASCII". Esta es la herramienta para la exportación de los archivos con formato rejilla ASCII (.asc) para ArcInfo, con acumulados de lluvia para intervalos regulares de una hora o tres horas (según sea lluvia estimada o lluvia pronosticada) comprendidos en el período a consultar definido por el usuario, archivos que serán más adelante asimilados por HEC-DSS. Los archivos .asc se generarán solamente para delimitaciones independientes de cuencas fluviales, es decir, uno para cada cuenca.

Una vez definido el período de consulta, al presionar el botón "Exportar rejilla ASCII" se mostrará el formulario para la selección de una o varias cuencas para las que se exportaran los archivos .asc (Figura 5.9). En el formulario aparecerá el listado de las cuencas fluviales definidas en la Clasificación Decimal de Ríos y Cuencas de Cuba, cada una con un cuadro de selección a su derecha el cual se marcará o desmarcará a criterio del usuario. Para agilizar el proceso se han habilitado dos botones para seleccionar/deseleccionar todas las cuencas.

Luego de seleccionar solo las cuencas para las que se quiere exportar los archivos y de presionar el botón "Aceptar", se mostrará un cuadro de diálogo para la selección de la carpeta en la que se almacenarán los archivos (recomendablemente …\Rejillas ASCII). Al aceptar, se irán creando secuencialmente los archivos con el nombre formateado de la forma "CueCC.CCC aaaammdd hhnn – aaaammdd hhmnn.asc", siendo CC.CCC el código decimal de la cuenca y aaaammdd hhnn las fecha-hora (UTC) de inicio y cierre de cada intervalo regular de una o tres horas.

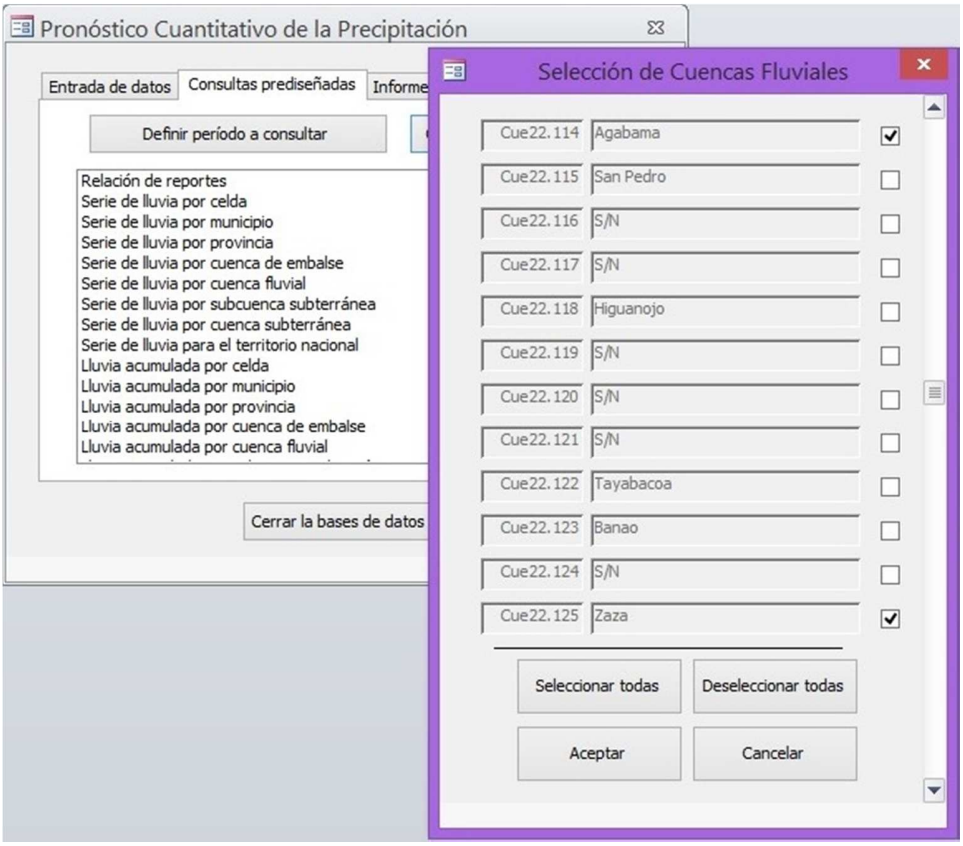


Figura 5.9. Formulario para la selección de cuencas fluviales durante la exportación de archivos .asc

Los archivos .asc están compuestos por un encabezado de seis líneas seguido de un arreglo de valores ordenados como una imagen de la rejilla. Los parámetros de las seis líneas del encabezado se presentan a continuación:

- NCOLS; número de columnas de la rejilla; entero.
- NROWS; número de filas de la rejilla; entero.
- XLLCORNER; coordenada X en metros (proyección Lambert Norte para Cuba) de la esquina inferior izquierda; real.
- YLLCORNER; coordenada Y en metros (proyección Lambert Norte para Cuba) de la esquina inferior izquierda; real.
- CELLSIZE; tamaño de la celda en metros; real.
- NODATA_VALUE; indicador de dato faltante; implícito -9999.

Cada rejilla contenida en un archivo .asc será una porción de una rejilla general para toda Cuba con celdas de 5 km x 5 km ordenadas en 76 filas y 277 columnas, cuya esquina inferior izquierda se localiza en las coordenadas Norte 3000,00 m; Este 88500,00 m, según la proyección Lambert Norte para Cuba. La resolución espacial asumida está condicionada por las resoluciones admitidas por HEC (GRIDUtil, DSSVue, .dss) para las rejillas del sistema “Standard Hydrologic Grid”.

5.1.1.d. Informes prediseñados

Los informes prediseñados no son sino complementos o mejoras desde el punto de vista visual de las salidas prediseñadas, de forma tal que se facilita su comprensión, distribución e impresión. Se dispone hasta el momento de las salidas para acumulados de lluvia por municipio, provincia, cuenca de embalse, cuenca fluvial, cuenca y subcuenca subterránea.

Para la presentación de los informes prediseñados se procede de forma similar a las consultas prediseñadas pero en la ficha dispuesta al efecto ("Informes prediseñados") en el formulario principal. En ella se dispone del botón de comando "Definir período a informar" que realiza exactamente la misma función que el botón "Definir período a consultar" (pueden usarse ambos botones indistintamente). Una vez definido el período se selecciona y abre, mediante doble clic en la lista de informes, el informe deseado.

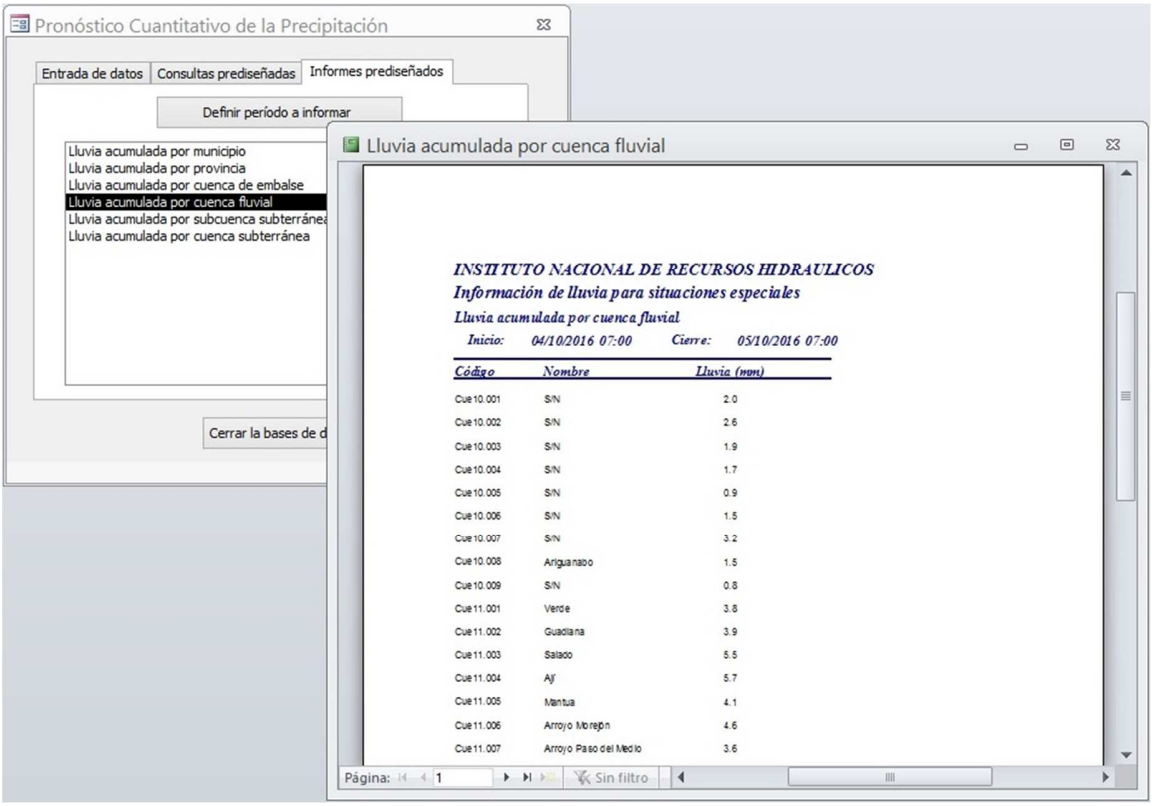


Figura 5.10. Vista de la ficha "Informes prediseñados" y ejemplo de un informe de lluvia acumulada por cuenca fluvial.

5.1.2. Importación de las rejillas de lluvia en HEC-DSS

Las series cronológicas de información espacial se han vuelto cada vez más importantes para alimentar aplicaciones hidrológicas, pero ellas plantean un reto en cuanto al almacenamiento estandarizado y el indexado. La estructura de datos con formato de rejilla o cuadriculados en HEC-DSS brinda un muy eficiente almacenamiento de y acceso a juegos de datos del mismo parámetro, expresado en las mismas unidades, que cubren las mismas celdas de la rejilla (en términos de

extensión espacial u definición de coordenadas) a través de un recurrente intervalo de tiempo constante.

Cada archivo de HEC-DSS es un archivo independiente de base de datos y puede ser fácilmente intercambiado entre usuarios y aplicaciones que reconocen HEC-DSS, sin conversiones de plataforma o dependencias externas tales como definiciones de esquema. HEC-DSS está principalmente diseñado para facilitar el uso de series cronológicas de datos tales como niveles horarios del agua o gastos medios mensuales. La herramienta principal para el manejo de datos de HEC-DSS es el la aplicación HEC-DSSVue (Motor Utilitario Visual del Sistema de Almacenamiento de Datos del Centro de Ingeniería Hidrológica).

HEC-GridUtil es el programa desarrollado para facilitar la visualización, procesamiento y análisis básicos de juegos de datos con formato de rejilla en HEC-DSS, aunque muchas otras tareas de gestión ordinaria, talas como la copia de datos entre archivos de HEC-DSS o el renombrado de registros, se realizan usando HEC-DSSVue. Las secuencias de rejillas típicamente aproximan la variación en el espacio de una medición que varía para intervalos fijos de tiempo en lugares fijos. Los tipos predominantes de datos en rejilla en DSS son las series cronológicas con intervalos regulares de variables hidrológicas distribuidas en una extensión geográfica fija tales como precipitación estimada por radar, o temperaturas medias diarias sobre una cuenca. El almacenamiento en HE-DSS primeramente facilita el uso de los datos por el modelo HEC-HMS (Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica) pero, además, brinda ventajas en cuanto a la velocidad de acceso, la organización de los datos, el tamaño de archivo, la portabilidad, etc.

HEC-DSS almacena los datos las rejillas como registros en una base de datos a los que referencia de acuerdo a identificadores descriptivos o “nombres-rutas”. Un nombre-ruta consiste de hasta 391 caracteres y, por convención, está separado en seis partes de hasta 64 caracteres cada una (delimitadas por slashes “/”), etiquetadas de “A” a “F” de la siguiente forma:

1. La parte A se refiere al sistema de coordenadas de la rejilla. Las dos principales definiciones de referencia espacial son conocidas como Proyecto Hidrológico de Análisis de Lluvia (HRAP por sus siglas en inglés) y Rejilla Hidrológica Estándar (SHG).
2. La parte B describe el área cubierta por los datos cuadriculados como una cuenca, una región, etc.
3. La parte C se refiere al parámetro representado por la rejilla tal como precipitación (PRECIP) o temperatura (TEMP)
4. La parte D contiene el instante inicial del período representado por los datos de la cuadrícula, tal como 04OCT2016:0700.
5. La parte E contienen el instante final del período representado.
6. La parte F contiene información de identificación especificada por el usuario que distingue un juego de rejillas de otro.

Además de los descriptores contenidos en el nombre-ruta, los registros de HEC-DSS incluyen información de encabezado. El encabezado identifica las unidades, tipo de datos, definiciones espaciales y estadísticas sobre los valores de los datos de las celdas.

Para la inserción de las matrices de precipitación en un archivo .dss mediante la aplicación GridUtil se requiere, además del archivo .dss (sea nuevo, sea existente) y las matrices ASCII, un proyecto o "cuenca" de GridUtil. Esta "cuenca", a los efectos del sistema de modelación, tendrá como principal utilidad la habilitación de menús, opciones y herramientas en la aplicación GridUtil.

Para crear una nueva cuenca, ejecutar la aplicación GridUtil, seleccionar "Create New Watershed" del menú "File", se abrirá la caja de diálogo "Create New Watershed" (Figura 5.11). En el campo "Name" introduzca el nombre del nuevo proyecto de GridUtil. Se creará un subdirectorio con este nombre para almacenar los archivos para la cuenca, por lo que se debe evitar el uso de caracteres con especial significado para el sistema operativo. Se puede introducir una descripción de la cuenca o características importantes en el campo "Description".

Figura 5.11. Caja de diálogo "Create New Watershed"

Hacer clic en "Select Location" para seleccionar la carpeta en la cual se almacenará la carpeta del proyecto GridUtil (se recomienda la carpeta "Archivos DSS" del directorio de trabajo del sistema de modelación), se abrirá el navegador "Select Watershed Folder" (Figura 5.12). Navegar hasta la carpeta contenedora. Alternativamente se puede pegar la ruta completa en el campo "File Name". Hacer clic en "Open".

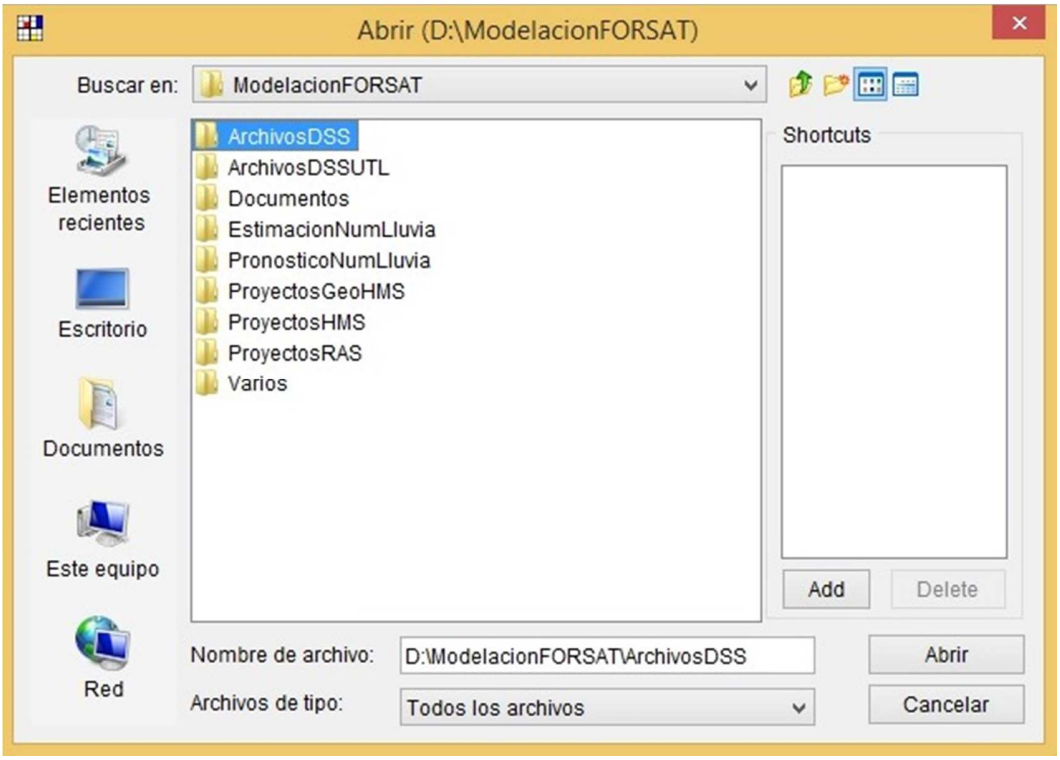


Figura 5.12. Navegador “Select Watershed Folder”

Luego, seleccionar el sistema de unidades (SI) y la zona horaria del proyecto (International Time Zones; GMT -5:00 Cuba). Hacer clic en “OK”. Aparecerá una caja diálogo resumen mostrando el nombre, la descripción, el sistema de unidades y la zona horaria de la nueva cuenca. Si todo está bien, hacer clic en “OK”. Una nueva carpeta de proyecto se creará y se poblará con la información básica que describe la nueva cuenca.

Una vez creado y abierto el proyecto, para proceder con la importación de las matrices ASCII se deberá seleccionar “ArcInfo Ascii…” del submenú “Import” del menú “Single Grid”. Se mostrará la caja de diálogo “Import ArcInfo ASCII Files” (Figura 5.13), hacer clic en “Add File”, en la caja de diálogo “Open File” aparecerá (Figura 5.14) navegar hasta la carpeta donde se almacenan los archivos de matrices ASCII (se recomienda las carpeta “Rejillas ASCII” de los subdirectorios para pronóstico y estimación numéricos de lluvia). Seleccionar el archivo a importar y hacer clic en “OK”.

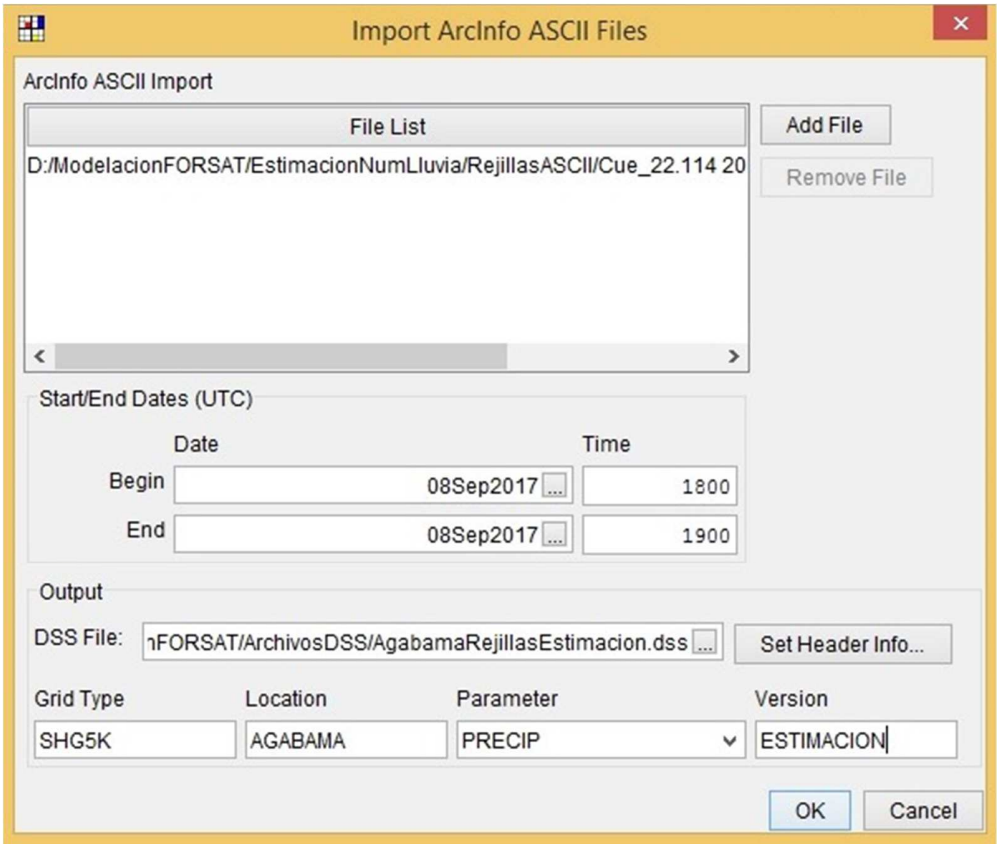


Figura 5.13. Caja de diálogo “Import ArcInfo ASCII Files”.

En el campo “Grid Type” para la definición del tipo de rejilla, escribir “SHG5K” indicativo del sistema de rejillas “Standard Hydrologic Grid” con resolución espacial de 5 km. En el campo “Location” se definirá el espacio físico que representa la rejilla importada (se recomienda el nombre de la cuenca fluvial) mientras en el campo “Parameter” se seleccionará la variable hidrológica registrada en la rejilla (“PRECIP”). En el campo “Version” escribir “PRONOSTICO” o “ESTIMACION” según el caso. Hacer clic en “OK”

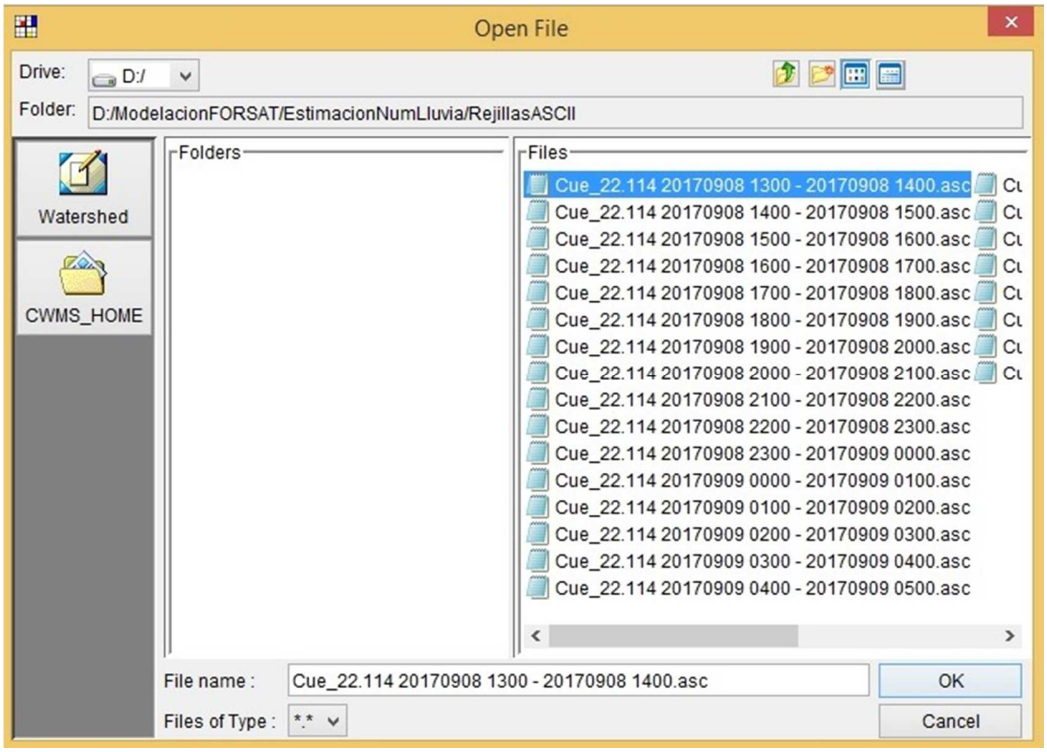


Figura 5.14. Caja de diálogo “Open File” para la selección de archivos de matrices ASCII.

En la sección “Start/End Dates (UTC) se introducirán las combinaciones fecha/hora de inicio y fin de la lluvia registrada en la rejilla que se importa. Tal y como se muestra en la Figura 5.13, las fechas tendrán el formato “DDMMMAAAA” con los meses representados por sus tres primeras letras en inglés mientras el formato de las horas será hhmm.

En la sección “Output” seleccionar el archivo .dss para el almacenamiento de las matrices haciendo clic en el botón localizado en el extremo derecho dentro del campo “DSS File”. Aparecerá una caja de diálogo “Open File” (Figura 5.15) en la que se navegará hasta la carpeta de los archivos .dss (se recomienda la carpeta “Archivos DSS” del directorio de trabajo del sistema de modelación). En caso de tratarse de un archivo existente, seleccionarlo de la lista de archivos y en caso contrario escribir el nombre del nuevo archivo en el campo “File Name”. Hacer clic en “OK”.

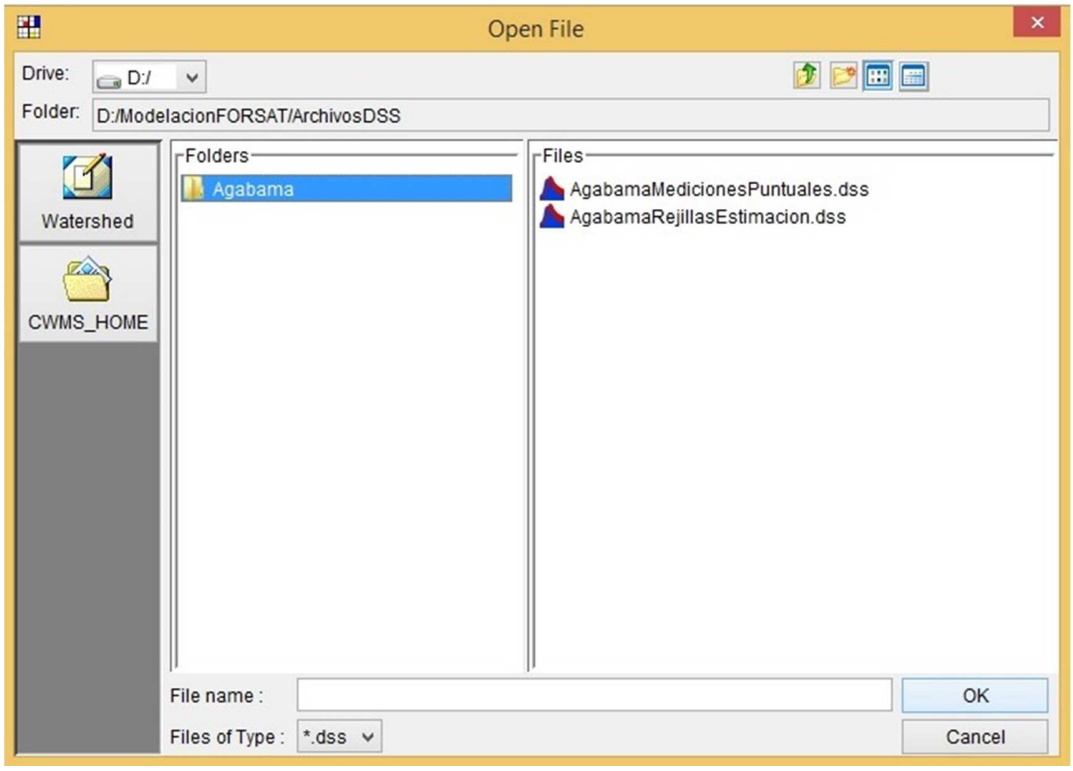


Figura 5.15. Caja de diálogo “Open File” para la selección de archivos .dss.

5.2. Datos de lluvia medidos en estaciones pluviométricas convencionales

En la actualidad el Servicio Hidrológico del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos dispone de una Red Pluviométrica Especial Informativa para Situaciones Excepcionales, compuesta por más de 700 estaciones en todo el país en las cuales, a partir de que se decreta la Fase Informativa por el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil, se realizan mediciones manuales y transmisiones orales de datos hacia los Puestos de Dirección provinciales del INRH, cada ocho horas, cuatro horas o dos horas según la inminencia de la amenaza.

Para la recepción, almacenamiento, procesamiento y emisión de las observaciones de lluvia y la información generada, se cuenta con la aplicación en soporte MS-Access “Lluvia Informativa Horaria” a la que se le ha agregado una herramienta para la exportación de datos que posteriormente serán importados en un archivo de bases de datos de HEC-DSS, solución más práctica para la gestión de series cronológicas externas de variables hidrológicas en el sistema de modelación hidrológica HEC-HMS.

Similar a las aplicaciones para el procesamiento de las matrices de pronóstico y estimación numéricos de la lluvia, la aplicación para los datos de la red especial informativa para situaciones excepcionales presenta en su ventana principal una ficha para la entrada de datos, una para las consultas prediseñadas y una para los informes prediseñados.

Para la exportación de archivos con formato DSSUTL, acceder a la ficha “Consultas prediseñadas” y hacer clic en el botón “Definir período y provincias a consultar”, aparecerá el formulario “Criterios para consultas prediseñadas (Figura 5.16) donde se introducirán las fechas y horas de inicio y cierre del período a exportar (la selección de provincias en este formulario no es de utilidad para la exportación a DSSUTL). Por último hacer clic en el botón “Aceptar”.

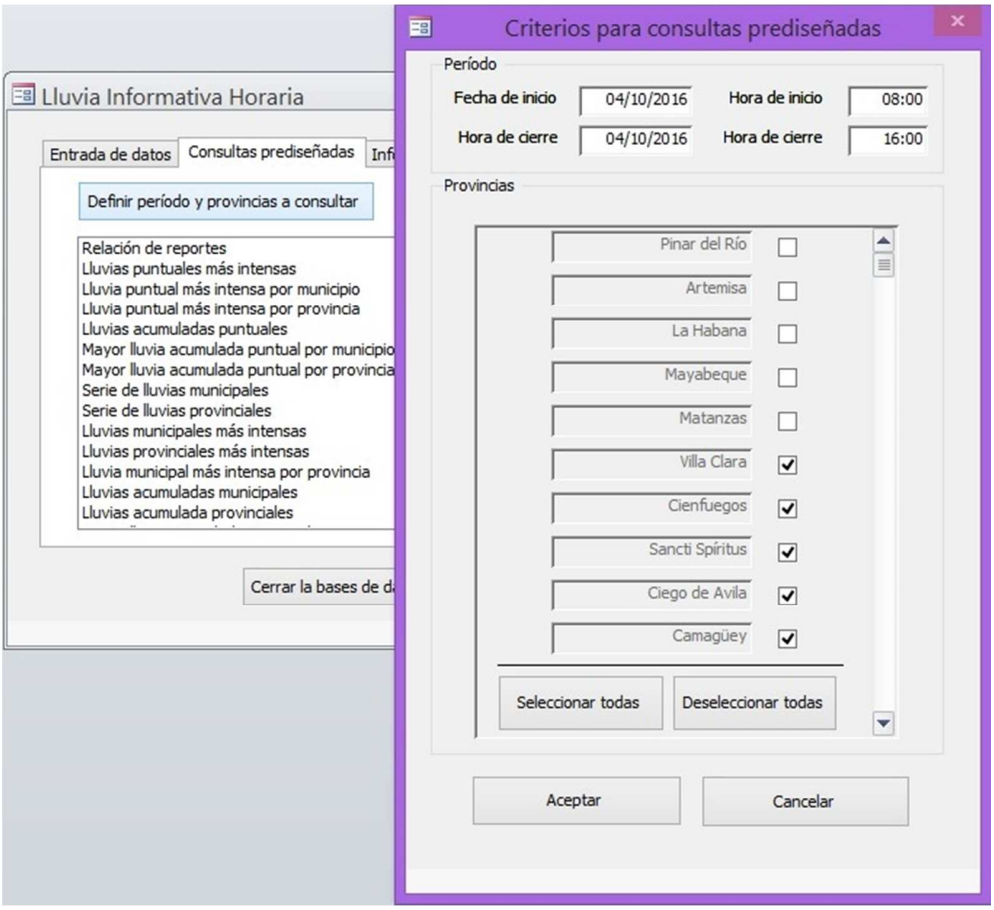


Figura 5.16. Criterios para consultas prediseñadas de la base de datos de la Red Pluviométrica Especial Informativa para Situaciones Excepcionales.

Una vez definido el intervalo de tiempo, hacer clic en el botón “Exportar DSSUTL”, aparecerá el formulario para seleccionar las estaciones específicas cuyas mediciones para el intervalo de tiempo antes definido serán exportadas (Figura 5.17), seleccionar las estaciones de interés (se han incorporado los botones “Seleccionar todas” y “Deseleccionar todas” para agilizar la selección), hacer clic en “Aceptar”.

Se cerrará automáticamente el formulario de selección de estaciones y aparecerá la caja de diálogo estándar de Windows para guardar archivos “Guardar archivo DSSUTL en…” (Figura 5.18), navegar hasta la carpeta donde se guardará el archivo (se recomienda “Archivos DSSUTL” del directorio de trabajo del sistema de modelación), teclear el nombre del archivo a guardar

agregando la extensión “.utl” o seleccionarlo de la lista (en caso de que ya exista), hacer clic en el botón “Aceptar”.

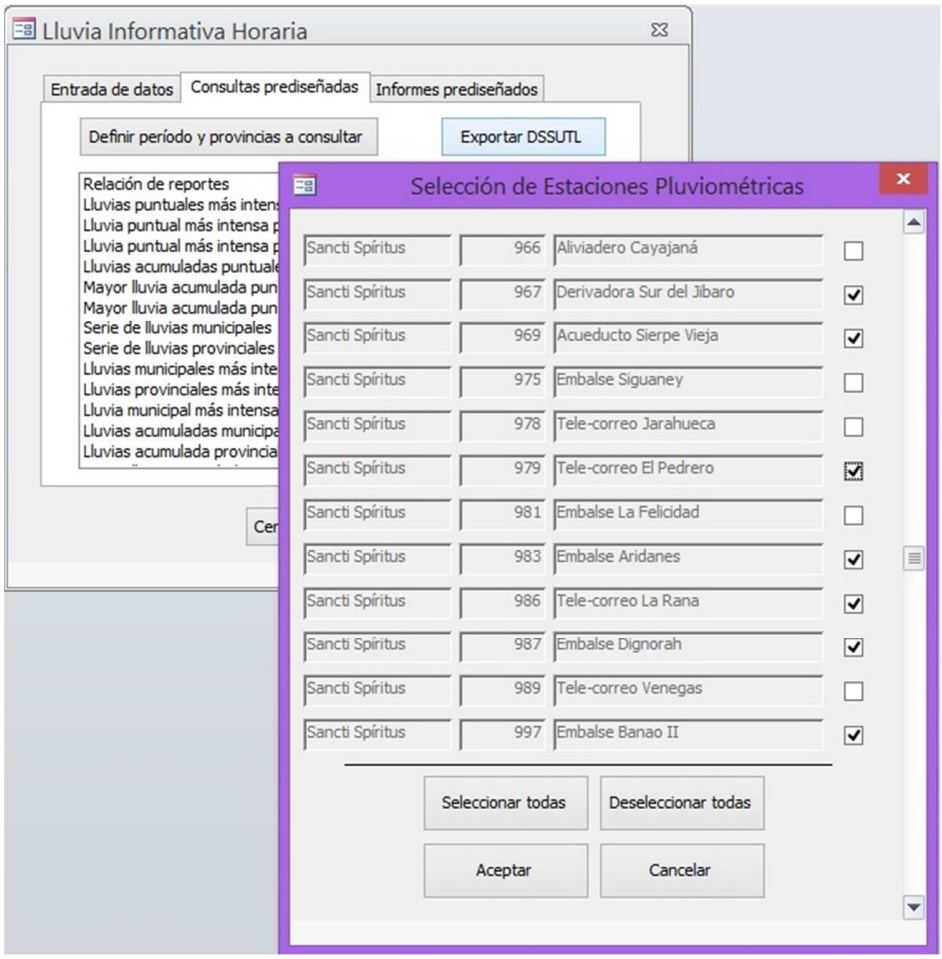


Figura 5.17. Formulario para la selección de estaciones para la exportación a DSSUTL

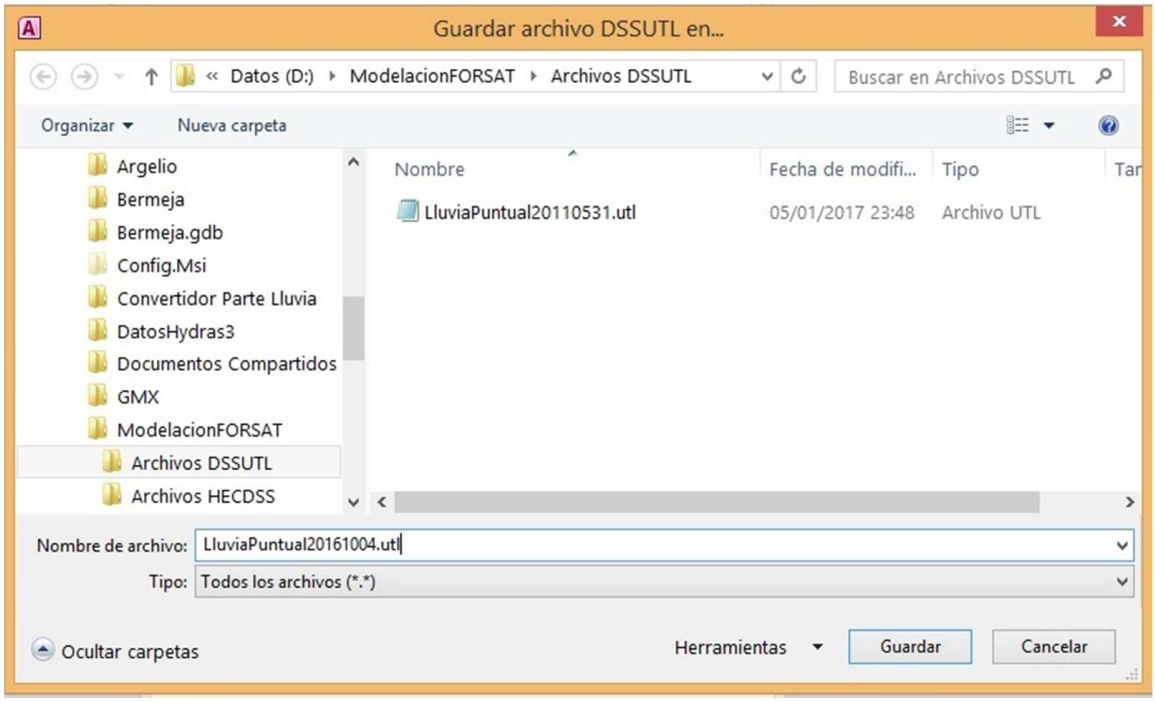


Figura 5.18. Caja de diálogo “Guardar archivo DSSUTL”

El archivo con formato DSSUTL exportado está listo para alimentar un archivo existente de base de datos con soporte HEC-DSS. En caso de que no se disponga de un archivo HEC-DSS, deberá crearse utilizando la aplicación HEC-DSSVue de la siguiente forma:

Ejecutar la aplicación HEC-DSSVue y desde el menú “File”, hacer clic en “New”. Cuando se abre la caja de diálogo “Create new HEC-DSS File” (Figura 5.19), seleccionar dónde se desea crear el archivo (se recomienda la carpeta “Archivos DSS” del directorio de trabajo del sistema de modelación) usando la lista “Buscar en” o iconos de archivo. Teclear un nombre para el nuevo archivo en el cuadro de texto “Nombre de archivo” y entonces hacer clic en el botón “Create”. Se creará un nuevo archivo de HEC-DSSVue en la ubicación seleccionada. Los datos pueden entonces ser añadidos usando las herramientas ubicadas bajo el menú “Data Entry”, copiados mediante los diferentes plug-ins disponibles, o copiados de otros archivos DSS.

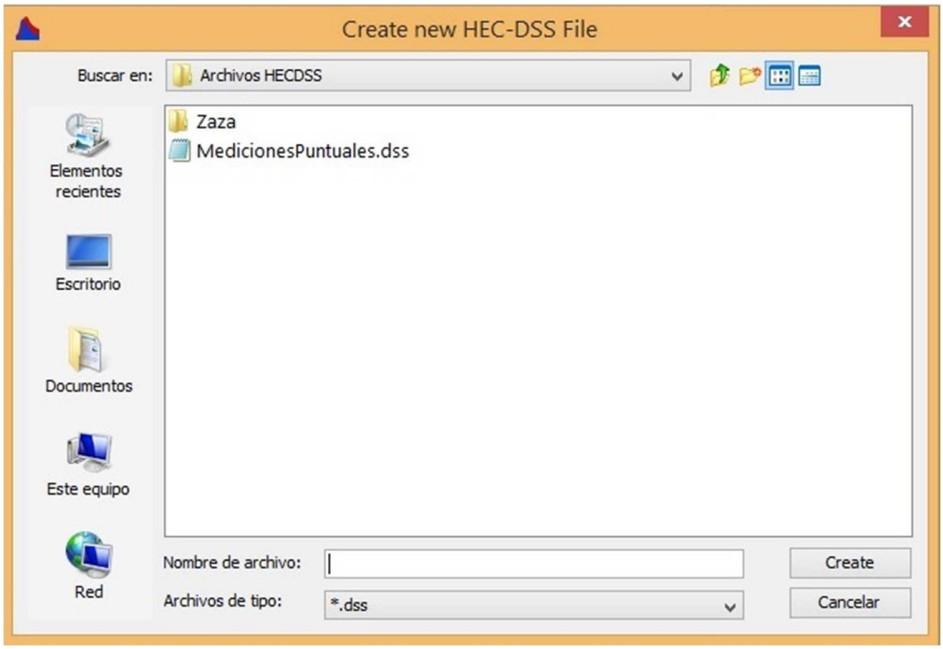


Figura 5.19. Caja de diálogo “Crear new DSS file”.

Cuando se dispone de un archivo DSS, con la aplicación DSSVue, primero deberá abrirse el mismo y luego se importarán los datos desde el archivo DSSUTL:

Desde el menú “File”, hacer clic en “Open”. Se mostrará el navegador “Open HEC-DSS File” (Figura 5.20).

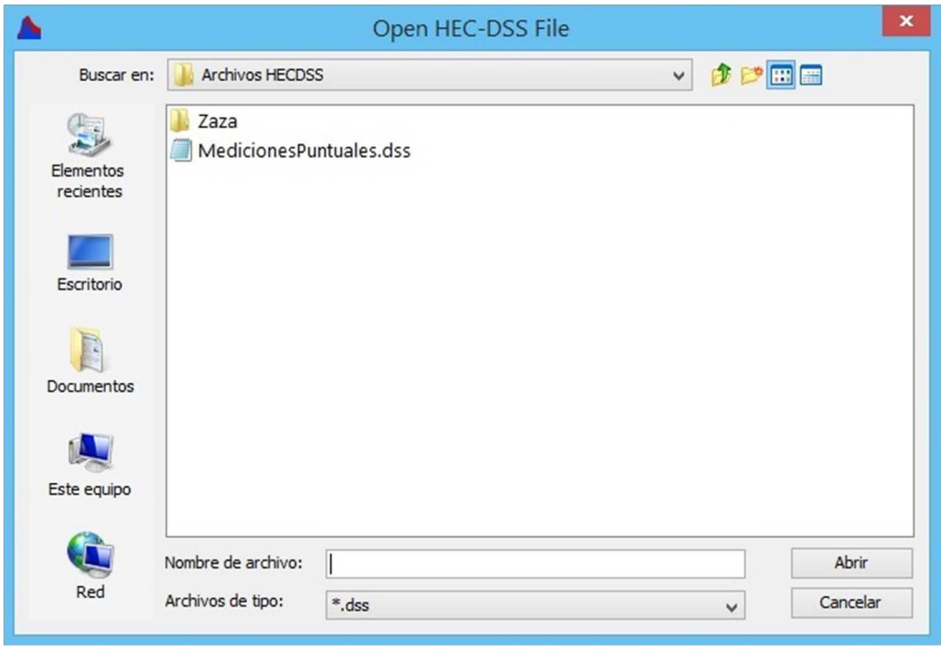


Figura 5.20. Navegador “Open HEC-DSS File”.

Desde el navegador, usar los controles estándar de Windows para navegar hasta el archivo HEC-DSS que se desea abrir, hacer clic en “Open”.

El nombre del archivo que seleccionó aparecerá en el cuadro de texto “File name” de la ventana principal de HEC-DSSVue (ver Figura 5.21) y los nombres de los registros contenidos en el archivo se mostrarán en el cuadro de lista de nombres-rutas HEC-DSS.

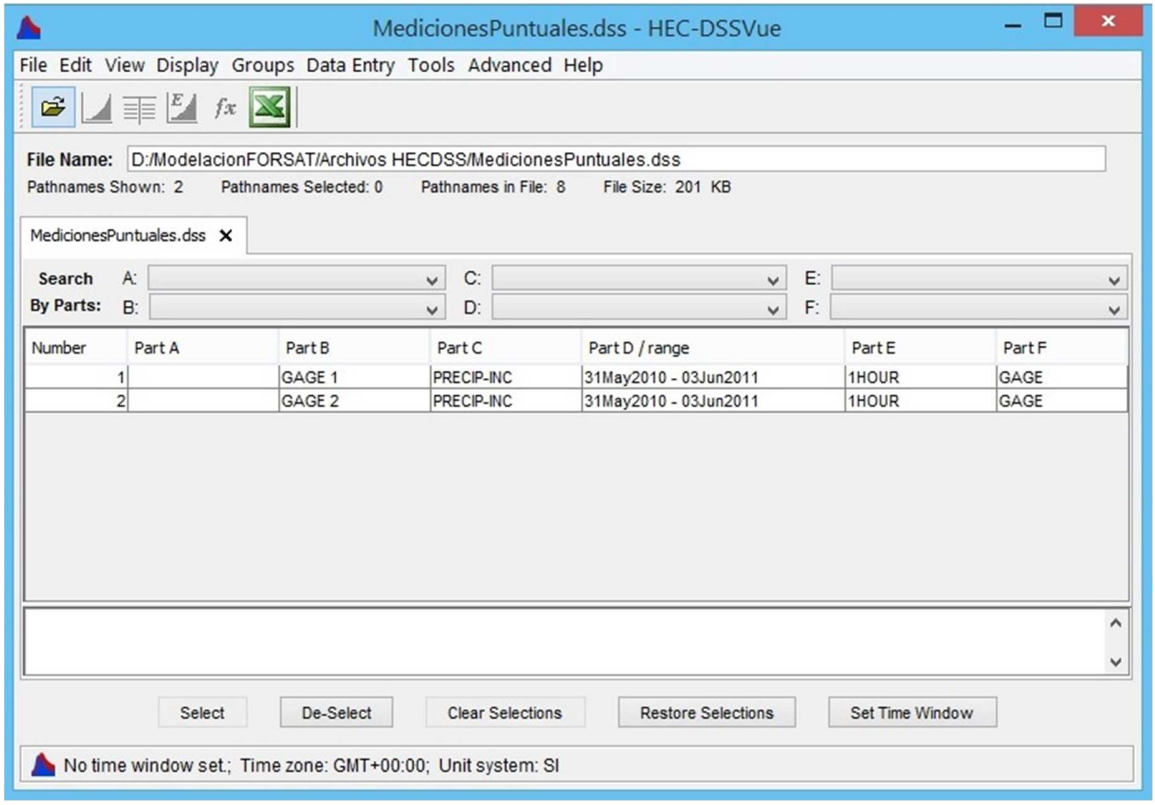


Figura 5.21. Ventana principal de HEC-DSSVue.

Desde el menú “Data entry” apuntar a “Import” y hacer clic en “Dssutl Write Data File”, se abrirá el navegador “Enter DSSUTL data file to import” (Figura 5.22), navegar hasta la ubicación del archivo .utl creado (se recomienda la carpeta “Archivos UTL” del directorio de trabajo del sistema de modelación), seleccionar el archivo y hacer clic en “

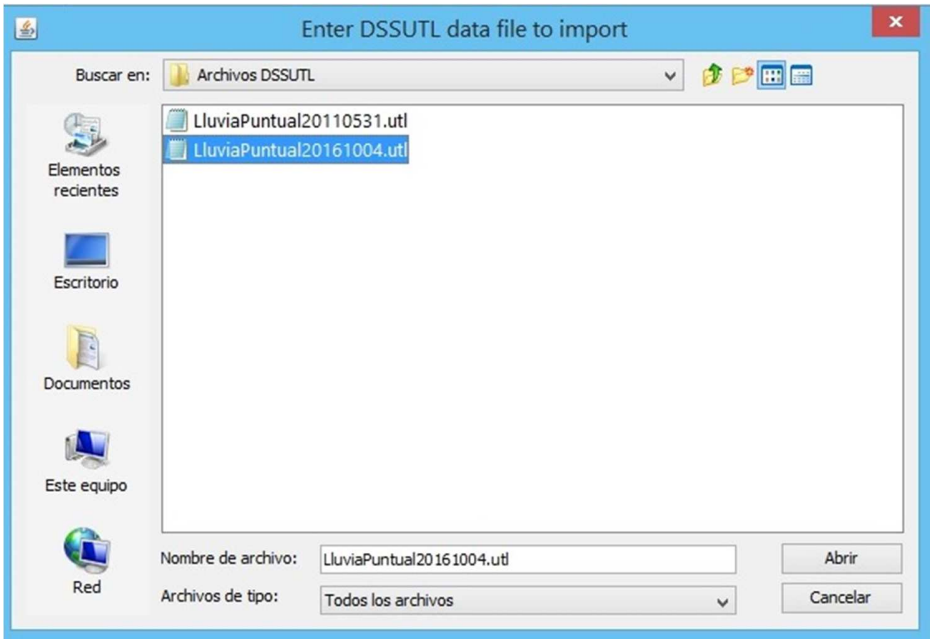


Figura 5.22. Seleccionar archivo DSSUTL para importar.

5.3. Datos de lluvia medidos en estaciones pluviométricas automáticas

De forma análoga a las herramientas desarrolladas para la gestión de los datos de las estaciones pluviométricas convencionales, se ha desarrollado una aplicación para la extracción de acumulados horarios de lluvia y valores instantáneos de nivel del agua, desde la base de datos DEMASDB, concebida para el almacenamiento de los datos generados por las estaciones hidrometeorológicas automáticas; y con ellos crear los archivos para DSSUTL. El resto del proceso es idéntico al de las estaciones convencionales.

5.4. Estimación de curvas Precipitación-Duración-Frecuencia regionales a partir de láminas de precipitación acumulada en 24 horas.

Aunque el sistema de predicción hidrológica propuesto está concebido para la simulación del proceso de transformación lluvia – escurrimiento a partir de eventos reales simples o, incluso, continuos de corta duración (algo más de 24 horas), en ocasiones será necesario el empleo del sistema para la simulación en base a lluvias sintéticas obtenidas mediante análisis estadísticos de datos de lluvia. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados, conocida como curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF).

Para la obtención de los valores de intensidad de lluvia necesarios para la confección de estas curvas se requiere de registros continuos de pares de lámina de lluvia y duración obtenidos principalmente mediante pluviómetros registradores. Sin embargo, en Cuba la información con que hoy se cuenta realmente de la variable precipitación, es la recolectada mediante pluviómetros

totalizadores para 24 horas, por lo que se propone la sustitución de las curvas IFD por curvas precipitación (lámina)-duración-frecuencia (PDF) mediante la metodología propuesta por Campos Aranda (1992), la cual se basa en siguientes ecuaciones:

$$P_T^{\ t} = (0{,}21LnT + 0{,}52)(0{,}54t^{0{,}25} - 0{,}50)P_{10}^{60} \quad \begin{cases} 2 \le T \le 100 \text{ años} \\ 5 \le t \le 120 \text{ min} \end{cases} \qquad (5.1)$$

Siendo:

$P_T^{\ t}$: precipitación de duración t min y período de retorno T; mm

P^{60}_{10}: precipitación de duración 60 min y período de retorno 10 años; mm

Luego, este mismo autor presenta la ecuación siguiente, que relaciona la precipitación de duración una hora y período de retorno 2 años:

$$P_T^t = (0{,}35LnT + 0{,}76)(0{,}54t^{0{,}25} - 0{,}50)P_2^{60} \quad \begin{cases} 2 \le T \le 100 \text{ años} \\ 5 \le t \le 120 \text{ min} \end{cases} \qquad (5.2)$$

Siendo:

P^{60}_{2}: precipitación de duración 60 min y período de retorno 2 años, mm

Estas ecuaciones están en función de láminas de pequeña duración, como es el caso de 60 minutos. Esto es un problema a resolver debido a que la información de la lluvia con que se cuenta generalmente es diaria, por lo que el comportamiento de la precipitación para una duración de una hora es improbable conocerla. Debido a esta dificultad se presentan varios criterios para seleccionar el cociente entre la precipitación en una hora y 24 horas, ambas de período de retorno 2 años. Su uso está en función de la información disponible, la que indicará cuál de ellos emplear.

Finalmente la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) para la obtención de las curvas PDF, es la siguiente:

- Seleccionar los períodos de retorno que tendrán las curvas.
- Calcular los valores representativos para la cuenca en estudio, de la lluvia máxima de 24 horas para los periodos de retorno de las curvas y para el de 2 años.
- Seleccionar el cociente entre la lluvia de 1 h y 2 años de período de retorno y la lluvia de 24 h, también de 2 años de período de retorno (P_{1hora} / $P_{24horas}$).
- Obtener las curvas PDF a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.2.
- Dibujar finalmente las curvas.

Resumiendo lo expuesto, Rodríguez (2011) propone realizar un análisis regional de las series de lluvias máximas diarias anuales obtenidas a partir de la información pluviométrica (ver Anexo I) y luego aplicar la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) para obtener curvas PDF regionales.

5.4.1. Obtención de las curvas PDF

Una vez definidas las estaciones pluviométricas representativas de la cuenca en general o de cada una de las subregiones en que se divide la cuenca como se muestra en el ejemplo del Anexo I, se procede a la obtención de las series regionales de precipitación en 24 horas máxima anual en base a promedios aritméticos de los valores puntuales de máximas diarias anuales.

Para determinar el coeficiente entre la lluvia de 1 hora y un día, para un período de retorno de dos años, se emplea el método propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (2011), que está en función del número de días con lluvia al año. Según el estudio de Trusov et al. (1983), el número promedio anual de días con lluvia para las diferentes regiones del país (occidental, central y oriental) está por encima de 50, por lo que el cociente entre la lluvia de 1 hora y un día para un período de retorno de dos años, en todos los casos puede considerarse como 0,5.

Empleando la metodología propuesta, se confeccionaron las curvas PDF de las cuatro subregiones, a partir de los resultados del análisis regional. En la figura 5.1 se muestran las curvas PDF, para período de retorno de 100 años (probabilidad de sobrepaso anual del 1 %), para las cuatro subregiones. En las tablas 5.1 a 5.4 se presentan en forma numérica y para cada subregión las curvas para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 1000 años. Las curvas PDF obtenidas a partir del análisis regional representan el comportamiento de las precipitaciones máximas diarias en la cuenca, donde los valores superiores se presentan en la zona más baja de la misma (en cuanto a cota topográfica).

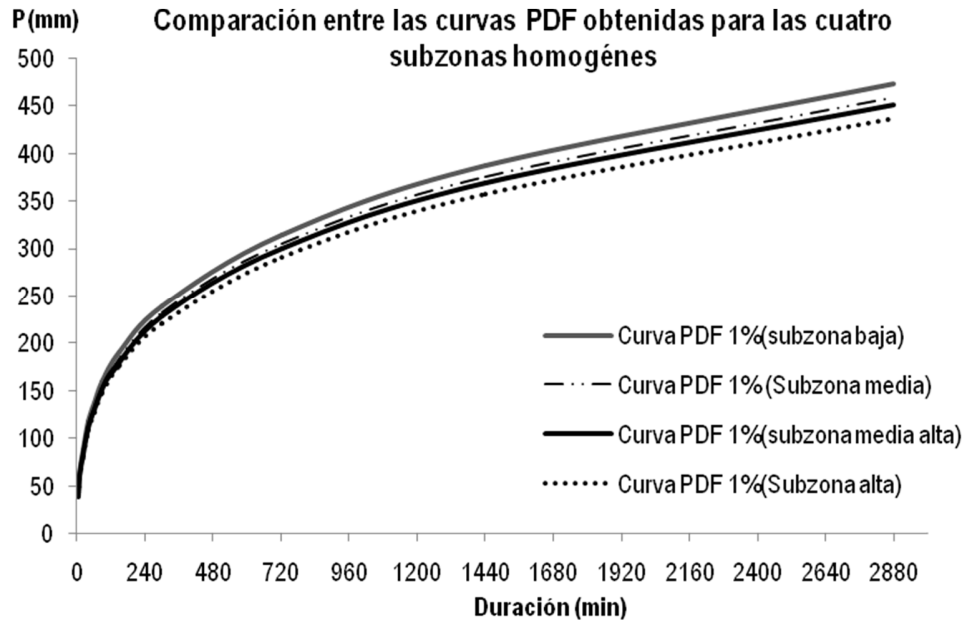


Figura 5.1: Curvas PDF para las cuatro subregiones, para período de retorno de 100 años (probabilidad de sobrepaso anual de 1%).

Tabla 5.1: Curvas PDF para la subregión baja

Duración (min)	Lámina de lluvia (mm) para período de retorno especificado						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	1000 años
5	17,8	23,5	27,8	33,5	37,8	42,1	56,5
10	26,7	35,2	41,6	50,2	56,6	63,1	84,5
20	37,2	49,1	58,1	70,0	79,0	88,0	117,9
40	49,7	65,6	77,6	93,5	105,5	117,6	157,5
60	58,1	76,7	90,7	109,3	123,4	137,4	184,1
90	67,4	88,9	105,2	126,8	143,1	159,4	213,6
150	80,5	106,3	125,7	151,5	171,0	190,4	255,2
300	101,2	133,6	158,1	190,5	214,9	239,4	320,8
720	133,1	175,6	207,8	250,4	282,6	314,8	421,7
1440	163,7	216,1	255,7	308,1	347,7	387,3	518,9
2880	200,2	264,2	312,6	376,7	425,1	473,5	634,5

Tabla 5.2: Curvas PDF para la subregión media

Duración (min)	Lámina de lluvia (mm) para período de retorno especificado						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	1000 años
5	17,3	22,8	27,0	32,5	36,7	40,8	54,7
10	25,8	34,1	40,4	48,6	54,9	61,1	81,9
20	36,0	47,6	56,3	67,8	76,5	85,3	114,2
40	48,2	63,6	75,2	90,7	102,3	114,0	152,7
60	56,3	74,3	87,9	106,0	119,6	133,2	178,5
90	65,3	86,2	102,0	122,9	138,7	154,5	207,0
150	72,3	95,4	112,9	136,0	153,5	171,0	229,1
300	98,1	129,5	153,2	184,6	208,3	232,1	310,9
720	129,0	170,2	201,4	242,7	273,9	305,1	408,8
1440	158,7	209,5	247,9	298,6	337,0	375,4	503,0
2880	194,0	256,1	303,0	365,1	412,1	459,0	615,0

Tabla 5.3: Curvas PDF para la subregión media-alta

Duración (min)	Lámina de lluvia (mm) para período de retorno especificado						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	1000 años
5	17,0	22,4	26,5	31,9	36,0	40,1	53,7
10	25,4	33,5	39,6	47,8	53,9	60,0	80,4
20	35,4	46,7	55,3	66,6	75,2	83,7	112,2
40	47,3	62,4	73,9	89,0	100,5	111,9	150,0
60	55,3	73,0	86,4	104,1	117,4	130,8	175,3
90	64,1	84,7	100,2	120,7	136,2	151,7	203,3
150	71,0	93,7	110,9	133,6	150,7	167,9	225,0
300	96,4	127,2	150,5	181,3	204,6	227,9	305,4
720	126,7	167,2	197,8	238,4	269,0	299,7	401,5
1440	155,9	205,7	243,4	293,3	331,0	368,7	494,0
2880	190,6	251,5	297,6	358,6	404,7	450,8	604,0

Tabla 5.4: Curvas PDF para la subregión alta

Duración (min)	Lámina de lluvia (mm) para período de retorno especificado						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	1000 años
5	16,4	21,7	25,7	30,9	34,9	38,9	52,1
10	24,6	32,5	38,5	46,3	52,3	58,2	78,0
20	34,3	45,3	53,6	64,6	72,9	81,2	108,8
40	45,9	60,6	71,7	86,4	97,5	108,6	145,5
60	53,6	70,8	83,8	100,9	113,9	126,9	170,0
90	62,2	82,1	97,2	117,1	132,1	147,2	197,2
150	74,3	98,1	116,1	139,9	157,9	175,9	235,6
300	93,5	123,4	146,0	175,9	198,5	221,1	296,2
720	122,9	162,2	191,9	231,2	261,0	290,7	389,5
1440	151,2	199,5	236,1	284,5	321,1	357,7	479,2
2880	184,9	244,0	288,7	347,8	392,6	437,3	585,9

6. Operación del sistema para la evaluación del peligro de inundaciones (contribución a las salidas del estudio de peligro de inundaciones por intensas lluvias de los estudios de PVR).

En la metodología existente para la determinación del peligro de inundaciones por intensas lluvias, a partir de la combinación de los mapas de distribución espacial de lluvias de diferentes probabilidades de ocurrencia y los de distribución espacial de indicadores del comportamiento de múltiples elementos condicionantes del escurrimiento (relieve, cobertura vegetal, agrupamiento del suelo, uso del terreno, etc.), se obtiene la distribución espacial de la susceptibilidad a la inundación o, mejor, de la respuesta hídrica en el territorio de estudio.

Con el objetivo de mejorar el alcance de la información de peligro resultante, se incorporará a estos estudios la aplicación de modelos simulación hidrológica e hidráulica automatizadas, tomando como base el proceso conocido como "estudio de frecuencias de crecidas". Este proceso dará como resultado: los caudales de escurrimiento (y/o volúmenes de avenida) generados por eventos de lluvia de diferentes probabilidades de sobrepaso anual (50 %, 20 %, 10 %, 4 %, 2 %, 1 % y 0,1 % años); y las cotas sobre el nivel medio del mar de la superficie del agua en la red fluvial, es decir, los tirantes en los principales tramos de corriente de la cuenca sumados a la cota de fondo del cauce (cota topográfica) obtenida del Modelo Digital de Elevación, a partir de las cuales se trazarán las planicies de inundación para caudales máximos de diferentes probabilidades.

Como regla general, las funciones de frecuencia de caudal máximo anual obtenidas a partir de análisis estadístico de largos registros de caudales máximos anuales, son las funciones de frecuencia más confiables. Sin embargo, se dispone de series largas de datos de caudales solo en unas pocas cuencas, a la vez que en muchas cuencas no se dispone de serie alguna. Aun cuando se disponga de una serie larga, las condiciones de la cuenca pueden haber cambiado dramáticamente debido a la urbanización u otros procesos no estacionarios, o puede que no hayan ocurrido grandes eventos durante el período de registros. Por tanto, una función precisa de frecuencia de caudales puede no obtenerse solamente de datos históricos. Un modelo de cuenca calibrado con eventos de precipitación de frecuencias conocidas es a menudo usado para desarrollar una función de frecuencia de caudales y comparar con otros estimados. La calibración del modelo se basa típicamente en eventos históricos disponibles de frecuencias similares.

Además, las funciones de frecuencia para condiciones actuales de desarrollo y con obras hidráulicas deben ser desarrolladas sin análisis estadístico. Los registros de aforos no existen para estas condiciones de régimen futuro alterado. Un método comúnmente usado para esto se basa en la aplicación de un modelo de cuenca, como el HEC-HMS con la hipótesis de la llamada tormenta de diseño. Pilgrim y Cordery (1975) describen esta hipótesis como sigue:

"En el enfoque normal de la estimación del caudal de diseño, la intención es estimar el caudal de una frecuencia seleccionada a partir de una lluvia de diseño de la misma frecuencia… La premisa básica (de este enfoque) es que si los valores medianos o promedio de todos los otros parámetros

se usan, la frecuencia de los caudales calculados debe ser aproximadamente igual a la frecuencia de la lluvia de diseño".

Par desarrollar una función de frecuencia de gastos con este procedimiento se siguen los siguientes pasos:

1. Desarrollar un modelo de lluvia-escurrimiento-transito que refleje las características de la cuenca y las corrientes para el caso de interés que corresponda: condiciones actuales de desarrollo y sin obras hidráulicas; condiciones actuales de desarrollo y con obras hidráulicas; condiciones futuras de desarrollo y sin obras hidráulicas; y condiciones futuras de desarrollo y con obras hidráulicas. El modelo de desarrollo actual sin obras debe ser calibrado con datos observados si están disponibles, o verificado usando ecuaciones regionales o estimaciones de caudales.

2. Recolectar datos de precipitación, realizar análisis estadístico y definir láminas de lluvia de frecuencia conocida para la cuenca. Los resultados del análisis estadístico pueden ser presentados como:

- una función Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)
- una función Precipitación (lámina)-Duración-Frecuencia (PDF)
- un lote de mapas isohiéticos
- un lote de ecuaciones que definen láminas para frecuencias y duraciones especificadas.

De estos, se pueden desarrollar directamente hietogramas de tormentas. Además, se podrá obtener una serie de lluvias máximas diarias anuales en función de la probabilidad de sobrepaso anual.

3. Para una frecuencia o probabilidad de sobrepaso anual (PSA) seleccionada, usar la información de IDF o de PDF para definir un hietograma de precipitación, entonces usar el modelo de lluvia-escurrimiento-tránsito para calcular el gasto pico, el nivel o el volumen. Asignar la probabilidad de sobrepaso anual de la precipitación al gasto pico, nivel o volumen obtenido, siguiendo la hipótesis de la tormenta de diseño antes descrita.

4. Repetir el proceso para un rango de eventos de frecuencia.

5. Agrupar los resultados para producir una función de frecuencia de escurrimientos completa.

6. Usar análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más importantes en caso de que se necesiten más ajustes de la curva de frecuencia.

7. Comparar estos resultados del modelo hidrológico de frecuencia de tormentas con otros métodos (ej. si se dispone, estadística de caudal y ecuaciones de regresión regionales) para determinar el mejor estimado de la curva de frecuencia de gastos para las condiciones de desarrollo actuales (con o sin obras hidráulicas).

Una vez obtenidos los caudales para diferentes probabilidades de sobrepaso anual en los cierres escogidos dentro de la cuenca, se pudieran realizar las correspondientes simulaciones hidráulicas para los tramos de río aguas abajo de los mismos con el fin de obtener las alturas sobre el lecho del río que alcanzaría el agua y con estas, y con el auxilio del modelo digital de elevación, obtener las franjas o llanuras de inundación. Para reforzar este proceso se puede definir un (o varios) valor umbral de altura por encima de la cota del terreno a partir del cual se generan daños considerables (ej: 1,20 m sobre el nivel del terreno) e identificar las zonas donde estos umbrales son sobrepasados por los niveles del agua obtenidos para cada una de las probabilidades.

Partiendo del concepto de peligro equivalente a probabilidad o frecuencia de ocurrencia, se identificarían los niveles de peligro (sin peligro, peligro bajo, peligro medio y peligro alto) en función de los valores de probabilidad de sobrepaso anual empleados para la definición de los patrones de lluvia y la obtención de los respectivos escurrimientos. En este sentido, la franja de inundación para el 50 % de probabilidad representa la zona que puede inundarse a partir de un valor de precipitación que es superado 50 veces en 100 años (una vez cada dos años) o muy frecuentemente, mientras que la franja de inundación para el 4 % de probabilidad representa la zona que se inunda con acumulados de precipitación que son superados una vez cada 25 años (poco frecuentemente).

El peligro alto pudiera, entonces, asociarse a las probabilidades mayores de 20 % (período de retorno menores de 5 años); el peligro medio pudiera enmarcarse entre las probabilidades de 20 % y 10 % (período de retorno entre 5 y 10 años); el peligro bajo para las probabilidades entre 10 % y 4 %; y sin peligro para las probabilidades menores de 4 %.

Para la aplicación práctica de las actividades antes descritas relacionadas con la obtención de las tormentas hipotéticas y los gastos máximos asociados o generados por dichas tormentas, se procedería como sigue:

a) Cálculo de las relaciones precipitación (lámina)–duración–frecuencia para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 1000 años.

Los resultados de la aplicación de la metodología propuesta por Campos Aranda (1992), para el cálculo de las láminas de precipitación para los períodos de retorno indicados y duración de hasta 48 horas, así como el proceso para obtener estas distribuciones de frecuencias, son los presentados en la sección 5.4 y el Anexo I.

b) Cálculo del gasto máximo a partir de tormentas hipotéticas.

El proceso de trabajo con el HEC-HMS para calcular el gasto máximo a partir de tormentas hipotéticas basadas en frecuencias requiere, de antemano, un modelo de la cuenca elaborado como se indicó en la sección anterior.

Hecho esto, corresponde entonces crear los modelos meteorológicos necesarios para calcular los gastos máximos a partir de tormentas hipotéticas basadas en frecuencias. Se deben crear siete modelos meteorológicos para cada una de las subregiones en que se divida la cuenca en estudio.

Los modelos corresponderán a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 1000 años. A continuación se describe como crear en HEC-HMS, el modelo meteorológico para un periodo de retorno de 50 años.

- Seleccionar “Meteorologic Model Manager” en el menú “Components”.
- En la ventana “Create a New Meteorologic Model” ingresar un nombre de modelo meteorológico y una descripción. El nombre del modelo, ej. Met0050Subregion1, esto significa que es el modelo meteorológico para la subregión 1 y un periodo de retorno de 50 años. La descripción es opcional, en ella se puede registrar información de interés, ej. Meteteorologico subregión 1 T 50 años.
- Hacer clic en la pestaña “Meteorologic Model”. En la ventana que se muestra definir el tipo de precipitación que se introduce al modelo seleccionando “Frequency Storm”.
- No hay datos de evapotranspiración (“Evapotranpiration”) ni de deshielo (“Snowmelt”), por tanto para ambos se acepta la opción “None”, el sistema de unidades también se acepta el métrico (“Metric”).
- En este panel, hacer clic en la pestaña “Basin”. En la columna “Include Subbasin” (incluir subcuencas) hacer clic y desplegar para seleccionar Yes.
- En el panel del Explorador de la cuenca, hacer clic en “Frequency Storm”. Introducir en esta ventana la información que a continuación se especifica:
  - Probability (Probabilidad de excedencia): 2 Percent.
  - Input Type (Tipo de entrada): puede seleccionarse duración parcial o duración anual.
  - Output Type (Tipo de salida): puede seleccionarse duración parcial o duración anual.
  - Intensity Duration (Duración de la intensidad): para este caso se coloca 5 min de duración de la intensidad máxima.
  - Storm Duration (Duración de la tormenta): para este caso se ha generado una tormenta de 48 horas.
  - Intensity Position (Posición de la intensidad de la intensidad máxima durante la tormenta): se puede elegir el 50 %.
  - Storm Area: (área de la tormenta): se utiliza para calcular automáticamente el factor de reducción de la lámina de precipitación en función del área. Si se consider que la tormenta cubre toda la cuenca, entonces se introducirá el área de la subregión. Si se deja en blanco cada subcuenca tendrá un hietograma diferente calculado usando el área de la subcuenca como área de la tormenta.

Ingresar los datos de altura de precipitación, para duraciones de 5 min, 10 min, 20 min, …, 2880 para un período de retorno de 50 años.

c) Especificaciones de Control.

En este caso el intervalo de tiempo que se simula es el mismo que el de la tormenta, solo que se considera que la precipitación que cae sobre la cuenca es de 2 % de probabilidad, por tanto las especificaciones de control son las mismas y ya fueron importadas al comienzo de esta sección.

d). Crear simulación.

Para crear el protocolo de simulación, se ejecuta la orden “Create Compute” / “Simulation Run” del menú “Compute”.

Al ejecutar la orden se despliegan una tras otra las cuatro ventanas presentadas en la sección 4.5 donde se selecciona la combinación de los componentes a simular.

7. Operación del sistema en tiempo real (proceso de predicción hidrológica).

Durante el proceso de operación en tiempo real del sistema se realizarán dos actividades simultáneas: (1) simular el escurrimiento que producirá en la cuenca la lluvia caída en las 24 horas comprendidas entre el instante fecha-hora actual + 48 horas y el instante fecha-hora actual + 72 horas; y (2) simular el escurrimiento que producirá en la cuenca la lluvia caída en las 24 horas comprendidas entre el instante fecha-hora actual - 24 horas y el instante fecha-hora actual. Para el primer caso se empleará la predicción cuantitativa de la precipitación y se realizarán corridas cada seis horas, mientras que para el segundo se empleará la estimación cuantitativa de precipitación y las observaciones de lluvia en estaciones pluviométricas de superficie, sean convencionales o automáticas; y las corridas pudieran realizarse hasta cada dos horas si la situación hidrometeorológica así lo exige.

Para el caso (1) se procede de la siguiente forma:

- Recopilar de rejillas de predicción cuantitativa de precipitación para el período comprendido entre fecha-hora actual + 48 horas y fecha-hora actual + 72 horas. Por ejemplo, si la simulación se realiza el día cuatro de junio de 2018 a las 08:00 horas, entonces se recopilan las rejillas de predicción cuantitativa de la precipitación para el período 06/06/2018 08:00 – 07/06/2018 08:00. Para ello, se procederá como se indica en el epígrafe 5.1.1.
  - Acceder al buzón FTP donde se depositan las matrices de pronóstico numérico de la lluvia.
  - Acceder al subdirectorio “PronosticoNumLluvia” del directorio principal del sistema “ModelacionFORSAT”.
  - Ejecutar la aplicación “LluviaPronosticada.accdb”.
  - Realizar el proceso de importación de matrices de datos de lluvia desde el buzón FTP hacia la base de datos.
- Obtener la lluvia acumulada en 24 horas para la cuenca de estudio mediante la consulta o mediante el informe “Lluvia acumulada por cuenca fluvial” como se indica en 5.1.1.b o en 5.1.1.d.
  - Definir período a consultar.
  - Ejecutar la consulta “Lluvia acumulada por cuenca fluvial”.
  - Anote el valor de lluvia correspondiente a la cuenca que se evalúa.
- Identificar a qué período de retorno, frecuencia, o probabilidad de ocurrencia corresponde la lluvia acumulada en 24 horas obtenida.

- Acceder a la tabla o al gráfico con las curvas Probabilidad-Duración-Frecuencia obtenidas como se describe en el epígrafe 5.4.
- Comparar la lluvia acumulada pronosticada con los valores de lluvia para las distintas probabilidades y duración igual a 1440 minutos (24 horas) de las curvas PDF.
- Seleccionar la probabilidad cuya lluvia para 24 horas está más próxima al acumulado pronosticado.

- Del estudio de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo de la cuenca, obtener el mapa de peligro de inundación para la probabilidad de lluvia identificada en el paso anterior. Este mapa de peligro constituye la salida preliminar de predicción de inundación para el período "fecha-hora actual + 48 horas" – "fecha-hora actual + 72 horas". La misma está sustentada por la premisa de que la frecuencia de los caudales calculados debe ser aproximadamente igual a la frecuencia de la lluvia de diseño si se usan los valores medianos o promedio de todos los otros parámetros.
- Exportar la lluvia pronosticada con formato de rejilla ASCII (.asc) para ArcInfo, como se detalla en el epígrafe 5.1.1.c.
- Cerrar la aplicación "LluviaPronosticada.accdb".
- Importar las rejillas de lluvia pronosticada en HEC-DSS como se detalla en el epígrafe 5.1.2.
  - Ejecutar la aplicación HEC-Gridutil.
  - Abrir el proyecto o cuenca de GridUtil correspondiente
  - Importar las rejillas una cada vez (menú "Single Grid/Import/ArcInfo ASCII")
  - Cerrar la aplicación HEC-GridUtil
- Realizar la simulación
  - Ejecutar la aplicación HEC-HMS
  - Abrir el proyecto o modelo correspondiente
  - Actualizar (definir el inicio y el fin de la corrida de simulación que se pretende realizar) las especificaciones de control existentes para corridas de simulación con modelo meteorológico basado en rejillas de lluvia pronosticada. Para ello, seleccionar las especificaciones de control en el explorador de la cuenca y modificar los valores en la ventana del editor de componentes.
  - Seleccionar la ficha "Compute" del explorador de la cuenca.
  - Seleccionar la carpeta "Simulation Runs". Se desplegaran las corridas de simulación creadas (ver figura 7.1).
  - Hacer clic en la corrida de simulación correspondiente ("Lluvia pronosticada"). Se abrirá el editor de componentes para esta simulación. Cambiar la descripción de forma tal que se ajuste, por ejemplo, a las nuevas condiciones de control.
  - Hacer clic derecho sobre el nombre de la corrida de simulación en el explorador de la cuenca y seleccionar la opción "Compute" en el menú contextual que se mostrará. Aparecerá una ventana mostrando el progreso de la simulación. Una vez terminada, cerrar la ventana.

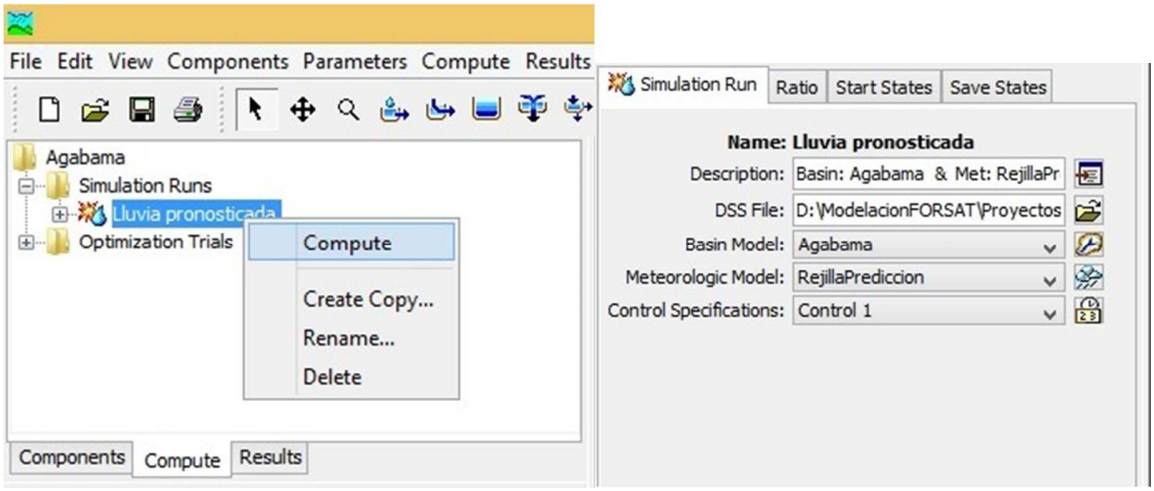
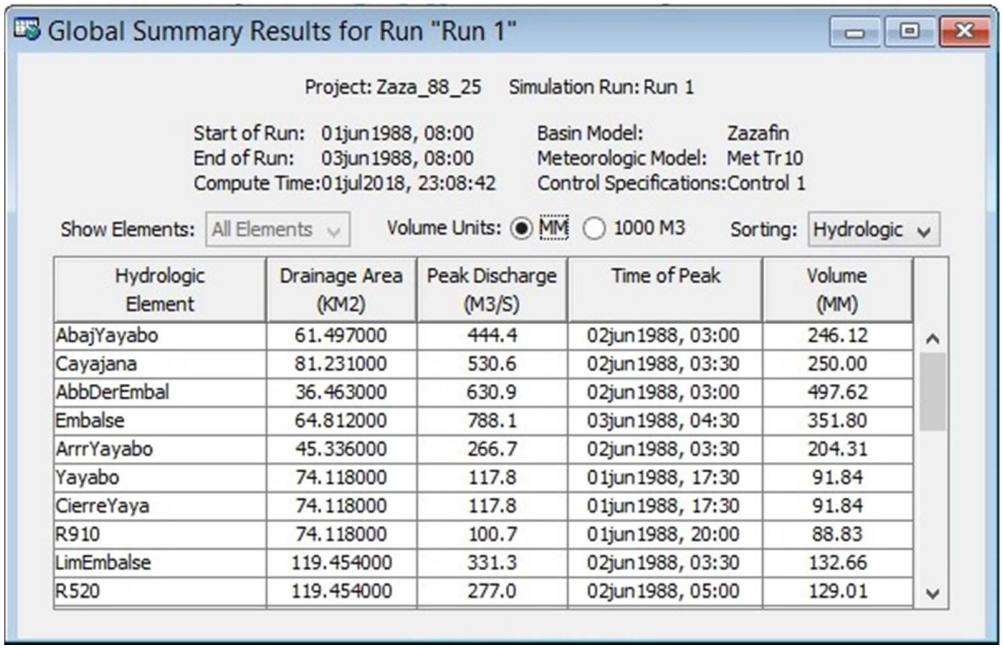


Figura 7.1: Selección y ejecución de una corrida de simulación

- Mostrar y analizar los resultados. Una vez terminada la corrida de la simulación, se activarán en la barra de herramientas cuatro botones para mostrar diferentes tipos y escalas de resultados.
  - Seleccionar la herramienta "Global Summary Table" para ver un resumen de los resultados de caudal pico para todos los elementos en el modelo de cuenca. Podrá imprimir la tabla o anotar el caudal pico para los elementos que desee.



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
AbajYayabo	61.497000	444.4	02jun1988, 03:00	246.12
Cayajana	81.231000	530.6	02jun1988, 03:30	250.00
AbbDerEmbal	36.463000	630.9	02jun1988, 03:00	497.62
Embalse	64.812000	788.1	03jun1988, 04:30	351.80
ArrrYayabo	45.336000	266.7	02jun1988, 03:30	204.31
Yayabo	74.118000	117.8	01jun1988, 17:30	91.84
CierreYaya	74.118000	117.8	01jun1988, 17:30	91.84
R910	74.118000	100.7	01jun1988, 20:00	88.83
LimEmbalse	119.454000	331.3	02jun1988, 03:30	132.66
R520	119.454000	277.0	02jun1988, 05:00	129.01

Figura 7.2: Ventana "Global Summary Table"

  - Para ver resultados gráficos o tabulares de un determinado elemento del modelo, seleccionar el elemento en el explorador de cuenca y luego seleccionar en la barra de

herramientas “View Graph for Selected Element(s)” o “View Summary Table for Selected Element(s)”.

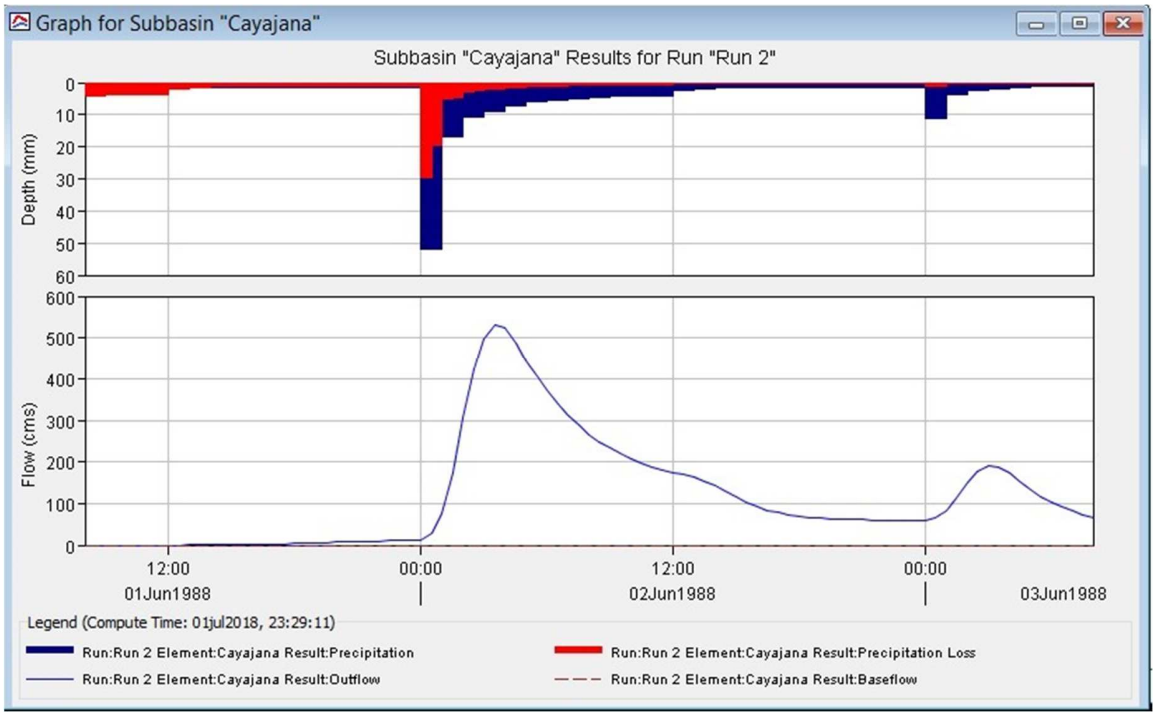


Figura 7.3: Ventana “Graph for Selected Element(s)”

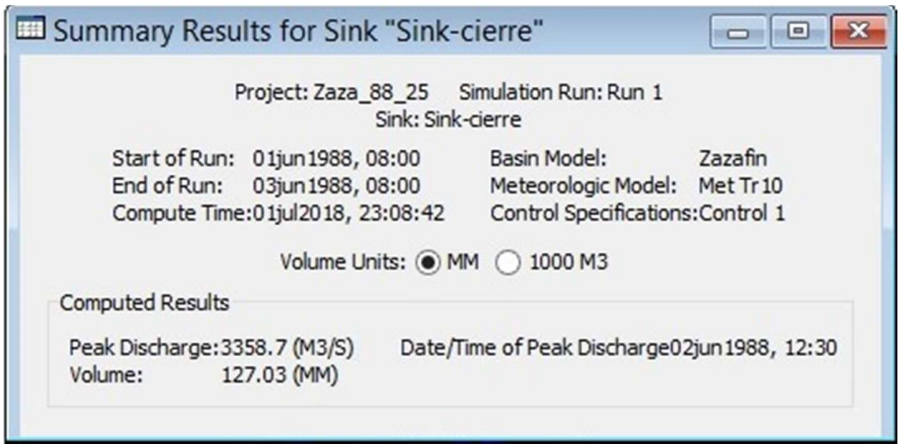


Figura 7.4: Ventana “Summary Table for Selected Element(s)”

- Seleccionar en la barra de herramientas “View Time-Series Table for Selected Element(s)” para obtener la serie cronológica de la corrida para el elemento seleccionado.

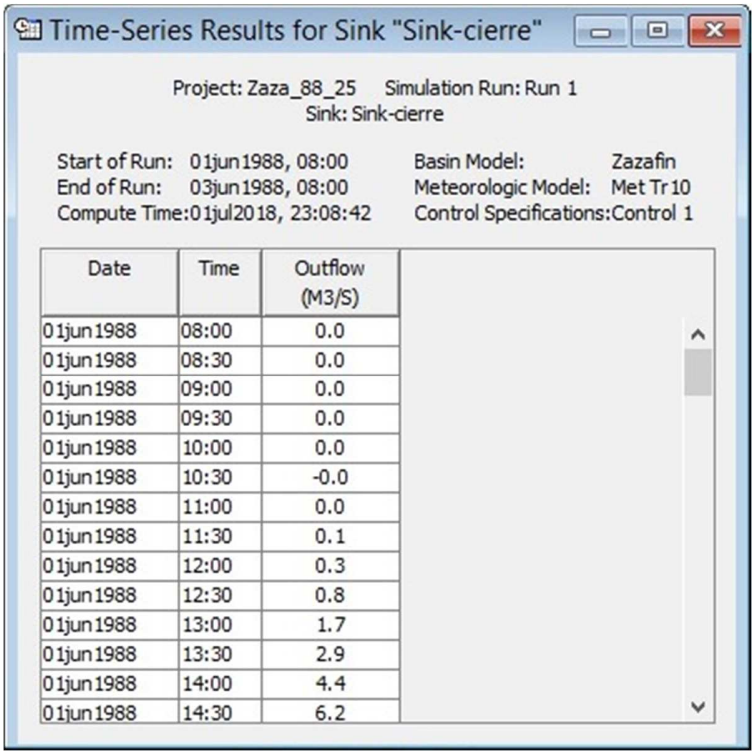


Figura 7.5: Ventana “Time-Series Table for Selected Element(s)”

- Definir la llanura de inundación. Se puede lograr por varias vías entre las que se encuentran:
  - la modelación hidráulica mediante las aplicaciones informáticas HEC-RAS y HEC-GeoRAS, empleando como datos de entrada los resultados de la modelación hidrológica mediante HEC-HMS.
  - Cálculo “semiautomatizado” de tirantes (altura del agua) y ancho superficial, utilizando libros de Excel previamente elaborados conteniendo curvas tabuladas de Tirante – Ancho Superficial – Gasto para las secciones de interés definidas en el modelo hidrológico. Una vez obtenidos los anchos superficiales, estos pueden ser mapificados e interconectados hasta generar la llanura de inundación con la ayuda de un modelo digital de elevación.
  - Imágenes satelitales o mapas de inundación catalogados para diferentes caudales o probabilidades de ocurrencia.

Para el caso (2) con estimación cuantitativa de la lluvia, se procede de forma muy similar a la del caso (1):

- Recopilar de rejillas de estimación cuantitativa de precipitación para el período comprendido entre fecha-hora actual - 24 horas y fecha-hora actual. Por ejemplo, si la simulación se realiza el día cuatro de junio de 2018 a las 08:00 horas, entonces se recopilan las rejillas de predicción cuantitativa de la precipitación para el período 03/06/2018 08:00 – 04/06/2018 08:00. Para ello, se procederá como se indica en el epígrafe 5.1.1.
  - Acceder al buzón FTP donde se depositan las matrices de estimación numérica de la lluvia.

- Acceder al subdirectorio “EstimacionNumLluvia” del directorio principal del sistema “ModelacionFORSAT”.
- Ejecutar la aplicación “LluviaEstimada.accdb”.
- Realizar el proceso de importación de matrices de datos de lluvia desde el buzón FTP hacia la base de datos.

- Obtener la lluvia acumulada en 24 horas para la cuenca de estudio mediante la consulta o mediante el informe “Lluvia acumulada por cuenca fluvial” como se indica en 5.1.1.b o en 5.1.1.d.
- Identificar a qué período de retorno, frecuencia, o probabilidad de ocurrencia corresponde la lluvia acumulada en 24 horas obtenida.
- Del estudio de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo de la cuenca, obtener el mapa de peligro de inundación para la probabilidad de lluvia identificada en el paso anterior. Este mapa de peligro constituye la salida preliminar de predicción de inundación para el período “fecha-hora actual” – “fecha-hora actual + 24 horas”.
- Exportar la lluvia estimada con formato de rejilla ASCII (.asc) para ArcInfo, como se detalla en el epígrafe 5.1.1.c.
- Cerrar la aplicación “LluviaEstimada.accdb”.
- Importar las rejillas de lluvia estimada en HEC-DSS como se detalla en el epígrafe 5.1.2.
- Realizar la simulación
  - Ejecutar la aplicación HEC-HMS
  - Abrir el proyecto o modelo correspondiente
  - Actualizar (definir el inicio y el fin de la corrida de simulación que se pretende realizar) las especificaciones de control existentes para corridas de simulación con modelo meteorológico basado en rejillas de lluvia estimada.
  - Seleccionar la ficha “Compute” del explorador de la cuenca.
  - Seleccionar la carpeta “Simulation Runs”. Se desplegaran las corridas de simulación creadas (ver figura 7.1).
  - Hacer clic en la corrida de simulación correspondiente (“Lluvia estimada”). Se abrirá el editor de componentes para esta simulación. Cambiar la descripción de forma tal que se ajuste, por ejemplo, a las nuevas condiciones de control.
  - Hacer clic derecho sobre el nombre de la corrida de simulación en el explorador de la cuenca y seleccionar la opción “Compute” en el menú contextual que se mostrará. Aparecerá una ventana mostrando el progreso de la simulación. Una vez terminada, cerrar la ventana.
- Mostrar y analizar los resultados.
- Definir la llanura de inundación.

Para el caso (2) con datos de lluvia medidos en estaciones pluviométricas de superficie, se procede como sigue:

- Recopilar los datos de lluvia medidos para el período comprendido entre fecha-hora actual – T (24, 8, 4 o 2 horas) y fecha-hora actual. Para ello, se procederá como se indica en los epígrafes 5.2 y 5.3.
  - Ejecutar la aplicación "LluviaInformativaHoraria.mdb".
  - Realizar el proceso de introducción manual o de importación de datos de lluvia puntual.
- Obtener la lluvia acumulada en 24 horas para la cuenca de estudio mediante la consulta o mediante el informe "Lluvia acumulada por cuenca fluvial".
- Identificar a qué período de retorno, frecuencia, o probabilidad de ocurrencia corresponde la lluvia acumulada en 24 horas obtenida.
- Del estudio de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo de la cuenca, obtener el mapa de peligro de inundación para la probabilidad de lluvia identificada en el paso anterior. Este mapa de peligro constituye la salida preliminar de predicción de inundación para el período "fecha-hora actual" – "fecha-hora actual + 24 horas".
- Exportar la lluvia medida con formato DSSUTL, como se detalla en el epígrafe 5.2.
- Cerrar la aplicación "LluviaInformativaHoraia.mdb".
- Importar el archivo de lluvia medida en HEC-DSS como se detalla en el epígrafe 5.2.
  - Ejecutar la aplicación HEC-DSSVue
  - Abrir el archivo DSS correspondiente (menú "File/Open")
  - Importar el archivo (menú Data Entry/Import/Dssutl Write Data File")
- Realizar la simulación
  - Ejecutar la aplicación HEC-HMS
  - Abrir el proyecto o modelo correspondiente
  - Actualizar (definir el inicio y el fin de la corrida de simulación que se pretende realizar) las especificaciones de control existentes para corridas de simulación con modelo meteorológico basado en estaciones pluviométricas ("Automaticos" y "Convencionales").
  - Seleccionar la ficha "Compute" del explorador de la cuenca.
  - Seleccionar la carpeta "Simulation Runs". Se desplegaran las corridas de simulación creadas (ver figura 7.1).
  - Hacer clic en la corrida de simulación correspondiente ("PluviometrosAutomaticos" o "PluviometrosConvencionales"). Se abrirá el editor de componentes para esta simulación. Cambiar la descripción de forma tal que se ajuste, por ejemplo, a las nuevas condiciones de control.
  - Hacer clic derecho sobre el nombre de la corrida de simulación en el explorador de la cuenca y seleccionar la opción "Compute" en el menú contextual que se mostrará. Aparecerá una ventana mostrando el progreso de la simulación. Una vez terminada, cerrar la ventana.
- Mostrar y analizar los resultados.
- Definir la llanura de inundación.

8. Referencias y bibliografía

1. Arias Lastre, P. P. (2015). "Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos." Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE.
2. Campos Aranda, D. F. (1992). "Procesos del Ciclo Hidrológico". Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 2da reimpresión. 524pp.
3. Carreras Flores, L. (2013). "Metodología para la modelación distribuida con el software HEC-HMS." Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE.
4. Organización Meteorológica Mundial (2011). "Guía de Prácticas Hidrológicas": Vol. II- Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas, OMM-No. 168. Ginebra, Suiza.
5. Pilgrim, D. H., y Cordery, I. (1975). "Rainfall Temporal Patterns for Design Floods." Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 101 (HY1), 81 – 85.
6. Rodríguez López, Y. (2009). "Simulación hidrológica de eventos extremos máximos. Estudio de caso: cuenca del río Zaza". Tesis en opción al título de Máster en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones Hidráulicas., Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. La Habana, Cuba.107pp.
7. Rodríguez López, Y. (2011). "Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza." Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior politécnico José Antonio Echevarría, CUJAE.
8. Trusov, I. I., Izquierdo, A. y Díaz, L. R. (1983). "Características espaciales y temporales de las precipitaciones atmosféricas en Cuba". Editora de la Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Editorial Academia.
9. USACE (2000). HEC-HMS Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
10. USACE (2009). HEC-DSSVueUser's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
11. USACE (2010). HEC-RAS River Analysis System Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
12. USACE (2010). HEC-RAS River Analysis System Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
13. USACE (2010). HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
14. USACE (2011). HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
15. USACE (2011). Grid Utility Program HEC-GridUtil User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
16. USACE (2013). HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
17. USACE (2015). HEC-HMS Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
18. USACE (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Anexo I. Análisis regional de las series de lluvias máximas diarias anuales. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza.

Para el estudio de las lluvias máximas es necesario el uso de herramientas estadísticas que permitan el análisis de los datos disponibles en una zona, logrando homogenizar dicha información y obteniendo conclusiones a partir de esta.

En los últimos tiempos ha tomado un gran auge el uso del análisis regional, el cual se basa en el análisis de las series de máximos anuales de las estaciones que se encuentran en una región, la que puede considerarse como homogénea, en función de las características estadísticas de las series de máximos anuales tanto de lluvias diarias como de caudales instantáneos. El análisis regional tiene las siguientes ventajas:

- Sus resultados son aplicables a localidades no instrumentadas (que no tienen medición).
- Sus resultados son más confiables que los del análisis local cuando las longitudes de las series son menores que 25 datos.
- Puede sustituir los registros cortos de observaciones con una distribución amplia en el espacio de equipos de medición.
- Aumenta la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones que componen una región.
- Permite tratar el problema de la superposición de dos poblaciones distintas en el conjunto de lluvias, las cuales pueden estar causadas por diferentes mecanismos de precipitación: lluvias convectivas, orográficas o ciclónicas, permitiendo reunir bases de datos con orígenes distintos.
- Los parámetros de una distribución, por ejemplo el de forma, no varían mucho a través de un área específica o región.

El análisis regional cumple con las etapas siguientes:

1. Análisis y filtrado de los datos primarios de observaciones.
2. Selección de los equipos para el análisis regional.
3. Identificación de los equipos que conforman regiones homogéneas.
4. Selección de la distribución regional de frecuencia.
5. Estimación de los cuantiles regionales de frecuencia.

Las técnicas para el análisis regional hidrológico pueden emplearse de manera complementaria y son las siguientes:

- Técnica de las estaciones-año.
- Técnica de correlación y regresión múltiple.
- Método de Dalrymple, 1960.
- Aplicación Regional de la transformación de Box-Cox.
- Método de los momentos estandarizados de probabilidad ponderada.
- Método de estimación multivariada de valores extremos.

Como ya se planteó anteriormente una de las etapas del análisis regional es la selección de los equipos a emplear en el estudio, la cual determina a partir de la calidad, longitud y ubicación de las estaciones, cuáles de ellas deben tenerse en cuenta en el análisis. En el caso de las series de precipitación, se deben considerar los criterios que se enuncian a continuación:

Criterio 1. Longitud de la serie a utilizar (N).

Las series empleadas en el análisis regional serán las series de máximos diarios anuales (SMA), de las cuales se plantea que, el límite mínimo de longitud del registro a utilizar será de 10 años.

Se obtienen la cantidad mínima de valores que genera una media aritmética de la serie que sea representativa o estable. Para ello, se grafica el número de años de observación con el valor de la media para la cantidad de años observados, o sea, la media se recalcula cada vez que se considera una observación correspondiente a un nuevo año. En la figura I.1 se muestra un ejemplo de cómo quedaría el gráfico para una serie de lluvias máximas diarias anuales, estableciéndose el valor mínimo de observaciones en 13, donde se alcanza una mayor estabilidad en el valor de la media.

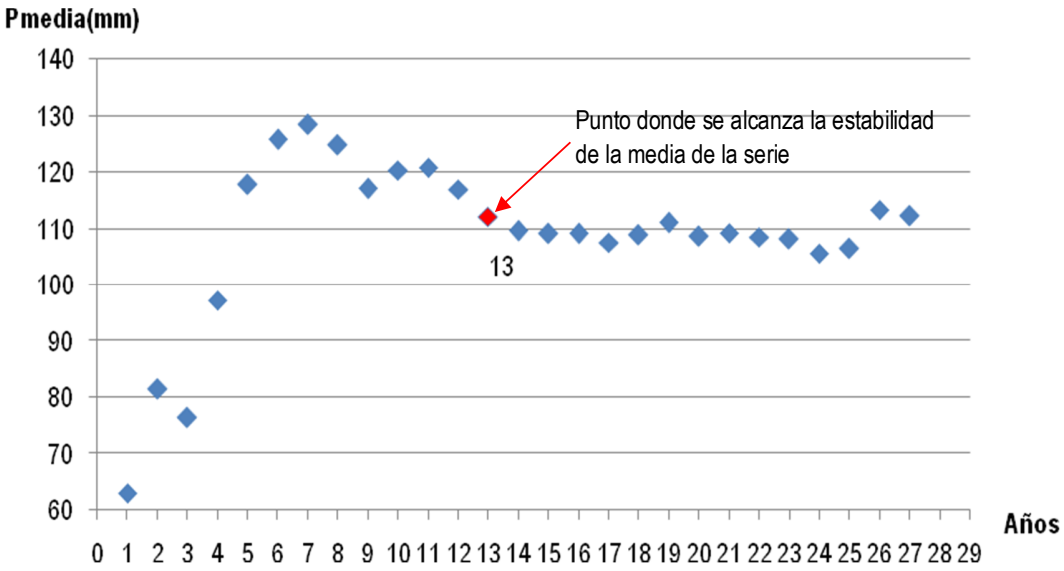


Figura I.1: Ejemplo del método gráfico aplicado a una serie de lluvias máximas diarias anuales para determinar el mínimo número de años de registros necesarios para obtener una mayor estabilidad en la media de la serie.

Criterio 2. Calidad de la serie de máximos anuales.

Para que los resultados de los análisis probabilísticos sean teóricamente válidos, la serie de datos históricos debe satisfacer ciertos criterios estadísticos: aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad. La aleatoriedad significa que las fluctuaciones de la variable son originadas por causas naturales; la independencia se refiere a que ningún dato de la serie está influenciado por valores anteriores, o que él no influye en los posteriores; la homogeneidad implica que los datos proceden de una misma población y, finalmente, la estacionalidad significa que las propiedades estadísticas de los datos no cambian en el tiempo.

Criterio 3. Influencia de los equipos en la zona de estudio.

Es importante determinar la influencia de los equipos en la zona de estudio. Se recomienda aplicar algún método para determinar si los equipos ubicados a distancias cortas, fuera del parte aguas de la cuenca, tienen influencia o no en el área de estudio. El método de los polígonos de Thiessen (aunque es recomendable aplicarlo en regiones relativamente llanas, donde el efecto de la topografía no incide en el comportamiento de las precipitaciones) es el más utilizado para este propósito.

La información de lluvia con que se contaba para el estudio, eran datos diarios de lluvia correspondientes a 70 equipos ubicados en las provincias Villa Clara y Sancti Spíritus, recogiendo datos de precipitaciones del periodo contenido entre los años 1923 al 2007 (figura I.2).

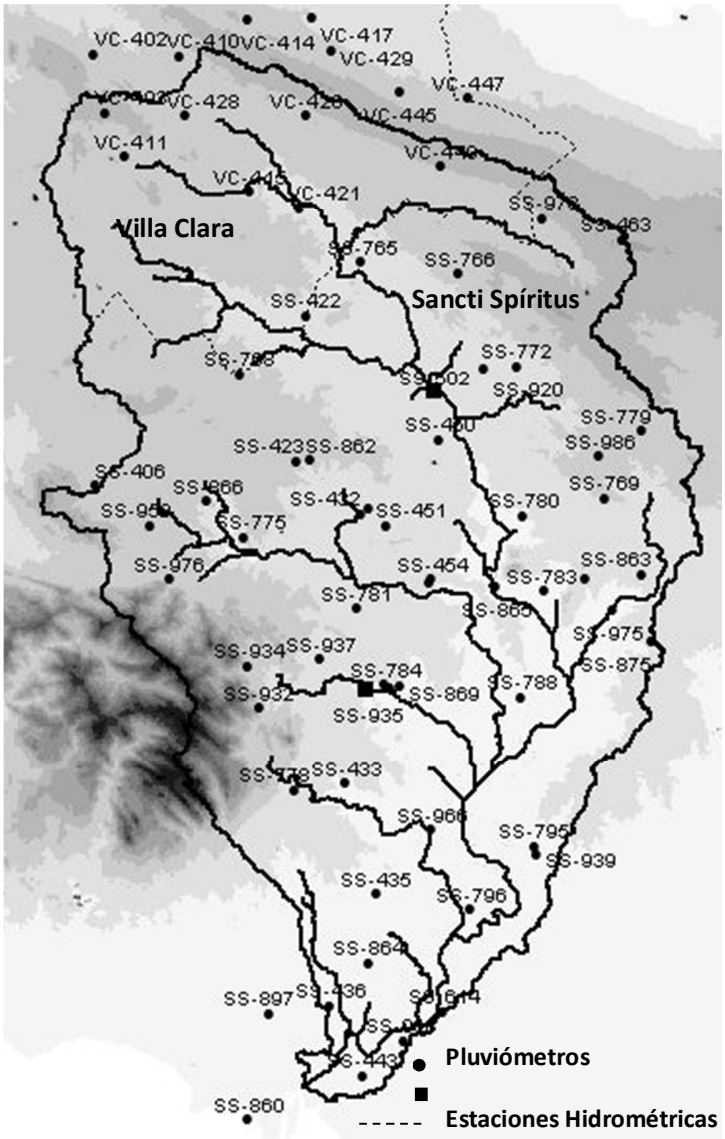


Figura I.2: Ubicación de los pluviómetros disponibles para el estudio y de las estaciones hidrométricas.

Como se planteó anteriormente, las series de máximos anuales deben ser independientes, aleatorias y homogéneas, requisitos indispensables para proceder con un modelado estadístico o probabilístico; es por ello que se realizó un examen a cada una de las 70 series correspondientes a cada equipo, luego de emplear la trasformada Johnson, con el objetivo de normalizar dichas series y poder aplicar tanto las pruebas paramétricas como no paramétricas. El resultado del análisis de homogeneidad de todas las series se muestra en la tabla I.1.

Analizando los resultados de la tabla I.1 se puede concluir que las series de las estaciones SS-454, SS-463 y SS-869 son homogéneas de acuerdo con tres pruebas de las seis examinadas y los equipos SS-865 y VC-449 sólo son homogéneas por dos de las pruebas. El resto de las estaciones

en la mayoría de las pruebas dan homogéneas por lo que se puede considerar que sus valores pertenecen a una misma población.

Tabla I.1. Resultados de las pruebas estadísticas de homogeneidad para cada una de las series de máximos anuales.

Equipo	F	T	C	Spearman	Hel.	S
SS-406	H	H	H	Hay PLP	NH	H
SS-422	H	H	H	Hay PLP	H	H
SS-423	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-432	H	H	H	No hay PLP		H
SS-433	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-435	NH	H	H	No hay PLP	NH	H
SS-436	NH	H	H	No hay PLP	NH	H
SS-443	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-450	NH	H	H	No hay PLP		NH
SS-451	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-454	NH	H	H	Hay PLP	NH	H
SS-463	H	NH	H	Hay PLP	NH	H
SS-502	NH	H	H	Hay PLP	H	H
SS-614	NH	H	H	No hay PLP	NH	H
SS-765	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-766	NH	H	H	Hay PLP	H	H
SS-768	H	H	H	No hay PLP		H
SS-769	H	H	H	No hay PLP	NH	H
SS-772	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-775	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-778	H	H	H	Hay PLP	NH	H
SS-779	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-780	H	H	H	No hay PLP		H
SS-781	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-783	H	H	H	No hay PLP		H
SS-784	H	H	H	No hay PLP		H
SS-788	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-795	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-796	NH	H	H	No hay PLP		H
SS-844	NH	H	H	No hay PLP		NH
SS-862	NH	H	H	Hay PLP	H	H
SS-863	NH	H	H	No hay PLP		H
SS-864	NH	H	H	No hay PLP		H
SS-865	NH	H	H	Hay PLP		NH

Equipo	F	T	C	Spearman	Hel.	S
SS-867	H	H	H	No hay PLP		H
SS-868	H	NH	H	No Hay PLP	NH	H
SS-869	NH	H	H	No Hay PLP	NH	NH
SS-875	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-897	H	NH	H	No hay PLP	H	H
SS-918	NH	H	H	No hay PLP	NH	H
SS-919	H	H	H	No hay PLP		H
SS-920	H	H	H	No hay PLP		H
SS-932	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-934	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-935	H	H	H	No hay PLP		H
SS-936	H	H	H	No hay PLP		H
SS-937	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-939	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-953	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-954	NH	H	H	No hay PLP	H	H
SS-966	NH	H	H	No hay PLP		NH
SS-975	H	H	H	No hay PLP	H	NH
SS-976	H	H	H	No hay PLP	NH	NH
SS-978	H	H	H	No hay PLP	H	H
SS-986	H	H	H	No hay PLP	H	H
VC-402	H	H	H	No hay PLP	NH	H
VC-403	H	H	H	No hay PLP	H	H
VC-410	NH	H	H	No hay PLP		H
VC-411	H	H	NH	No hay PLP	NH	H
VC-414	H	H	H	No hay PLP		H
VC-415	NH	H	H	No hay PLP	NH	H
VC-417	H	H	H	No hay PLP		H
VC-420	H	H	H	No hay PLP	H	H
VC-421	H	H	NH	No hay PLP		H
VC-428	H	H	H	No hay PLP	H	H
VC-429	H	H	H	No hay PLP	H	H
VC-445	NH	H	H	No hay PLP	H	H
VC-447	NH	H	H	No hay PLP		H

Equipo	F	T	C	Spearman	Hel.	S
SS-866	NH	H	H	No hay PLP	H	H

Equipo	F	T	C	Spearman	Hel.	S
VC-449	NH	H	H	Hay PLP	NH	NH

Nota: Las tres pruebas paramétricas utilizadas son: F: Fisher, T: T de Student, C: Cramer y las tres pruebas no paramétricas: Spearman, Hel: Helmer, S: Secuencias. Las siglas de los resultados son: H: Homogénea, NH: No homogénea, PLP: Persistencia a largo Plazo. Los espacios en blanco en la prueba de Helmer indican que para la serie empleada, el número de cambios es mayor que el de secuencias y el software no está programado para diferencias negativas entre el número de secuencias y el de cambios.

Tomando en que la falta de homogeneidad no implica, necesariamente, la imposibilidad de procesar por vía estadística los datos, sino una restricción del volumen de información, pues hay que seleccionar una subserie (preferencialmente, la más antigua u original) dentro de la muestra total, estas cinco series mencionadas en el párrafo anterior, fueron examinadas nuevamente eliminando de cada una los valores registrados a partir del año 1993 (se tomó este criterio debido a que a partir de este año las observaciones registradas no son muy confiables, según se plantea por parte de los funcionarios del INRH). De este análisis se obtuvo como resultado que en las cuatro primeras estaciones todas las pruebas de homogeneidad dan que las series son homogéneas (en ninguno de los casos la serie se redujo a menos de 10 valores), mientras que en la última estación los test de Spearman y las Secuencias siguen dando que la serie no es homogénea, pero no se desecha porque da homogénea por las pruebas paramétricas Fisher y T de Student, test que son muy significativos.

En cuanto a los resultados del coeficiente de autocorrelación serial de primer orden, sus valores oscilan entre -0,459 y 0,487, valores que dan un poco elevados, pero debido a la naturaleza del fenómeno que se analiza, este resultado no tiene importancia, ya que la lluvia diaria máxima de un año no tiene relación en absoluto, con la registrada el año siguiente, por lo que las series pueden considerarse independientes y aleatorias.

Como primera decisión para la conformación de las subregiones, se eliminan los equipos que tienen 10 o menos valores, en este caso se encuentran los equipos SS-953 y SS-954. Para el caso del segundo criterio, las series de lluvias máximas diarias anuales, de los 70 equipos analizados en el estudio, alcanzan la estabilidad de la media en el intervalo de 8 a 14 valores, por lo que el valor límite de 10 corresponde con el valor inferior de la media del intervalo.

Luego de eliminar los dos equipos de las 70 estaciones, se procedió a conformar las subregiones, contando con la información de los 68 pluviómetros, mediante el empleo del SIG, ArcMap v.10.2, obteniendo mapas donde se representa el comportamiento de la lluvia media (esta variables es determinada a parir de las series de lluvias máximas diarias anuales de los pluviómetros), y la altura correspondiente a cada equipo.

En la figura I.3 se muestra la representación del comportamiento en el SIG, de los valores de la lluvia máxima media anual, combinada con las alturas correspondientes a cada equipo,

obteniendo como resultado cuatro regiones bien definidas, donde cada gama de color representa la división de la cuenca en zonas para el análisis regional.

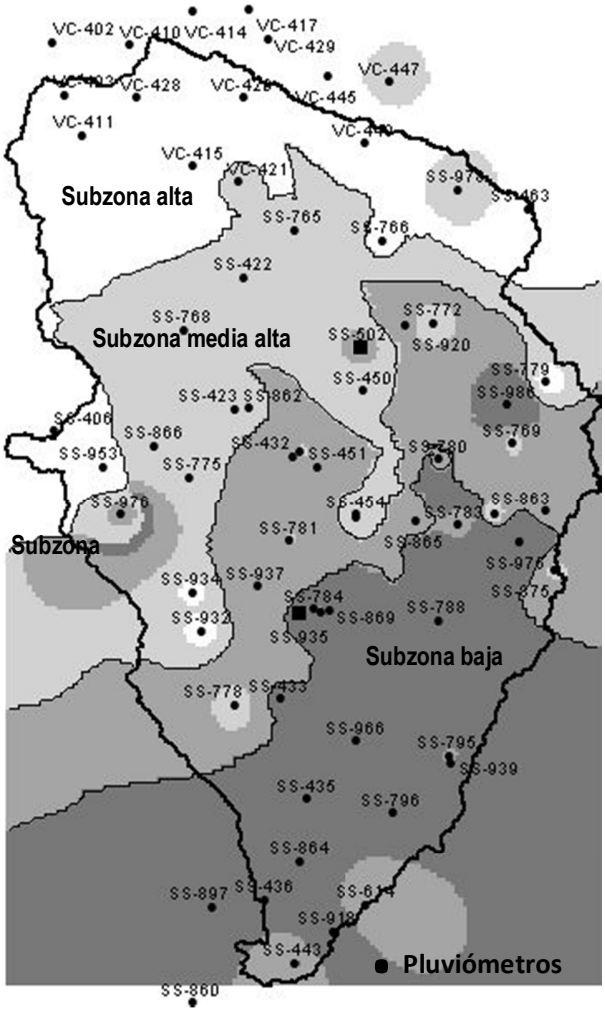


Figura I.3: Representación de las zonas en las cuales se divide la cuenca para el análisis regional.

La tabla I.2 relaciona los equipos que forman cada subregión para el estudio del análisis regional de las series de máximos anuales en la cuenca Zaza.

Tabla I.2. Relación de los equipos que conforman cada subregión.

N	Baja	Media	Media alta	Alta
1	SS-433	SS-432	SS-422	SS-766
2	SS-435	SS-451	SS-423	SS-953
3	SS-436	SS-502	SS-450	SS-406
4	SS-614	SS-769	SS-454	SS-463
5	SS-784	SS-772	SS-765	SS-978
6	SS-788	SS-778	SS-768	VC-402
7	SS-795	SS-780	SS-775	VC-403

N	Baja	Media	Media alta	Alta
8	SS-796	SS-781	SS-779	VC-410
9	SS-860	SS-783	SS-862	VC-411
10	SS-864	SS-863	SS-866	VC-414
11	SS-869	SS-865	SS-868	VC-415
12	SS-897	SS-867	SS-932	VC-417
13	SS-918	SS-875	SS-934	VC-420
14	SS-935	SS-919	SS-976	VC-428
15	SS-936	SS-920	VC-421	VC-429
16	SS-939	SS-937		VC-445
17	SS-966	SS-986		VC-447
18	SS-443			VC-449
19	SS-975			

Para apoyar el análisis de los equipos correspondientes a cada subzona se empleó la técnica de la zona estadísticamente homogénea (ZEH), empleando como parámetros la media de cada subzona. Un ejemplo del resultado de esta prueba se muestra en la figura I.4 para la subzona baja.

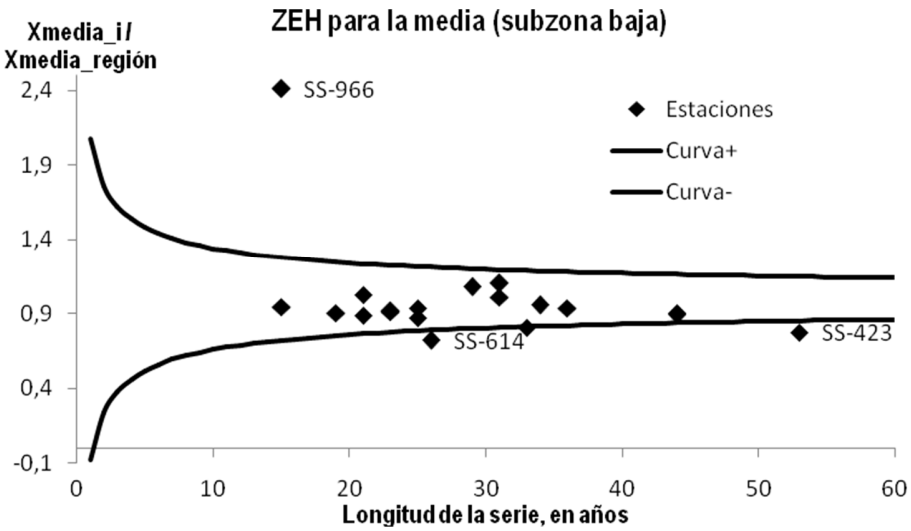


Figura I.4: Zona estadísticamente homogénea para la subregión baja, según la media.

Al aplicar el método del Índice de Avenida, con la ayuda del programa Xtest, a las estaciones contenidas en cada una de las regiones, se tiene como resultado que las cuatro subregiones son homogéneas. Los detalles de estos resultados se pueden observar en la tabla I.3.

Tabla I.3. Resumen del resultados del análisis regional para las 4 subregiones delimitadas.

Sub-zona	Nº inicial equipos	Nº final equipos	Valor de H	Criterios para la eliminación de equipos de la subregión

Sub-zona	Nº inicial equipos	Nº final equipos	Valor de H	Criterios para la eliminación de equipos de la subregión
Baja	19	16	0,55	Equipos anómalos (SS-939 y SS-966) y equipos que se comportan similar a otra subregión (SS-614)
Media	17	16	0,79	Equipos que se comportan similar a otra subregión (SS-502)
Media alta	15	11	1,00	Equipos anómalos (SS-775), un equipo cerca del límite de la región (VC-421) y equipos que empeoran el valor de H (SS-768, SS-765)
Alta	18	15	0,83	Equipos cerca y fuera del parte aguas de la cuenca (VC-403, VC-445 y VC-402)