

CAPÍTULO I. ELEMENTOS DEL OBJETO DEL CONOCIMIENTO

1.1 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1 TÍTULO DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

“ESTIMACION DEL NÚMERO DE CURVA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR CON EL PROGRAMA DE APLICACIÓN ArcGIS”

1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO

La Provincia Cercado, se encuentra situada en el corazón del departamento de Tarija, este se encuentra ubicado en el continente sudamericano, entre los paralelos 21° 00´ y 22° 50´ de latitud sur y los meridianos 62° 15´ y 65° 20´ de longitud Oeste de la Línea de Greendwich. Limita internacionalmente con la República Argentina al Sud y al Este con la República del Paraguay, al Oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí, y al Norte con el departamento de Chuquisaca.

Con una superficie de 37.623 km², cubre el 3,42% del territorio nacional, con características geográficas variadas y relieves que van desde los 4.000 msnm hasta los 300 msnm, que determinan la variabilidad de su clima frio y seco en la zona alta, templado y temporalmente húmedo en los valles sub andinos y cálido seco y cálido húmedo en la llanura chaqueña, y sus características fisiográficas, se divide en cuatro grandes unidades: el altiplano tarijeño, Los valles interandinos, el Valle Central donde se encuentra la provincia Cercado, y el Chaco Tarijeño.

Por el norte limita con las cuencas de afluentes al río Pilaya, al sur con la cuenca del río Tolomosa, al este con la cuenca del río Santa Ana y al oeste con la cuenca de río Tomayapo. La parte más baja tiene una altura de 1.800 msnm y la parte más alta, ubicada en la Cordillera de Sama, tiene 4.344 msnm.

En el siguiente cuadro se detalla la ubicación geográfica de los dos espacios de ubicación de los componentes del proyecto en coordenadas geográficas y puntos UTM¹.

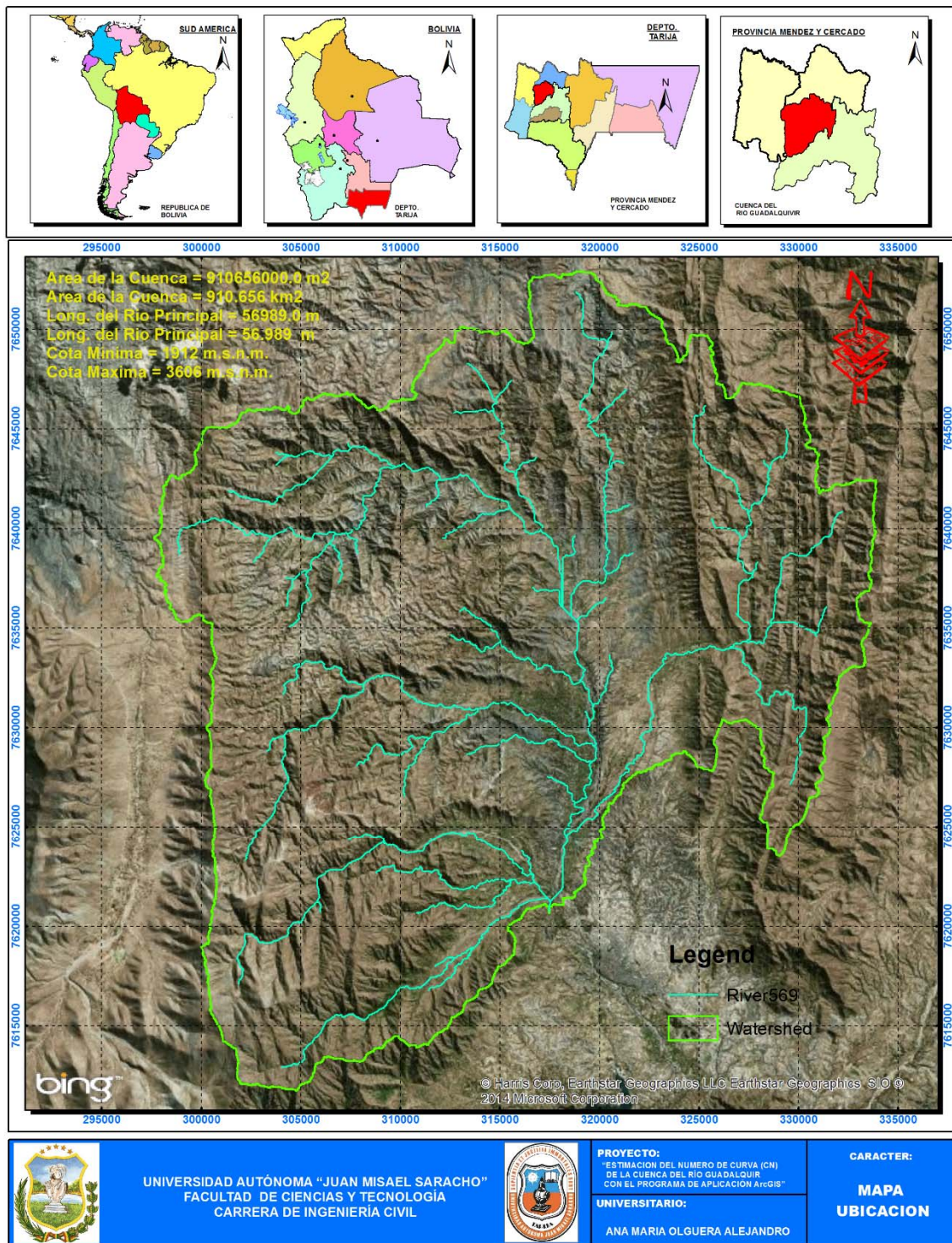
¹ *Coordenadas UTM, universal transversal de Mercator*

Tabla 1.1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO

Ubicación componte	Coordenadas UTM		Coordenadas geográficas	
	Este (X)	Norte (Y)	Latitud S	Longitud W
Ubicación del punto de control (PTE. OBRAJES)	317418,14	7620678,51	21°30'26,22"	64°45'45,42"
Cuadrante de la Cuenca del rio Guadalquivir	295000,00	7650000,00	21°14'24,32"	64°58'31,40"
	335000,00	7615000,00	21°33'36,98"	64°35'36,59"

Fuente: Imagen satelital.

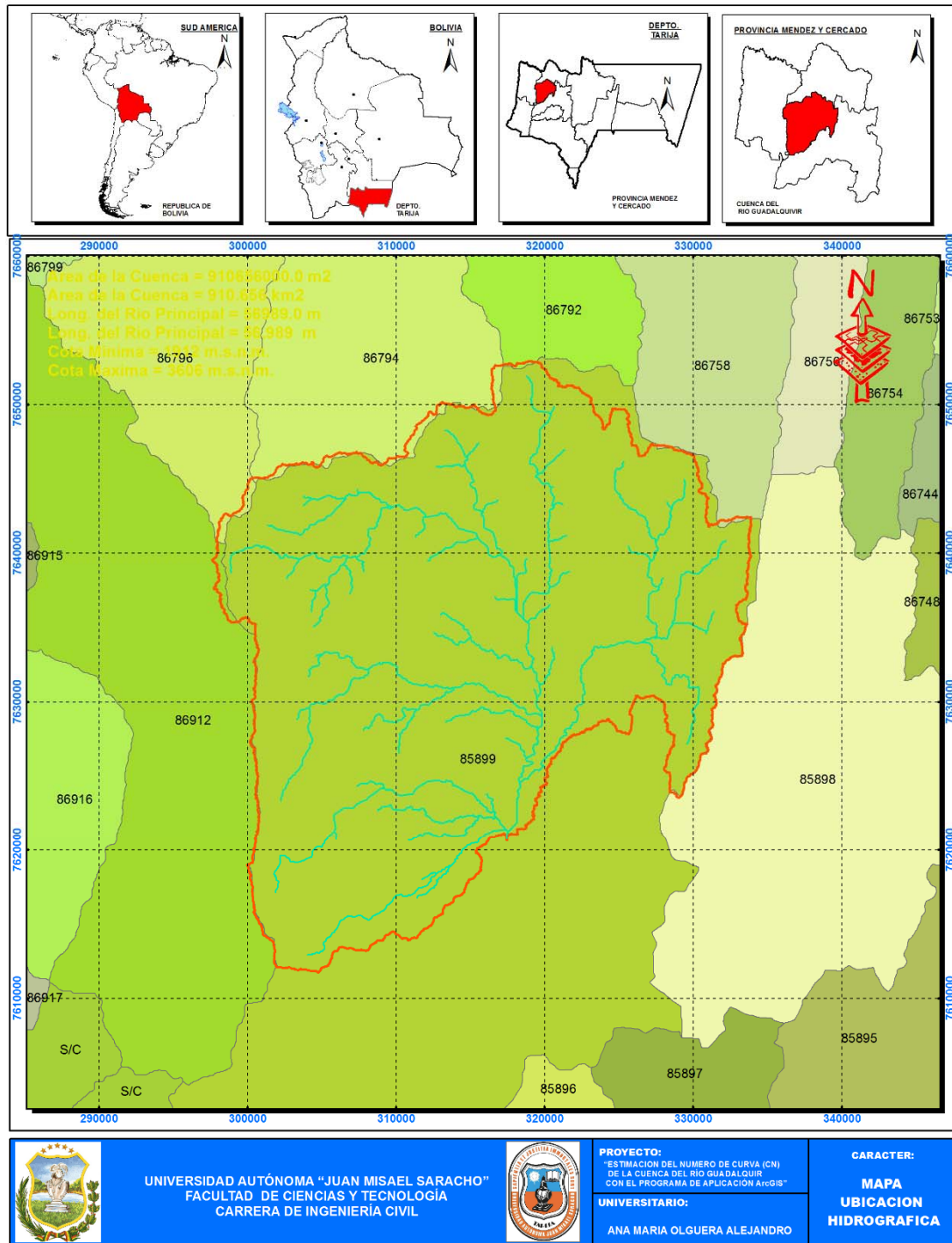
Figura 1.1: MAPA DE LOCALIZACIÓN



Fuente: Elaboración Propia

1.3 UBICACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DE APORTE

Figura 1.2: MAPA DE RED HIDROGRÁFICA DE TARIJA



Fuente: Elaboración propia en base a la delimitación y codificación de unidades hidrográficas de Bolivia

La cuenca de aporte se encuentra enmarcada en las coordenadas siguientes:

→ **Latitud: 21°14'24,32" a 21°33'36,98"**

→ **Longitud: 64°58'31,40" a 64°35'36,59"**

→ **Altitud: 3000 msnm.**

A continuación se muestra un resumen de la ubicación del área de proyecto según la clasificación oficial de cuencas del Viceministerio Recursos Hídricos y Riego VMRHyR.

Tabla 1.2: CLASIFICACIÓN HIDROGRÁFICA VMRH Y R

Clasificación Hidrográfica VMRH y R	
Nivel	Unidad Hidrográfica
1	8
2	85
3	858
4	8589
5	85899

Fuente: Elaboración propia

1.4 EL PROBLEMA

1.4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen diversas tablas y gráficos para asignar a una cuenca un valor de CN obtenidos en parcelas experimentales con diversidad de condiciones de suelo, vegetación y condiciones de infiltración, con simulaciones de precipitaciones en 24 horas. El problema radica en que la clasificación hidrológica de suelos se realiza de forma cualitativa y en función de la experiencia del proyectista.

Es por ello que se aborda el problema de tratar de elaborar en primera instancia un mapa de clasificación hidrológica de suelos en función de variables tales como la geomorfología, tipo de suelo y vegetación, pendientes, etc. (todas variables disponibles como mapas temáticos dentro de un SIG) para que mediante una tabulación cruzada espacial con el mapa de uso de suelo (obtenido por procesamiento de imágenes satelitales) se obtenga de forma automática y distribuida espacialmente un valor de CN para cada celda de análisis (pixel).

1.4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El proyecto: ¿responde a las necesidades de la sociedad?

Sí, debido a que los datos presentados en este proyecto serán un aporte importante en los estudios hidrológicos para la planificación de obras hidráulicas, carreteras, redes de alcantarillado, el diseño de los sistemas de drenaje de las aguas pluviales, etc. La automatización del proceso permite la rápida ejecución y actualización, ofreciendo una objetivación en el tratamiento de los datos y realizar escenarios de análisis.

En conclusión el proyecto se constituye en una alternativa a la necesidad de contar con variables hidrológicas que se aproximan a la realidad al momento de realizar el estudio hidrológico para una obra civil.

1.4.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿El objetivo, responde a una necesidad real de la sociedad?

Sí, es importante contar con una herramienta como el SIG² que son mucho más precisas y rápidas con las cuales se preparan las variables hidrológicas de forma automática para el modelamiento hidrológico.

Por tanto en la sistematización del problema, se plantea las siguientes preguntas:

- » ¿Cómo se determina la variable hidrológica el número de curva (CN)?
- » ¿Qué variables y entrada de datos son necesarias para definir el número (CN)?
- » ¿Qué ventaja y desventajas presenta la metodología propuesta de la utilización de las herramientas de SIG?
- » ¿Cuál es el método más confiable para la estimación de caudales máximos?
- » ¿Cómo se determina la variable hidrológica el coeficiente de escurrimiento (C)?

² *Sistemas de Información Geográfica*

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el número de curva (CN) de la cuenca alta del río Guadalquivir, con Sistemas de Información Geográfica (SIG), aplicando el software ArcGIS.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- » Preparar datos para la modelación hidrológica mediante la utilización del software ArcHydro y Hec-GeoHMS.
- » Estimar la escorrentía superficial para máximas avenidas mediante el método del Número de Curva en la cuenca del río Guadalquivir, mediante la utilización del software HEC-HMS.
- » Estimar Caudales máximos para periodos de retorno de 100 y 50 años.
- » Comparar los resultados de caudales por el método Número de Curvas SCS y Formula Racional.
- » Comparación de resultados de caudales calculados, con los caudales de los diferentes estudios hidrológicos realizados dentro de la cuenca del río Guadalquivir.
- » Validación de Número de Curva en la cuenca hidrográfica del río Guadalquivir.
- » Comparación de tirante máximo calculado con el tirante máximo observado.

1.6 JUSTIFICACIÓN.

1.6.1 TEÓRICA.

Mediante la elaboración del presente trabajo, se pretende validar la variable hidrológica (CN) número de curva, para la cuenca alta del río Guadalquivir, haciendo una comparación de la simulación de caudales con los caudales determinados mediante los métodos empíricos en base a observaciones y parámetros determinados de acuerdo a las características geomorfológicas en un mismo periodo de retorno, asimismo se determinara las variables necesarias para la estimación de caudales máximos por el método número de curva de Soil Conservation Service de Estados Unidos.

1.6.2 METODOLÓGICA.

En cuanto a la justificación metodológica se aplicarán metodologías elaborada por el Soil Conservation Service de Estados Unidos que es el de mayor difusión cuando se desea obtener una adecuada aproximación (Kent, 1968; SCS, 1972).

1.6.3 PRÁCTICA.

El presente trabajo está orientado a convertirse en una fuente importante de consulta y abre las puertas para futuros trabajos de investigación en otras cuencas en nuestro medio e incentiva al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.7 METODOLOGÍA

Para el presente trabajo la metodología fue básicamente de gabinete, consecuente a obtener como resultado la estimación de escorrentía superficial mediante el método del número de curva para la cuenca del río Guadalquivir.

El procedimiento para generar automáticamente un mapa del número de curva se apoya en los SIG. Estos son sistemas gestores de base de datos geográficos, en los que se manejan datos muy diversos que se dan en una misma localización geográfica: entrada de datos, manejo de datos (almacenamiento y búsqueda), manipulación y análisis de los datos, salida de datos, tanto en forma de tabla como en mapa.

Posteriormente se realizó la estimación de la escorrentía superficial mediante el método del número de curva propuesto por el Servicio de Conservación de suelos (SCS) de los Estados Unidos con el software HEC-HMS.

1.8 MARCO DE REFERENCIA.

1.8.1 MARCO TEÓRICO.

El número de curva (CN) es un parámetro hidrológico ampliamente difundido, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, para el cálculo de la precipitación neta a partir de la precipitación total caída en un área. La determinación del CN a partir de la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se basa en el uso del suelo, geomorfología, tipo de suelo, vegetación, pendientes,

etc. Son de fundamental importancia en la modelación matemática de los recursos hídricos y para diversos estudios hidrológicos.

Aquí radica la importancia de automatización de una cobertura digital del CN para la cuenca alta del río Guadalquivir aplicando las herramientas de SIG programa de aplicación ArcGIS, que supone conformar de forma automática una cobertura digital del CN para la cuenca del río Guadalquivir y además, optimizar considerablemente el tiempo del tratamiento de la información.

1.8.2 MARCO CONCEPTUAL.

Para el presente trabajo se considera necesario definir los siguientes conceptos:

1.8.2.1 CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificada por su peculiar topografía y delimitada por la divisoria de aguas, en un sentido amplio incluye el aire, la luz solar, la flora y la fauna que se sitúan alrededor de una fuente de agua principal que funciona como colectora.

1.8.2.2 MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA DEL USDA SCS (1985)

En 1954 el USDA SCS desarrolló el método del Número de Curva (NC) para estimar las abstracciones totales que se producían durante un aguacero. El método ha sufrido varias revisiones en 1956, 1964, 1965, 1971, 1972, 1985 y 1993. Desde su origen el método tuvo gran apoyo por parte de las agencias gubernamentales norteamericanas, por lo que se extendió rápidamente a otros países.

1.8.3 MARCO ESPACIAL

La Cuenca Alta del Río Guadalquivir se encuentra situada al Norte del Valle Central de Tarija, en el Departamento de Tarija, al sur de Bolivia (*figura 1.1*), tiene una extensión de 105.910 ha, cuyas coordenadas geográficas extremas son: paralelos de 21° 15' y 21° 35' Latitud Sur y meridianos 64° 35' y 64° 56' de Longitud Oeste. La cuenca es tributaria del río Bermejo, afluente del río Paraguay y perteneciente a la cuenca del Río de La Plata.

Por el norte limita con las cuencas de afluentes al río Pilaya, al sur con la cuenca del río Tolomosa, al este con la cuenca del río Santa Ana y al oeste con la cuenca de río Tomayapo. La parte más baja tiene una altura de 1.800 msnm y la parte más alta, ubicada en la Cordillera de Sama, tiene 4.344 msnm.

El curso principal del río Guadalquivir, nace con el nombre de río Chamata, tiene una longitud de 60 km. La red de drenaje es típicamente dendrítica y sus afluentes más importantes por el lado derecho son los ríos: Calama, Erquis, Victoria y por el lado izquierdo, Corana, Carachimayu, y Sella.

1.8.4 MARCO TEMPORAL.

En el ciclo hidrológico, una parte importante del movimiento del agua viene determinada por la infiltración. La infiltración es el proceso por el que la precipitación se mueve hacia abajo a través de la superficie del suelo, aumentando la humedad del suelo. Uno de los métodos más extendidos y experimentados de los modelos empíricos de infiltración es el del SCS de los Estados Unidos (McCuen, 1982).

Los datos con las que se cuenta como fuentes primarias para el presente trabajo, son los registros que existen en Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), de precipitaciones y lecturas de escala, de las estaciones que están dentro de la cuenca, que corresponde al departamento de Tarija, el espacio de tiempo de registro se muestran en las siguientes *tabla 1.3*:

Tabla 1.3: PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA (MM) (ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS)

ESTACIÓN	PROVINCIA	DPTO.	TIPO		LAT.S.	LONG.W	ALTURA (m.s.n.m)	Período de Registro
ASSANA	Cercado	Tarija	CP	Climatológica Principal	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1.875	44 - 13
Tucumillas	Méndez	Tarija	CP	Climatológica Principal	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2.557	99 - 13
Coimata	Méndez	Tarija	CP	Climatológica Principal	21° 29' 57"	64° 47' 20"	2.027	80 - 13
Sella Qda.	Méndez	Tarija	CP	Climatológica Principal	21° 29'	64° 40' 52"	2.145	86 - 13
Trancas	Méndez	Tarija	CP	Climatológica Principal	21° 18' 29"	64° 48' 57"	2.198	86 - 13

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Tarija

1.9 HIPÓTESIS

El programa de aplicación ArcGIS realiza una buena estimación del número de curva (CN) en la cuenca del río Guadalquivir, para condiciones medias de humedad en el suelo, que depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

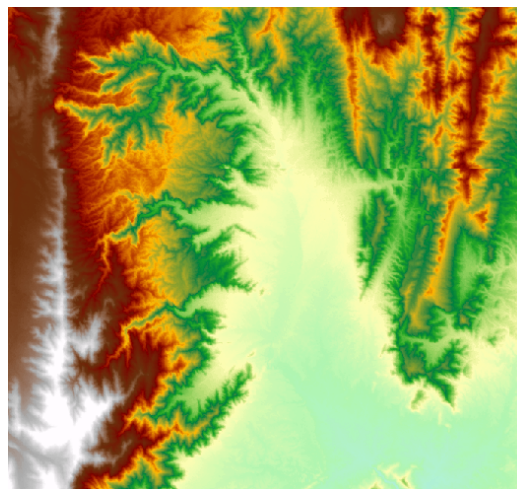
2.1 CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificada por su peculiar topografía y delimitada por la divisoria de aguas, en un sentido amplio incluye el aire, la luz solar, la flora y la fauna que se sitúan alrededor de una fuente de agua principal que funciona como colectora.

2.2 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.

El modelo de elevación digital consiste en una representación digital de altitudes como las de la superficie terrestre, esta información según su origen puede ser almacenada en formato Raster o vector para su posterior utilización. Los DEM¹ son mapas de entrada que se usan con mayor frecuencia en un SIG, sus aplicaciones más importantes son despliegues tridimensionales de mapas, selección de perfiles, cálculo de pendientes, patrón de drenaje, cálculo de ortoimágenes a partir de fotografías aéreas o imágenes satelitales.

Figura 2.1: Modelo de elevaciones de Tarija



Fuente: <http://geo.gob.bo/?Descargas-Aster-DEM>

¹ *Modelo de Elevación Digital*

2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO SIG

Según Quintas (1994), un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) es un conjunto de herramientas para la adquisición, almacenamiento, análisis y edición de información espacial, que se estructura internamente como un sistema gestor de bases de datos georreferenciados. Estas cuatro funciones pueden realizarse de forma automática utilizando información análoga o codificada en forma digital, lo cual facilita manejo de la información, agilizar los cálculos a realizar en las operaciones de análisis y optimizar las salidas gráficas de los resultados.

El uso de SIGs, es de suma importancia en el estudio del comportamiento hidrológico de cuencas, debido a que esta disciplina vincula estrechamente al territorio con las variables y parámetros de alta variabilidad espacial.

Además, y en combinación con lo anterior, existe la posibilidad de concebir la realidad espacial desde dos modalidades o modelos de datos: vectorial, basada en elementos como los puntos, líneas o polígonos; y matricial, dividiendo el espacio en una retícula formada por celdas.

2.3.1 IMPORTANCIA DE LOS SIG EN MODELACIONES HIDROLÓGICAS.

En el desarrollo económico de cualquier país constituye una necesidad primordial el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, siendo éste uno de los retos más importantes la planificación del uso del agua por su distribución limitada sobre la superficie terrestre. Planificar el uso de los recursos, por tanto, se convierte en un objetivo imprescindible en la actualidad.

En los últimos años los SIG han alcanzado gran aplicación en el campo de la hidrología, específicamente, en la gestión integrada de los recursos hídricos. Estos programas permiten mejorar la representación de la variabilidad en la componente espacial de sistemas naturales, como los hidrológicos, a partir de la construcción de modelos espaciales. Es por ello que se han consolidado en los últimos años como las herramientas más adecuadas para afrontar de forma eficiente la modelación hidrológica.

Los Procesos de Modelación Hidrológica son un conjunto de actividades o eventos que se realizan con el objetivo de crear una representación ideal o simplificada de la distribución, espacial y temporal de las propiedades del agua (por ejemplo el contenido de nutrientes) presentes en la atmósfera y en la corteza terrestre (Bernal, et.al.).

Particularmente en las cuencas, estas modelaciones permiten junto con otras capas de información espacial determinar los parámetros de los modelos, tales como largo de la cuenca, área de captación, pendiente promedio, tiempo de concentración, etc. Los modelos hidrológicos pueden centralizarse en una, en varias o en todas las secuencias que integran el ciclo hidrológico.

Para un manejo adecuado del agua, la modelación hidrológica es una herramienta de primera importancia a fin de entender los procesos involucrados y simular respuestas a eventos particulares. Como varios parámetros con variabilidad espacial influyen sobre la cantidad y la calidad del recurso agua, el uso de los sistemas de Información geográfica (SIG) se vuelve esencial para la gestión de las características espaciales del medio ambiente. Aunque el ciclo del agua es un fenómeno **espacio-temporal**, los modelos hidrológicos de cuenca, los modelos hidráulicos de ríos, los modelos de calidad del agua dentro de los lagos por ejemplo, se apoyan principalmente sobre datos temporales, mientras que los SIG están basados sobre la discretización del espacio a un tiempo dado. Así, un vínculo entre los modelos hidrológicos y los SIG parece ahora indispensable, varios niveles de integración siendo posibles: la gestión de base de los datos espaciales, la extracción de parámetros necesarios para el modelado hidrológico, la visualización cartográfica de los datos de entrada y de salida del modelo, la modelación del flujo sobre el terreno, así como el desarrollo de una interface entre el SIG y el modelo.

Actualmente existen diversos modelos de simulación lluvia-escurrimiento, para lo cual un SIG facilita la constitución de los archivos necesarios para la etapa de calibración. En particular, los datos fisiográficos necesarios (ocupación del suelo, altitud, pendientes) se pueden extraer de los mapas digitales.

Sin duda, la calidad de los resultados depende de la exactitud, precisión y resolución espacial de los datos de entrada. Sin embargo, la parte final del proyecto generalmente

permite evaluar la calidad de la fuente de datos y los tratamientos geomáticos preliminares necesarios para optimizar este tipo de modelaciones hidrológicas.

2.3.2 UTILIDAD DE LOS SIG EN ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

Genéricamente, los estudios hidrológicos pueden ser definidos como “aquellos estudios encaminados al conocimiento de las características, generales o específicas, dependiendo el caso y el objetivo concreto de los mismos, de una cuenca determinada, con el fin de evaluar en base a ello sus aptitudes, su vulnerabilidad y su capacidad de reacción frente a las diversas actividades antrópicas”.

Los modelos de cuencas hidrológicas tienen cinco componentes básicos: procesos hidrológicos (cuenca) y sus características, datos de entrada, ecuaciones, condiciones iniciales y de frontera y datos de salida. Estos son generalmente clasificados en base al método que usan para describir los procesos hidrológicos, escalas espaciales y temporales, y condiciones específicas o usos objeto de su diseño (Burns, IS., et al, n.d.).

De este modo se puede decir que la modelación hidrológica es la simulación del flujo de agua de un área mediante programas computacionales, que representan generalmente: entradas, demandas, pérdidas, almacenaje e interrupciones de flujo.

Por todo lo anterior, los SIG, se han configurado en los últimos años como herramientas útiles y cada vez más imprescindibles en el planeamiento territorial, entendido éste en su sentido más amplio y partiendo del conocimiento previo de numerosos aspectos que es preciso tener en cuenta en el mismo (aspectos meteorológicos, topografía, etc.)

2.3.3 APLICACIONES DE SIG A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

La planificación hidrológica de una cuenca, requiere de la utilización conjunta de series de datos hidroclimatológicos procedentes de estaciones de observación, situadas en puntos bien definidos y de información fisiográfica: topografía, red de drenaje, vegetación, litología, suelos, etc., asociada al dominio de la cuenca, así como de información sobre las infraestructuras (embalses, canales, etc.) y las demandas y usos del agua: poblaciones, industrias, abastecimiento, saneamiento, etc.

Este tipo de estudios se basa, por tanto, en la utilización de información georreferenciados que tradicionalmente, debido a su complejidad (información fisiográfica) y al volumen de datos (climatológicos e hidrológicos a escala diaria, decenal o mensual) sobre todo en cuencas extensas, se ha tratado en forma simplificada y que actualmente puede aprovecharse de manera más rigurosa y completa mediante el uso de herramientas SIG.

2.4 SOFTWARE ARCGIS 10.2

ArcGIS es el software de Sistemas de Información Geográfica con sus siglas en inglés SIG, más completo de Environmental Systems Research Institute (ESRI) que sirve para visualizar, crear, manipular y analizar datos geográficos, con distintas funciones y aplicaciones como ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox y que dan una solución completa para comprender y describir la estructura del software desplegando datos espaciales, consultando bases de datos, editando, asociado y relacionando para producir mapas, reportes y graficar. Para el ArcGIS es muy importante la entrada de datos, integra una variedad de tipos de datos de una variedad de fuentes, ofrece métodos de entrada de datos para automatizar mapas de papel y otras fuentes de datos no digitales. En este momento ArcGIS provee la conversión de datos referenciados geográficamente más exhaustivas de cualquier GIS.

Los dos modelos básicos para almacenar datos geográficos son vector y raster. El modelo vector usa coordenadas discretas (pares de coordenadas X, Y) para representar elementos (features) como puntos, líneas o polígonos. El método raster usa celdas cuadradas de igual tamaño para representar features; el nivel de detalle depende del tamaño de la celda. Hay fenómenos físicos que son más aptos para un tipo de datos, por ejemplo la lluvia es más apta para modelos de datos raster. Los datos GIS se componen de tres elementos básicos: geografía (la representación espacial de elementos), atributos (las características descriptivas de los elementos) y las reglas del comportamiento (instrucciones de lo que los features pueden o no pueden hacer).

2.5 SOFTWARE ARCHYDRO 10.2

El modelo de datos ArcHydro es una estructura para almacenar las series de tiempo y los datos geospaciales, asociados con los recursos hídricos de un área determinada, dentro de una base de datos geográfica (geodatabase). Esta geodatabase es la columna vertebral de un sistema de información hidrológica ya que brinda toda la información que requieren los modelos de gestión y análisis de escenarios para una cuenca. Las herramientas que requieren los modelos de gestión y análisis de escenarios para una cuenca. Las herramientas ArcHydro se utilizan para derivar varios conjuntos de datos, que describen los patrones de drenaje de una cuenca. El análisis raster se realiza para generar datos sobre la dirección de flujo, acumulación de flujo, definición de corriente, segmentación de arroyos, y la delimitación de cuencas hidrográficas. Estos datos se utilizan para desarrollar una representación vectorial de las cuencas y las líneas de drenaje. Usando esta información se construye una red geométrica.

2.6 SOFTWARE HEC-GeoHMS 10.2

En este estudio se ha utilizado HEC-GeoHMS, un programa que ha sido desarrollado como un conjunto de herramientas para ingenieros e hidrólogos con limitada experiencia en SIG. Con este programa se puede visualizar información espacial, obtener características de la cuenca, realizar análisis espaciales, delinear subcuencas y cauces y obtener los datos de entrada para los modelos hidrológicos. Concretamente, HEC-GeoHMS permite exportar los datos de la cuenca al programa de modelización hidrológica HEC-HMS.

El modelo hidrológico de Extensión Geoespacial, Geospatial Hydrologic Model System (HEC-GeoHMS) creado por US Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center; ha sido desarrollado como un conjunto de herramientas geoespaciales para la hidrología e hidrólogos con experiencia en los Sistemas de Información Geográfica SIG, utilizando ArcGIS y la extensión Spatial Analyst. El HEC-GeoHMS analiza digitalmente el terreno transformando los datos de drenaje y límites de cuencas en una estructura hidrológica representando la red de drenaje,

Permite visualizar la información, características de la cuenca y ríos de una manera espacial.

La representación física de una cuenca se realiza con un modelo de cuenca. Elementos hidrológicos están conectados en una red dendrítica para simular procesos de escurrimiento. Los elementos disponibles son: sub-cuenca, el alcance, la unión, la desviación, la fuente y sumidero. Se incluye el método para la transformación de la precipitación en exceso de esorrentía superficial; el hidrograma unitario de SCS.

Una aplicación del método de onda cinemática, con múltiples planos y los canales también se incluye.

2.6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE CUENCAS:

- » Longitud de flujo superficial
- » Longitud al centroide
- » Pendiente del canal
- » Centroide de la cuenca

2.6.1.1 LONGITUD DEL FLUJO SUPERFICIAL

Es la longitud del recorrido del flujo no canalizado desde un punto sobre la divisoria del drenaje hasta un punto del cauce adyacente, proyectado sobre la horizontal.

2.6.1.2 PENDIENTE DEL CANAL

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales. A mayor pendiente mayor velocidad. Los perfiles típicos de los cauces naturales son cóncavos hacia arriba además, todas las cuencas, exceptuando las más pequeñas, tienen varios canales cada uno con un perfil diferente.

Es por esta razón que definir la pendiente promedio de un cauce en una cuenca es muy difícil.

2.6.1.3 LONGITUD AL CENTROIDE

Es la distancia siguiente el cauce des de punto más bajo hasta el centro de gravedad de la cuenca, definido este último con un punto ubicado en el cauce principal.

2.6.1.4 CENTROIDE DE LA CUENCA

La localización del centroide de la cuenca puede ser estimada de cuatro maneras. El enfoque de ingeniería para la localización del centroide con cálculo del momento alrededor de los ejes X y Y no es implementada aquí, porque el centroide puede estar fuera de la cuenca en el caso de cuencas en forma de U o de cuencas con formas extrañas. Los cuatro métodos usados por GEOHMS para aproximar la ubicación del centroide son; Rectángulo circunscrito, la elipse, el canal de flujo y el especificado por el usuario.

Rectángulo Circunscrito: El método de cuadro circunscrito, circunscribe una sub-cuenca dentro de un rectángulo y aproxima el centroide como el centro del cuadro. Este método funciona bastante rápido pero puede no ser aplicable a muchas formas de cuenca.

Canal del Flujo: El método del canal de flujo dibuja la mayor longitud de flujo para la sub-cuenca y aproxima el centroide al punto medio en la corriente de mayor longitud.

Localización del Centroide especificada por el usuario: Cuando los tres métodos previos no producen estimados satisfactorios del centroide, el programa le permite al usuario el centroide a cualquier localización dentro de la sub-cuenca.

2.7 SOFTWARE HEC-HMS 3.5

El Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), es un Sistema de Modelación Hidrológica de nueva generación del U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), diseñado para simular los procesos de la precipitación-escorrentía, de los sistemas de cuencas, constituyendo un avance significativo en términos de informática e ingeniería hidrológica; asimismo sirve para ser aplicando a una amplia gama de áreas geográficas y para solucionar la mayor cantidad de problemas, como la hidrología de grandes inundaciones y el escurrimiento en cuencas con zonas urbanas o naturales. Los hidrogramas producidos por el programa se utilizan, directamente o en conjunto con otros software, para los estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano pronóstico de caudales, impacto de

futuro urbanismo reducción de daos causados por inundaciones, entre otros, incluye una base de datos utilidades.

El interfaz del software permite al usuario el manejo total entre las diversas partes del programa, la funcionalidad y el aspecto son iguales a través de todas las plataformas de apoyo.

2.8 MODELO DE PÉRDIDAS DEL NÚMERO DE CURVA (CN) DEL SCS

El modelo de Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de suelos (SCS) estima el exceso de precipitación como una función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, uso de la tierra, y humedad antecedente, mediante el uso de la ecuación:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2.1)$$

Donde:

P_e : Exceso de precipitación acumulada en el tiempo

P : Altura de lluvia acumulada en el tiempo

I_a : Abstracción inicial (perdida inicial)

S : Retención máxima potencial, una medida de la capacidad de la cuenca para abstraer y retener la precipitación de la tormenta. Hasta que la lluvia acumulada exceda a la abstracción inicial, el exceso de precipitación y en consecuencia el escurrimiento, serán nulos.

A partir del análisis de los resultados de muchas cuencas pequeñas, el SCS desarrollo relaciones empíricas de I_a y S que se según la Ecuación:

$$I_a = 0.2S \quad (2.2)$$

Por otro lado, el exceso acumulado en el tiempo t es:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2.3)$$

El exceso incremental para un intervalo de tiempo se calcula como la diferencia entre el exceso acumulado y el final y el comienzo del período.

La retención máxima, S , y las características de la cuenca se relacionan mediante parámetros intermedios, el número de curva (abreviado en inglés como CN interviene como en la Ecuación:

$$\left[\begin{array}{ll} S = \frac{1000 - 10CN}{CN} & \rightarrow \text{Sistema Ingles} \\ S = \frac{25400 - 254CN}{CN} & \rightarrow SI \end{array} \right. \quad (2.4)$$

El rango de valores de CN va desde 100 (para cuerpos de agua) hasta aproximadamente 30 para suelos permeables con alta de infiltración.

2.9 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA, CN

Con la precipitación P , el número de curva de escorrentía CN, la escorrentía P_e , puede ser determinada por la ecuación anterior. Para cuencas sin mediciones de caudal, tablas de número de curva de escorrentía CN para varias coberturas complejas hidrológicas del suelo se encuentran ampliamente disponibles.

Las coberturas complejas hidrológicas de suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial, y las condiciones de humedad antecedentes. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una cuenca. El grupo hidrológico de suelos describe el tipo de suelo. El uso y tratamiento del suelo describe el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para aumentar o impedir la escorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una medida de la cantidad almacenada por la cuenca.

2.9.1 CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planeamiento de cuencas; para la estimación de escorrentía a partir de la precipitación. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos, A, B, C y D, de acuerdo el potencial de escurrimiento.

A: (*Bajo potencia escorrentía*). Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas bien o excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta transmisión de agua.

B: (*Moderadamente bajo potencial de escorrentía*). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C: (*Moderadamente alto potencial de escorrentía*). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento de del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).

D: (*Alto potencial de escorrentía*). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial, suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcali y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lenta.

2.9.2 CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE

El método del número de curva de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta; la condición de humedad antecedente sea; la condición de humedad antecedente normal y la condición de humedad antecedente humedad.

Condición I: (Suelo Seco). Es el caso en que los suelos se secan sin perder la cohesión; o sea, cuando se puede arar o cultivar en buenas condiciones (lamina 0-35mm).

Condición II: (Suelo Normal). Es el caso medio para crecidas anuales, es decir, las condiciones medias existentes que produjera la máxima crecida anual en dichas cuencas (lamina 35-50mm).

Condición III: (Suelo Húmedo). Cuando en los 5 días anteriores a la tormenta dada, se han producido lluvias fuertes o lluvias tenues con bajas temperaturas y el suelo está casi saturado (lamina mayor a 50mm).

La relación entre la precipitación y el escurrimiento para estas tres condiciones se expresa mediante un determinado número de curva, que depende de la condición de humedad antecedente, de la clasificación de los suelos según sus características hidrológicas (indicador de infiltración), de la condición hidrológica (indicador de la cobertura vegetal) y de los usos de la tierra.

2.9.3 USOS Y TRATAMIENTO DEL SUELO

El uso de la cuenca tiene efecto sobre la respuesta de la cuenca a los fenómenos hidrometeorológicos. A medida que se deforesta una cuenca aumentan los picos de crecidas y baja el caudal de esquiaje (caudal mínimo del río, a partir del cual se midan las crecidas).

Dependiendo de la clasificación de los suelos, uso de la tierra, tratamiento o práctica y de la condición hidrológica, se determina el número de curva a la condición II de humedad antecedente ya que esta es representativa de la condición del suelo.

Los valores de CN para las condiciones I y III se estiman mediante las Ecuaciones:

$$CNI = \frac{CNII}{2.3 - 0.013CNII} \quad (2.5)$$

$$CNIII = \frac{CNII}{0.43 - 0.0057CNII} \quad (2.6)$$

Donde:

CN I: Condición de humedad antecedente seca.

CN II: Condición de humedad antecedente normal.

CN III: Condición de humedad antecedente humedad.

El CN de una cuenca se puede estimar como una función del uso de la tierra, tipo de suelo, y humedad antecedente de la cuenca, con el uso de las tablas publicadas por SCS. Por conveniencia, se incluyen las tablas de CN desarrolladas por el SCS. Por conveniencia, se incluyen las tablas de CN desarrolladas por el SCS. Con estas tablas y conocimiento el tipo de suelo y el uso de la tierra, se encuentra un valor único de CN.

Para una cuenca formada por varios tipos de suelo y usos de la tierra un CN ponderado se calcula mediante la Ecuación:

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i} \quad (2.7)$$

Donde:

CN ponderado: Número de Curva ponderado para calcular el volumen de escurrimiento.

I: Índice de subdivisiones de la cuenca para tipo de suelo y uso de la tierra.

CN_i: Número de Curva para la subdivisión i.

A_i: Área de drenaje de la subdivisión i.

Los usuarios del modelo SCS como se implementa en HEC-HMS deberían notar que las tablas incluyen un CN ponderado para distritos urbanos, distritos residenciales, y áreas de clasificación reciente. Esto es, el CN que se muestra son valores compuestos para un área impermeable conectada directamente y espacios abiertos.

2.10 MODELACIÓN DE LA ESCORRENTÍA DIRECTA CON HEC-HMS

En este punto se describen los modelos de interés para este estudio que simulan los procesos de escurrimiento directo del exceso de precipitación sobre la cuenca. HEC-HMS se refiere a estos procesos como “transformación” del exceso de precipitación en un punto de escurrimiento. Con HEC-HMS, existen dos opciones para métodos de transformación.

Modelos empíricos (se refieren a modelos teóricos de sistemas). Estos involucran modelo de hidrogramas unitarios (HU) tradicionales. Los modelos teóricos de sistemas buscan establecer un enlace casuístico, entre exceso de precipitación en el escurrimiento sin considerar los detalles de los procesos internos. Las ecuaciones y los parámetros del modelo tienen significado físico limitado. Sin embargo, ellos han sido seleccionados atendiendo a criterios de optimización de bondad de ajuste.

Modelo conceptual. El modelo conceptual incluido en HEC-HMS es el modelo de onda cinemática de flujo superficial. Este representa, en su mayor extensión, todo el mecanismo físico que gobierna el movimiento del exceso de precipitación sobre la superficie de la tierra de la cuenca y pequeños canales colectores en la cuenca.

En este estudio se dispone de datos para utilizar el modelo empírico del SCS, es por ello que será detallado a continuación.

2.10.1 MODELO DE HU DEL SCS

El Servicio de conservación de Suelos (SCS) propuso un modelo paramétrico de Hidrograma Unitario (HU). Este HU adimensional, el cual se muestra en la *Figura 2.2*, expresa el HU de descarga, U_t , como la relación de la descarga pico del HU, U_p , para cualquier tiempo t , una fracción de T_p , el tiempo al pico del HU.

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (2.8)$$

En el cual A =área de la cuenca; y C =constante de conversión (2.08 en SI y 484 en el sistema libra-pie). El tiempo al pico (también se conoce como tiempo de incremento) se relaciona con la duración de la unidad de exceso de precipitación mediante la ecuación:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (2.9)$$

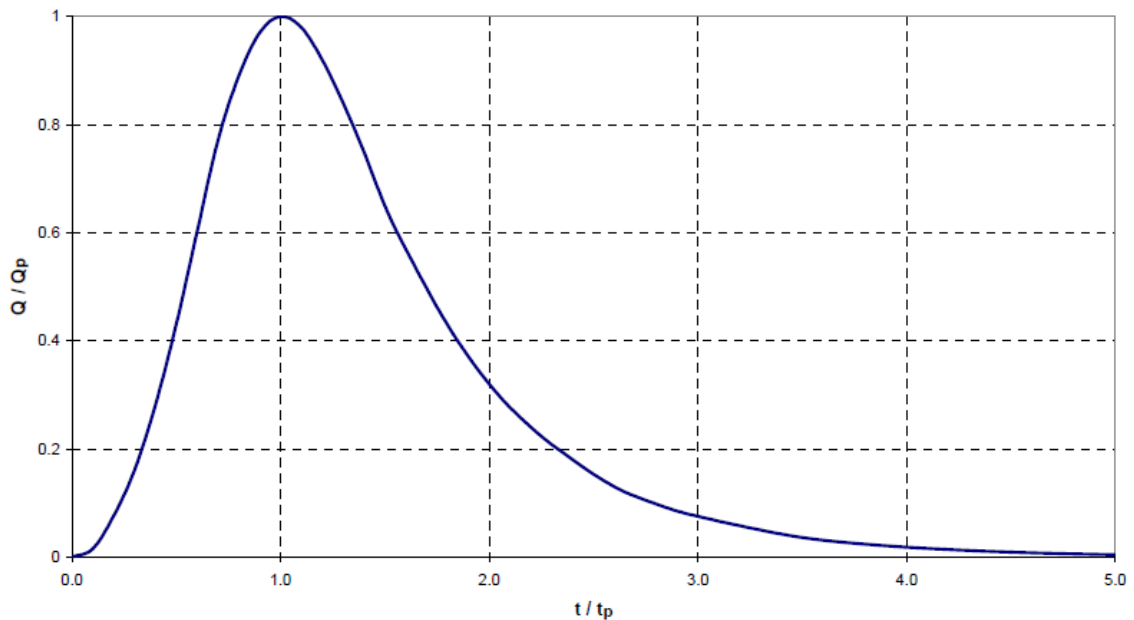
Dónde:

Δt = duración de la precipitación en exceso (el cual es un intervalo de cálculo en HEC-HMS)

t_{lag} = retardo de la cuenca, definido como el tiempo de diferencia entre el centro de masa del exceso de lluvia y el pico de HU. (Observe que para una definición adecuada de las ordenadas sobre la curva ascendente del HU del SCS, se debe usar un intervalo de cálculo, Δt , menor del 29% del t_{lag} USACE 1998).

Cuando se especifica el tiempo de retardo, HEC-HMS resuelve la Ecuación anterior para encontrar el pico de HU. Conocidos U_p y T_p , el HU se encuentra a partir del formato dimensional, el cual se incluye en HEC-HMS, por multiplicación.

Figura 2.2: Hidrograma adimensional de SCS



2.10.2 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL HIDROGRAMA UNITARIO DEL SCS

Para cuencas sin medición, el SCS sugiere que el tiempo de retardo del HU se debe relacionar con el tiempo de concentración, t_c , con la Ecuación:

$$t_{lag} = 0.6t_c \quad (2.10)$$

El tiempo de concentración es un parámetro cuasi-físico que se puede estimar con las Ecuaciones de:

» KIRPICH, Z. P. (Californiana):

$$T_c = \left(\frac{0,871 * L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (2.11)$$

» BASSO, E.:

$$T_c = 0,067 * \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77} \quad (2.12)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración en h.

L : longitud del cauce principal, más largo en km.

H : desnivel cauce principal (cabecera de cuenca y punto de control) en m.

S : pendiente media del cauce principal, más largo en m/m.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA APLICACIÓN DE LOS SIG EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA

3.1 PROCESO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA GUADALQUIVIR

Tradicionalmente la delimitación de cuencas se ha realizado mediante la interpretación de los mapas cartográficos. Este proceso ha ido evolucionando con la tecnología. Hoy en día los SIG (por ejemplo ArcGIS) proporcionan una amplia gama de aplicaciones y procesos, que con entender los conceptos y teoría, se puede realizar de una forma simple y rápida el análisis y delimitación de una cuenca.

Una característica muy importante de ArcGIS, es que permite calcular automáticamente los parámetros morfométricas de una cuenca, lo que facilita la evaluación del funcionamiento de un sistema hidrológico en base a un conjunto de estimaciones lineales, de relieve y superficie, convirtiéndose en una excelente herramienta en la planificación y toma de decisiones.

Las herramientas Arc Hydro se utilizan para derivar varios conjuntos de datos, que describen los patrones de drenaje de una cuenca. El análisis raster se realiza para generar datos sobre la dirección de flujo, acumulación de flujo, definición de corriente, segmentación de arroyos, y la delimitación de cuencas hidrográficas. Estos datos se utilizan para desarrollar una representación vectorial de las cuencas y las líneas de drenaje. Usando esta información se construye una red geométrica.

En este capítulo el propósito es ilustrar paso a paso, cómo utilizar las principales herramientas de Arc Hydro del SIG ArcGIS. Para realizar un análisis hidrológico con ArcGIS, utilizando el modelo ArcHydro, en primer lugar se debe contar con un **MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL** del área de estudio, el cual se puede obtener de algún servidor gratuito (por ejemplo INEGI), o interpolar a partir de coordenadas XYZ o curvas de nivel con ayuda de la herramienta 3D Analyst de ArcGIS. En este caso se utilizará el DEM obtenido de la página web:

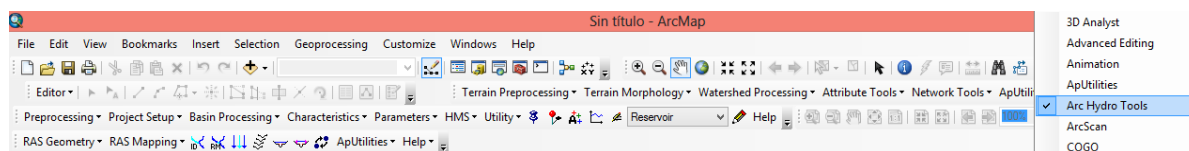
<http://geo.gob.bo/?Descargas-Aster-DEM>

Una vez que se obtiene el Modelo de Elevación Digital, se pueden corregir algunos parámetros para un proyecto. Para el trabajo en Hec-GeoHMS se requiere el pre procesamiento del terreno.

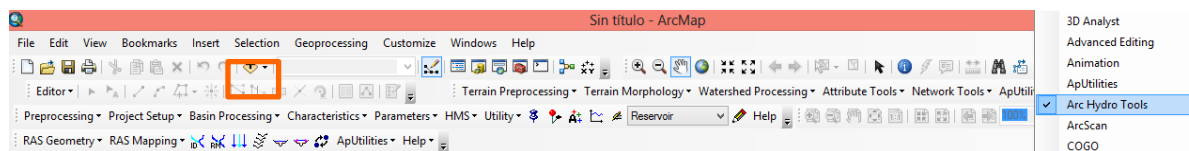
Para realizar dicho análisis se utiliza la herramienta Arc Hydro; para cargarla en el programa siga las siguientes indicaciones:

- » En ArcGIS abrir un documento nuevo en ArcMap.
- » Haga clic derecho sobre la barra de menú, para abrir el menú contextual que muestra las herramientas disponibles y seleccione Arc Hydro Tools (el archivo de instalación para ArcGIS 10.2 está disponible en la página de internet:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/downloads.aspx>

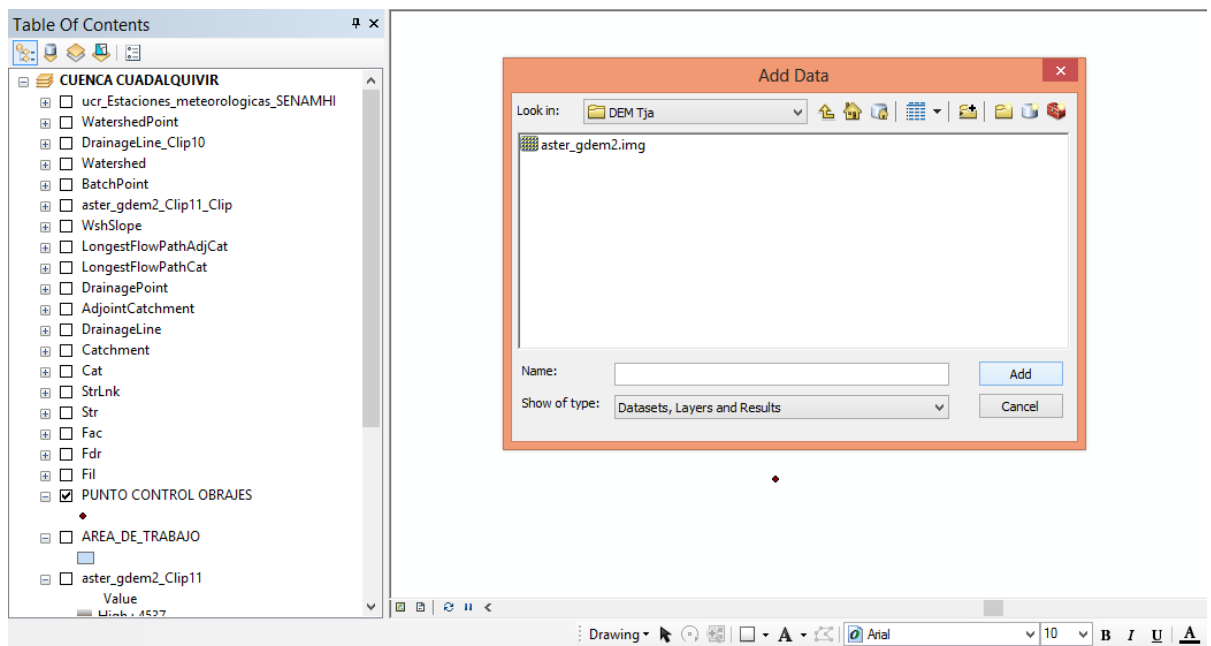


La barra de herramientas de Arc Hydro se muestra a continuación.



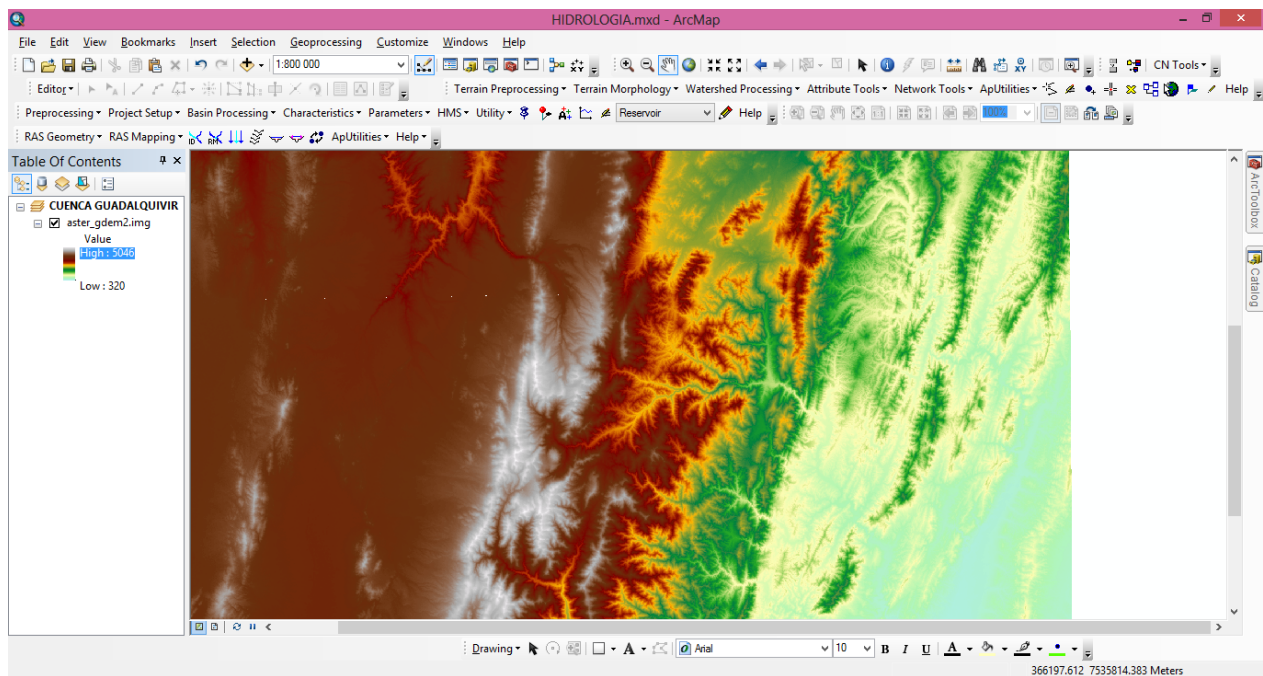
Para cargar el Modelo de Elevación Digital en ArcGIS, se siguen los siguientes pasos:

En la barra de herramientas hacer clic en el ícono que se muestra en la siguiente figura (representado por un símbolo de más), enseguida se abrirá una ventana en la que se debe navegar hasta la carpeta en la que se guardó el archivo.



Al presionar el botón Add (agregar) se cargará el Continuo de Elevaciones, visualizándose de la siguiente manera:

Figura 3.1: Modelo de Elevación Digital de Tarija



Fuente: <http://geo.gob.bo/?Descargas-Aster-DEM>

3.1.1 PRE PROCESAMIENTO DEL TERRENO

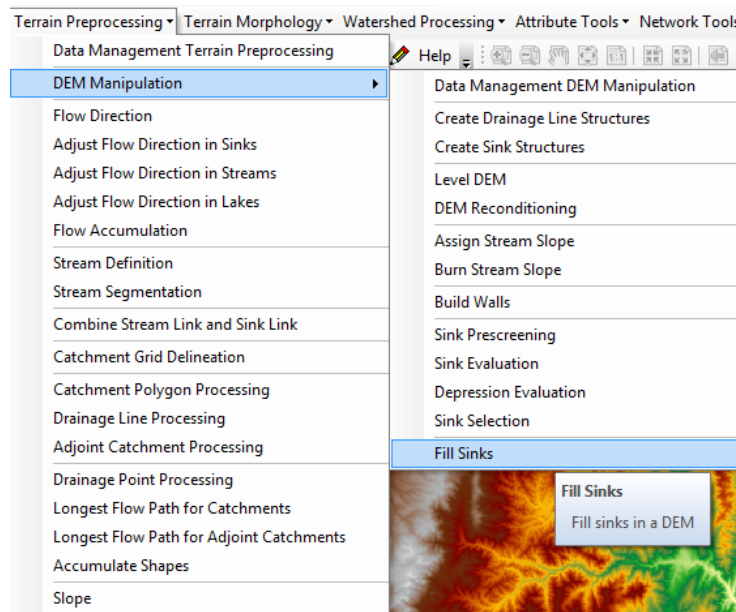
El pre procesamiento del terreno implicó ejecutar las siguientes opciones en forma consecutiva; reacondicionamiento del terreno, relleno de depresiones, direccionamiento del flujo, acumulación del flujo, definición de corrientes, segmentación de corrientes, delineación de cuencas, procesamiento poligonal de la cuenca, procesamiento de los segmentos de corrientes y agregación de cuencas.

Se agrega la herramienta Arc Hydro Tools dentro del Arc Toolbox, y se carga el Arc Hydro a la barra de herramienta del Hec-GeoHMS, cuando las propiedades se cargan, aparecen en la barra de herramienta el Arc Hydro y el Hec-GeoHMS.

Seleccionando **Tools** → **Extensions...** luego se regresa al Spatial Analyst, Seleccionando **Tools** → **Customize...** se verifica la presencia del **Arc Hydro Tools10.2, Hec-GeoHMS**, en la barra de herramientas.

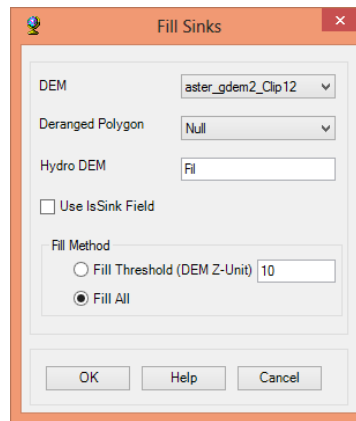
3.1.2 RELLENO DE DEPRESIONES

Se obtiene el relleno de un modelo digital de terreno entre dos fechas o situaciones. Las capas obtenidas mediante estos procesos de análisis superficial pueden ser usadas para los análisis ambientales. Se selecciona **Terrain Preprocessig** → **DEM Manipulation** → **Fill Sinks**.



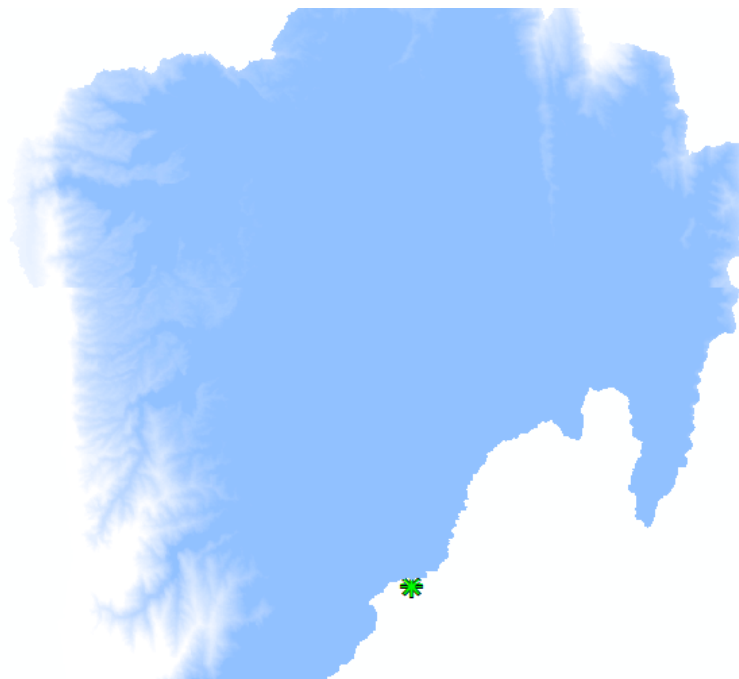
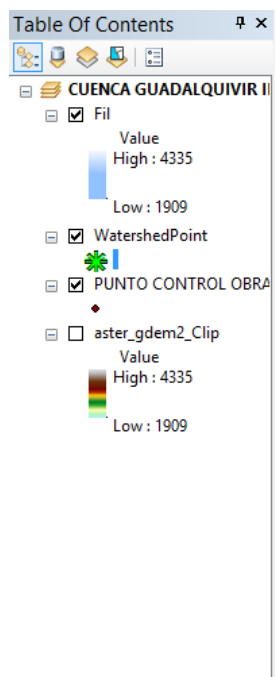
Seguidamente, el cuadro de dialogo **Fill Snks** solicita confirmación en relación al archivo sobre el cual se ejecutará la operación de relleno del terreno.

Figura 3.2: Edito Fill Sinks



El resultado obtenido es...

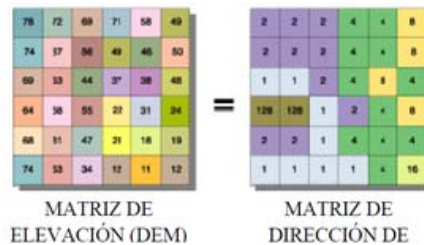
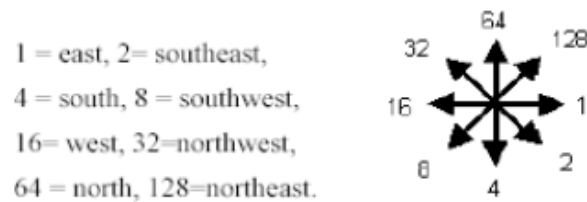
Figura 3.3: Resultado de llenado de terreno



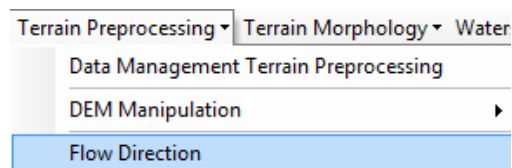
3.1.3 DIRECCIÓN DE FLUJO

Este parámetro es usado para obtener la orientación de las laderas, se limita al tamaño de celdas y al tamaño del raster. Con este paso se define la dirección de las pendientes

de descenso para cada celda en el terreno; al igual que un compás, el algoritmo especifica ocho puntos definidos por ocho direcciones posibles, como se muestra en la figura.

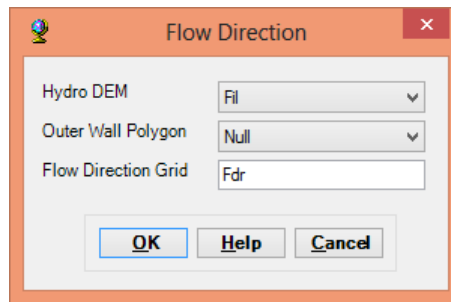


Paso 1. Hallar la dirección de flujo, desde la barra de herramientas **Arc Hydro Tools**, se selecciona **Terrain Preprocessing** seguido de **Flow direction**.



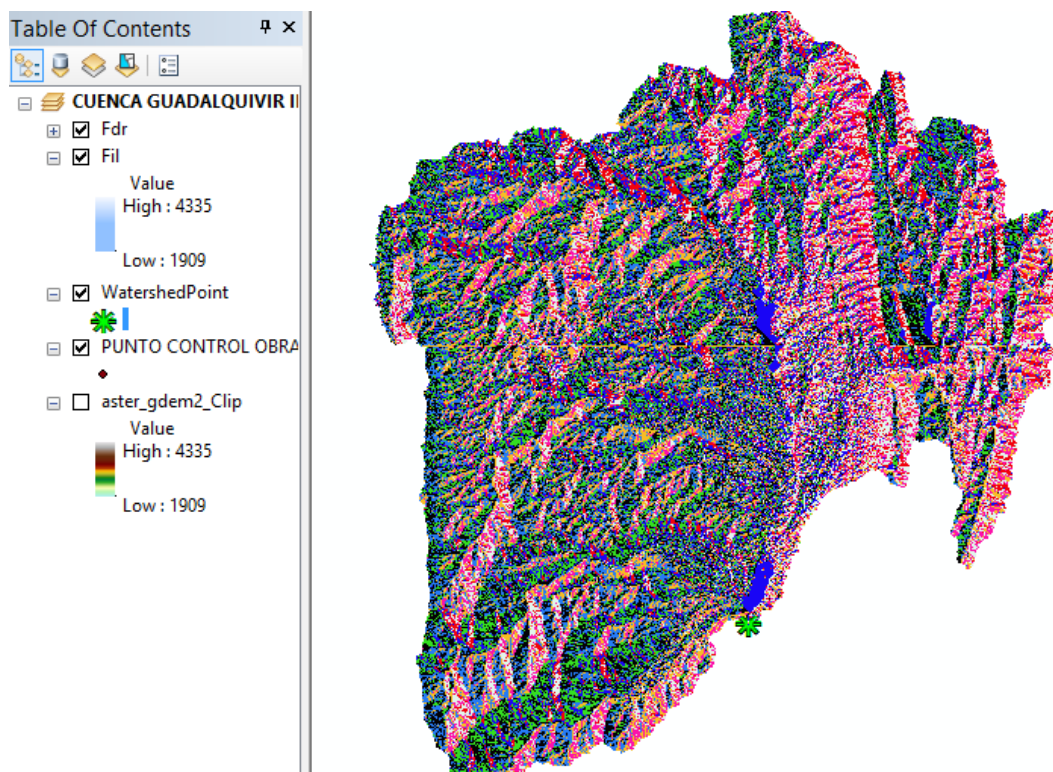
En la ventana que se abre, se debe colocar la siguiente información.

- ▶ **Hydro DEM:** se introduce el último DEM corregido, en este caso “aster_gdem2.img”.
- ▶ **Outer Wall Polygon:** Null
- ▶ **Flow Direction Grid:** “Fdr”



El resultado obtenido es...

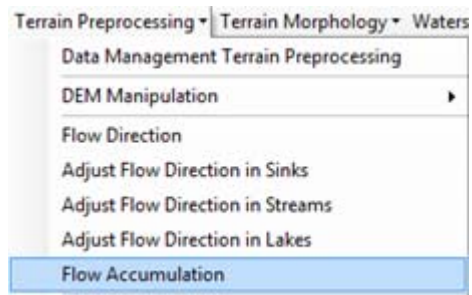
Figura 3.4: Dirección de flujo



3.1.4 ACUMULACIÓN DE FLUJO

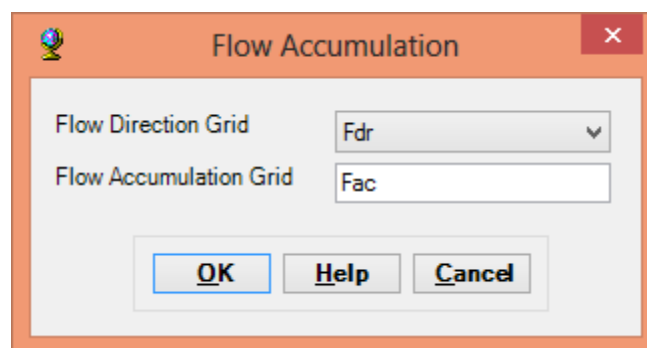
Con este paso se determina el número de corrientes en las celdas de drenaje para una determinada celda. Las áreas de drenaje aguas arriba en una celda determinada se calculan como la multiplicación de los valores de acumulación de flujo por las áreas de celdas. Los pasos para el uso de esta opción implican; desde **Arc Hydro Tools Toolbar**.

Paso 2. Una vez ejecutado este procedimiento, se calcula la acumulación de flujo, para esto se abre la función **Flow Accumulation** en el menú **Terrain Preprocessing**.



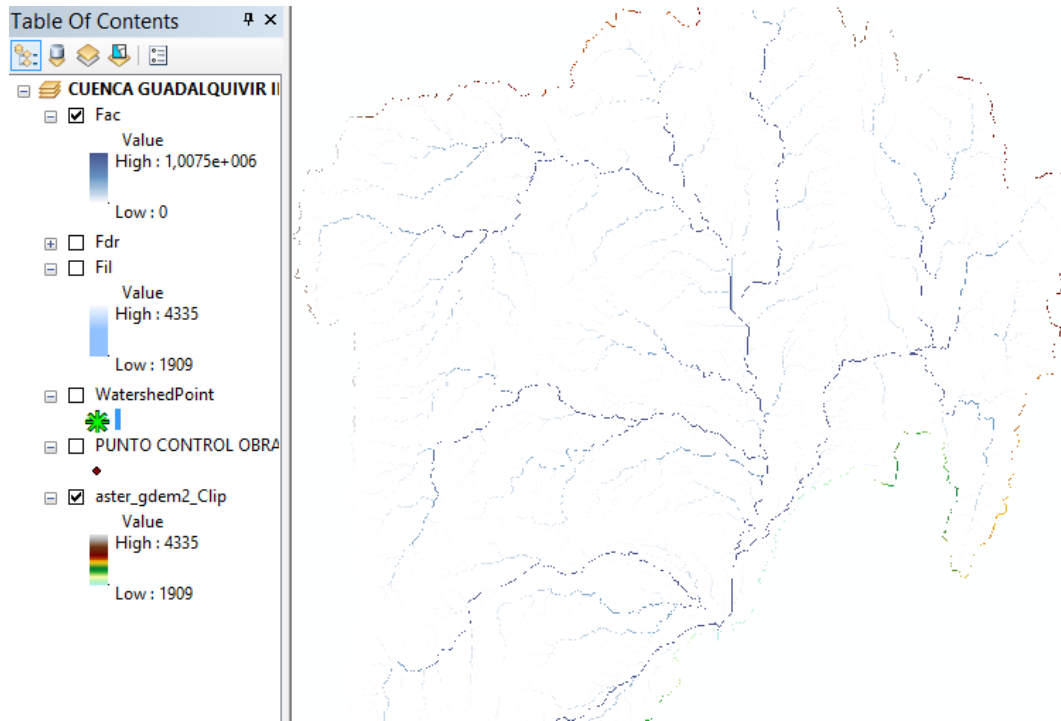
En la ventana se introduce la siguiente información

- ▶ **Flow Direction Grid:** Con esto se indica el mapa de direcciones. En este caso se denomina “Fdr”
- ▶ **Flow Accumulation Grid:** es el nombre del archivo de salida “Fac”



Después de dar clic en aceptar, se obtiene lo siguiente.

Figura 3.5: Acumulación de flujo

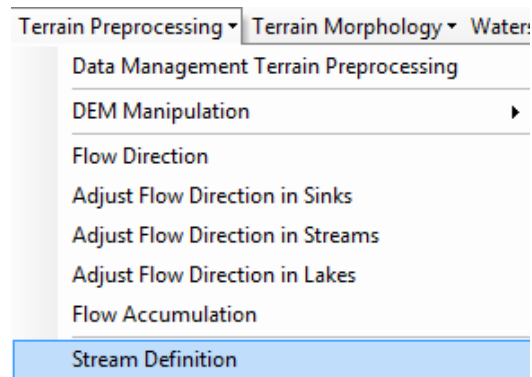


Una vez que se calculan los raster de dirección y acumulación de flujo, se utilizan como insumos para definir el raster de la red de drenaje y de cuencas de acuerdo a los siguientes pasos.

3.1.5 DEFINICIÓN DE CORRIENTE

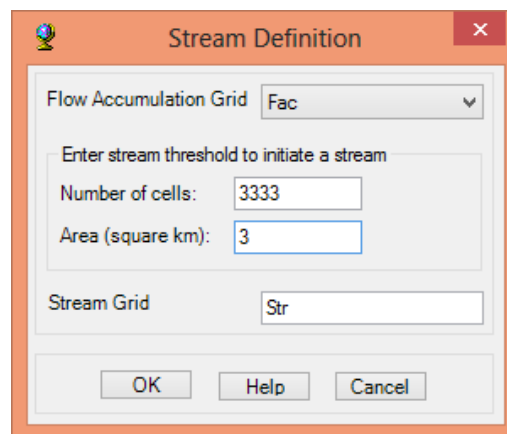
Clasifica todas las celdas con una gran acumulación del flujo y una entrada definida como celdas pertenecientes a la red de drenajes. Es común que celdas con una alta acumulación de corrientes con una estimación de uso definida a la entrada sea considerada parte a la red de corrientes. La entrada de uso específico permite definir un área en unidad de distancia cuadrada, millas cuadradas o como número de celdas. En el **MED** el área de la longitud de drenaje por defecto es 1%.

Paso 3. Se define la red de drenaje de la siguiente forma: Desde **Arc Hydro Tools Toolbar** seleccionar **Terrain Preprocessing** seguido de **Stream definition**.



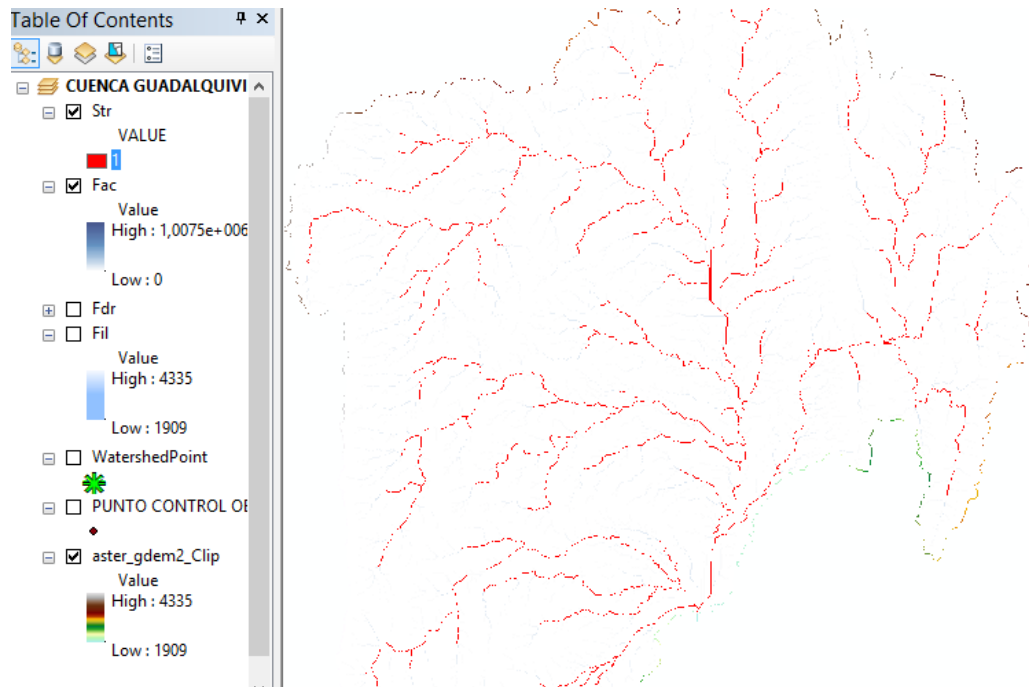
En la ventana que sigue se debe rellenar la siguiente información.

- ▶ **Flow accumulation Grid:** Se introduce el nombre del raster de acumulación de flujo. En este caso se denomina “fac”
- ▶ **Stream Grid:** Es el nombre del archivo de salida. El cual es “Str”
- ▶ **Number of cells:** Es algo así como el número de celdas a lado y lado que utiliza la herramienta para provocar la depresión del drenaje. Se deja el número que muestra automáticamente.
- ▶ **Área (Square km):** con esta opción se puede definir el tamaño de las cuencas en Km² y se puede modificar de acuerdo a las necesidades del estudio a realizar.



Después de indicar la información solicitada y dar clic en OK, el resultado obtenido es...

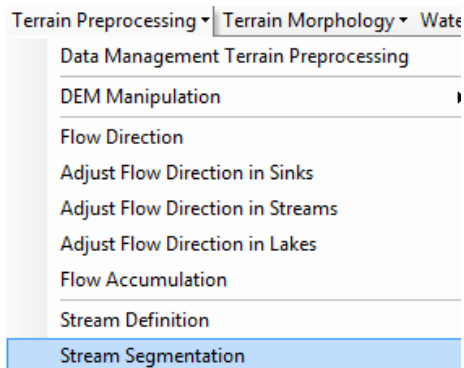
Figura 3.6: Dirección de corriente



3.1.6 SEGMENTACIÓN DE CORRIENTE

Se divide las corrientes en segmentos. La segmentación de corrientes o enlaces son las secciones de una corriente que conecta dos uniones sucesivas, una unión y una salida, o una unión y difusión de drenajes.

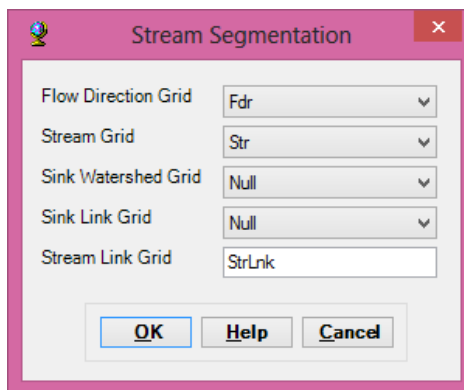
Paso 4. Se define la red de drenaje de la siguiente forma: Desde **Arc Hydro Tools Toolbar** seleccionar **Terrain Preprocessing** seguido de **Stream Segmentation**.



En la ventana que aparece se rellena la siguiente información.

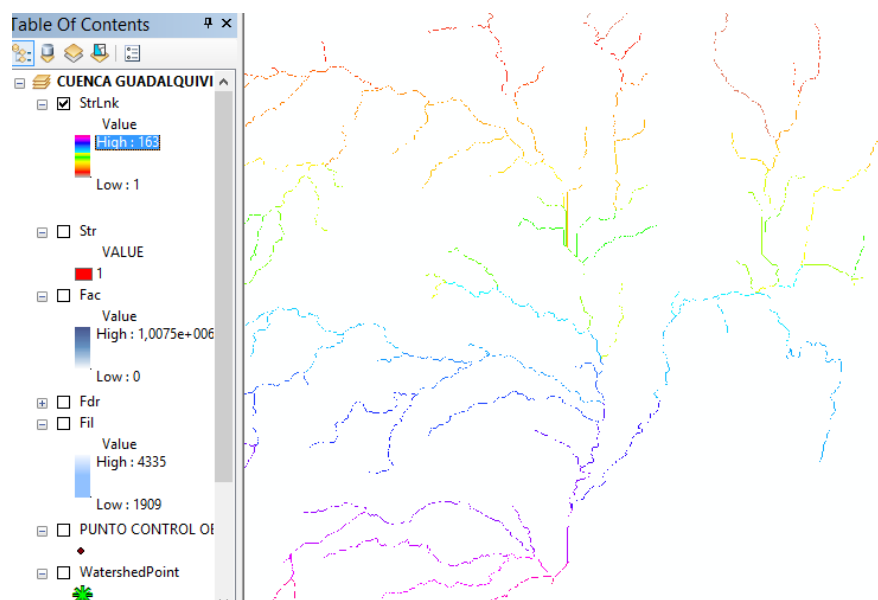
- ▶ **Flow Direction Grid:** Se introduce el nombre del raster de dirección de flujo. En este caso se denomina “Fdr”
- ▶ **Stream Grid:** Se indica el raster de corrientes creado antes. Para este ejemplo es “Str”
- ▶ **Sink Watershed Grid:** Null
- ▶ **Sink Link Grid:** Null
- ▶ **Stream Link Grid:** Nombre del archivo de salida. En este caso será StrLnk.

Figura 3.7: Definir el Umbral Corriente



El resultado obtenido es...

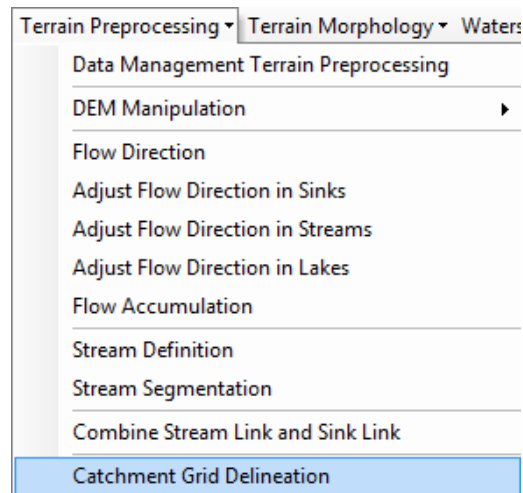
Figura 3.8: Segmentación de Corriente



3.1.7 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

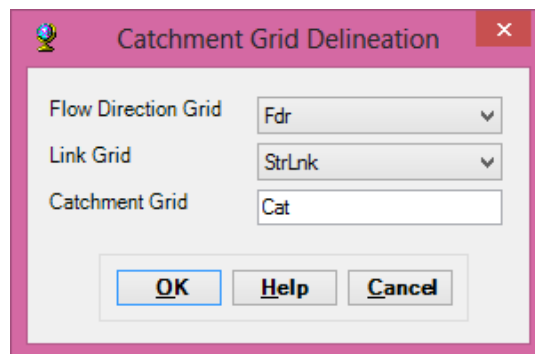
Aquí se delinea la subcuencas para todos los segmentos de corrientes.

Paso 5. Se delimitan las cuencas en **Arc Hydro Tools** toolbar, se selecciona **Terrain Preprocessing** seguido de **Catchment Grid Delineation**.



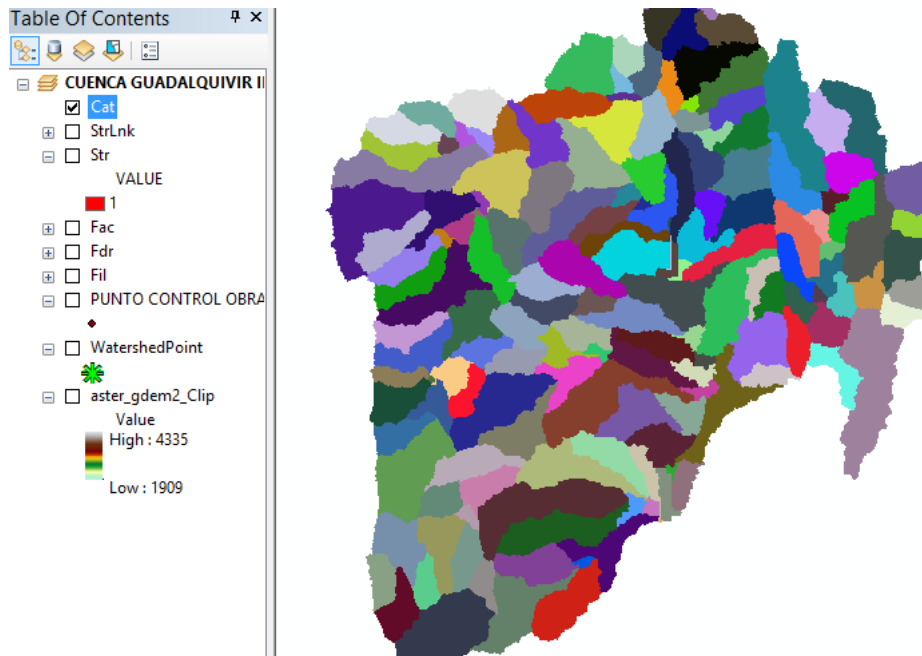
En la ventana que aparece se rellena la siguiente información.

- ▶ **Flow Direction Grid:** Se selecciona el raster de dirección de flujo, cuyo nombre es “fdr”
- ▶ **Link Grid:** Se debe seleccionar el raster de corrientes segmentadas calculado en el paso anterior, cuyo nombre es StrLnk.
- ▶ **Catchment Grid:** Se introduce el nombre con el que se quiere guardar el raster de cuencas, por ejemplo “Cat”



Se presiona OK para obtener el siguiente resultad

Figura 3.9: Delimitación de la Cuenca

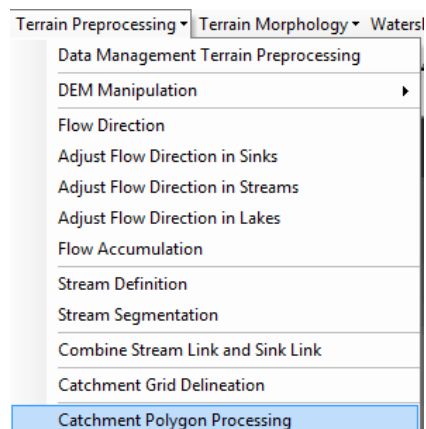


Hasta el momento se han delimitado las cuencas en formato raster. En los pasos siguientes se mostrará cómo obtener las cuencas y la red de drenaje en **formato shape**.

3.1.8 PROCESAMIENTO DE LOS POLÍGONOS DE LAS CUENCAS

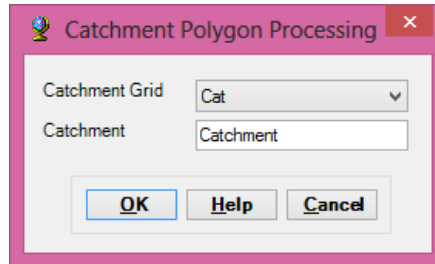
Se convierte las sub-cuenca de representación grid a una representación vectorial. En el cuadro de dialogo, se ingresó en **Catchment Grid “Cat”** y la salida es **Catchment**;

Paso 6. Se convierten las cuencas a polígonos de la siguiente manera: se seleccionó **Arc Hydro Tools, Terrain Preprocessing → Catchment Polygon Processing**, como se muestra en la figura.



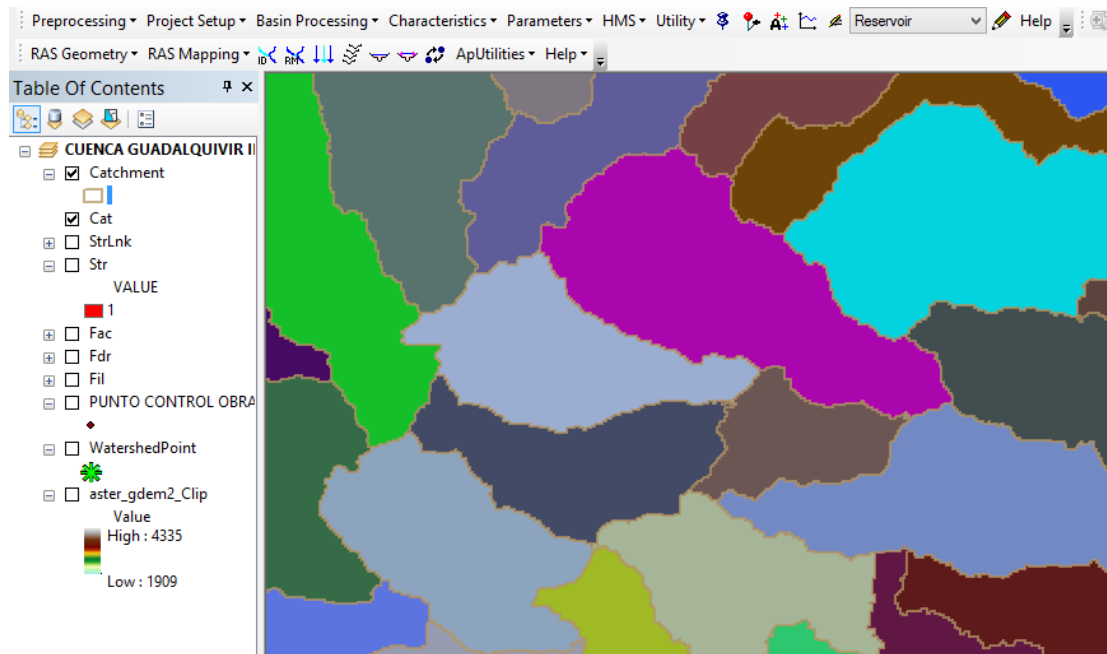
Aparece una ventana donde rellenamos lo siguiente...

- ▶ **Catchment Grid:** Se selecciona el raster de cuencas que se ha calculado en el paso 5 y que se ha denominado “Cat”.
- ▶ **Catchment:** Introducimos el nombre con el que queremos guardar el shape de cuencas, en este caso será “Catchment” .



Al pulsar OK, se muestra en pantalla el shape...

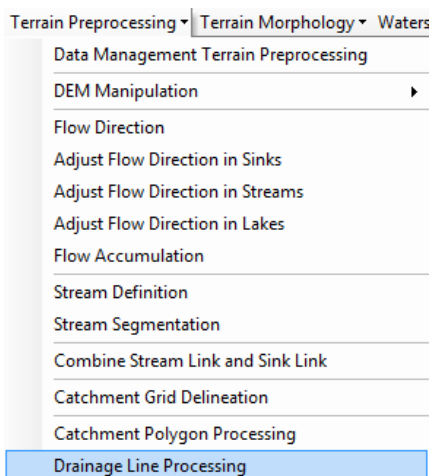
Figura 3.10: Procesamiento de los Polígonos de las Cuencas



3.1.9 PROCESAMIENTO DE LA LÍNEA DE DRENAJE

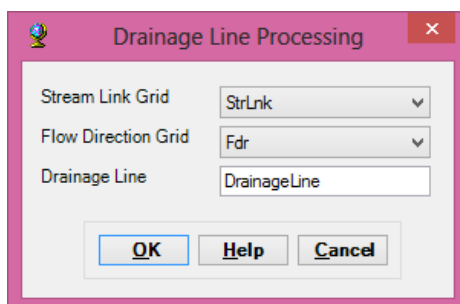
En Arc Hydro Tools toolbar, se selecciona **Terrain Preprocessing** → **Drainage Line Processing**.

Paso 7. Para convertir los drenajes a polilíneas en **Terrain Preprocessing** luego → **Drainage Line Processing**:



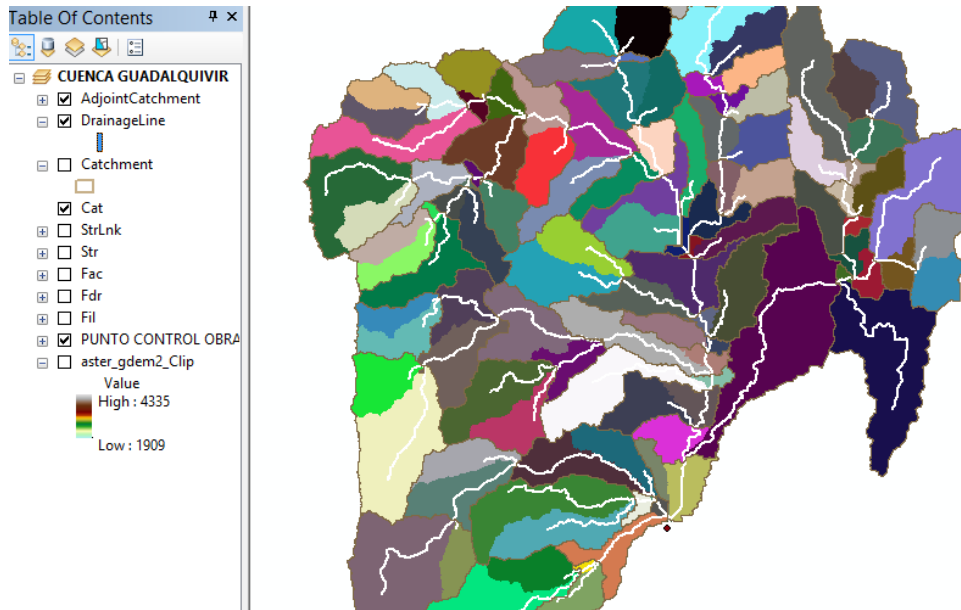
En la ventana que aparece indicamos lo siguiente...

- ▶ **Stream Link Grid:** Se introduce el raster de drenaje segmentado que fue calculado en el paso 4 y que se denominó “StrLnk”
- ▶ **Flow Direction Grid:** Se selecciona el raster de dirección de flujo calculado en el paso 1 y cuyo nombre es “Fdr”
- ▶ **Drainage Line:** Se introduce el nombre con el que se quiere guardar el shape de drenajes, en este caso “DrainageLine”.



El resultado es el siguiente...

Figura 3.11: Procesamiento de la línea de drenaje



De este modo finalmente se han determinado las cuencas y los drenajes principales para una zona determinada, sin embargo se puede calcular una cuenca específica para un punto de interés en particular, para esto necesitamos además de las cuencas ya delimitadas, un archivo con los puntos en los cuales se necesita delimitar las cuencas, para efectos de este ejemplo utilizaremos la estación hidrométrica ubicada en el puente Obrajes, sobre la sub-cuenca del río Guadalquivir.

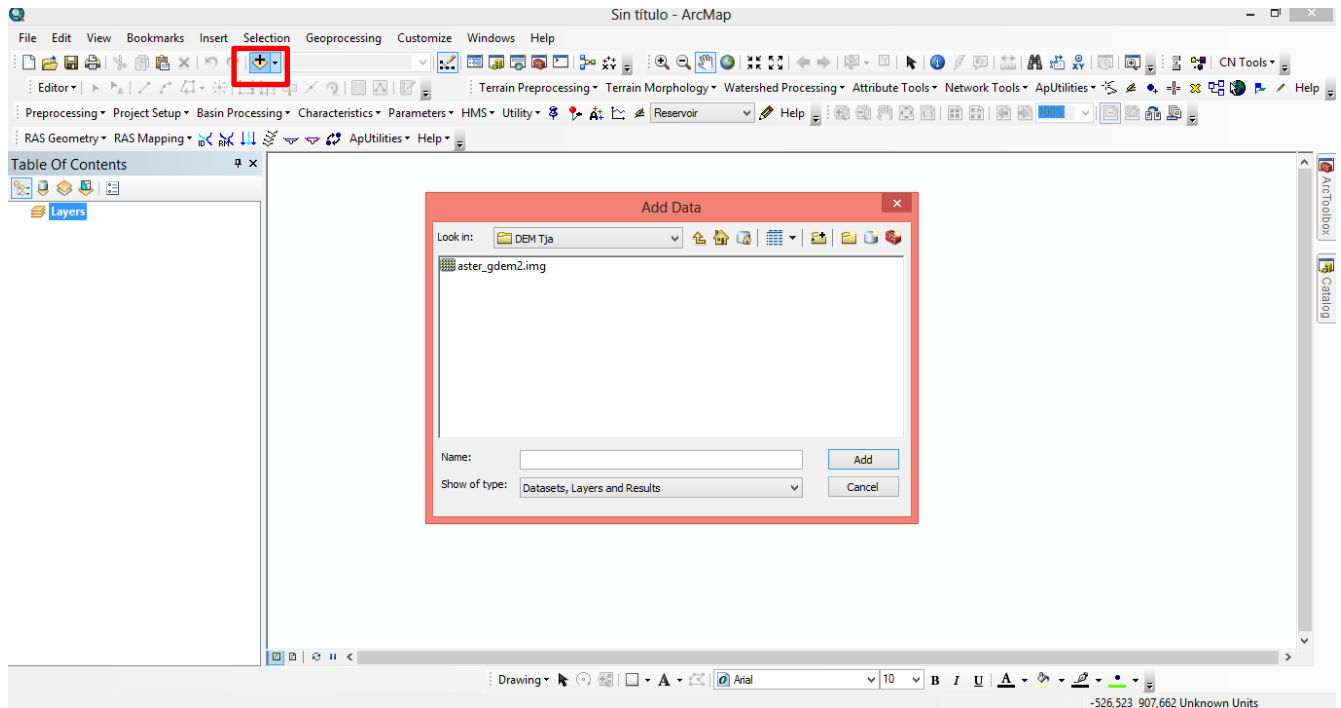
3.1.10 DELIMITACIÓN DE UNA CUENCA ESPECÍFICA

Paso 1. En el proyecto que se ha venido trabajando, se carga la capa con la ubicación de la estación hidrométrica de Obrajes del río Guadalquivir.

Para esto se debe contar con una capa de puntos con las coordenadas X, Y (latitud, longitud) donde se ubica la estación de interés. Se carga de la siguiente manera:

En la barra de herramientas hacer clic en el ícono que se muestra en la siguiente figura (representado por un símbolo de más), enseguida se abrirá una ventana en la que se debe navegar hasta la carpeta en la que se guardó el archivo.

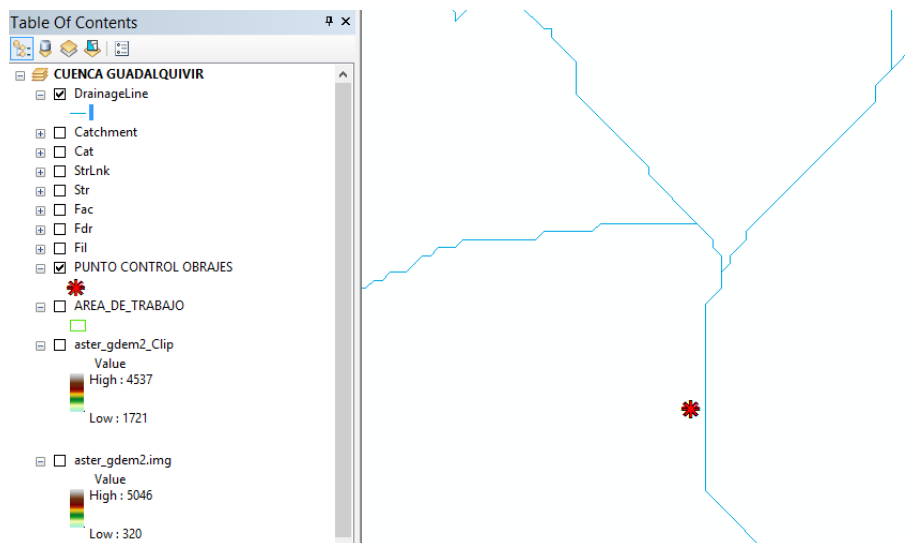
Figura 3.12: Ventana para añadir archivos externos



Al presionar el botón Add (agregar) se cargará la capa (puntos) con la ubicación de la estación utilizada, visualizándose de la siguiente manera:

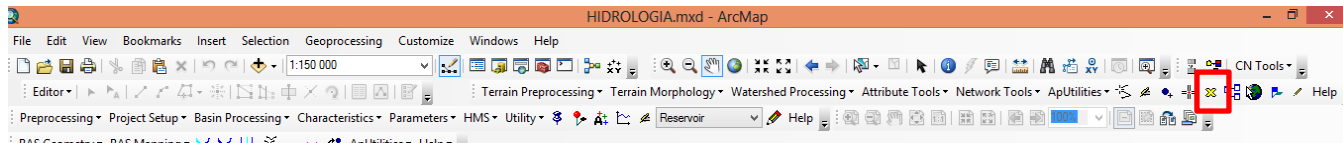
Haciendo un acercamiento se ve lo siguiente:

Figura 3.13: Localización del punto de control



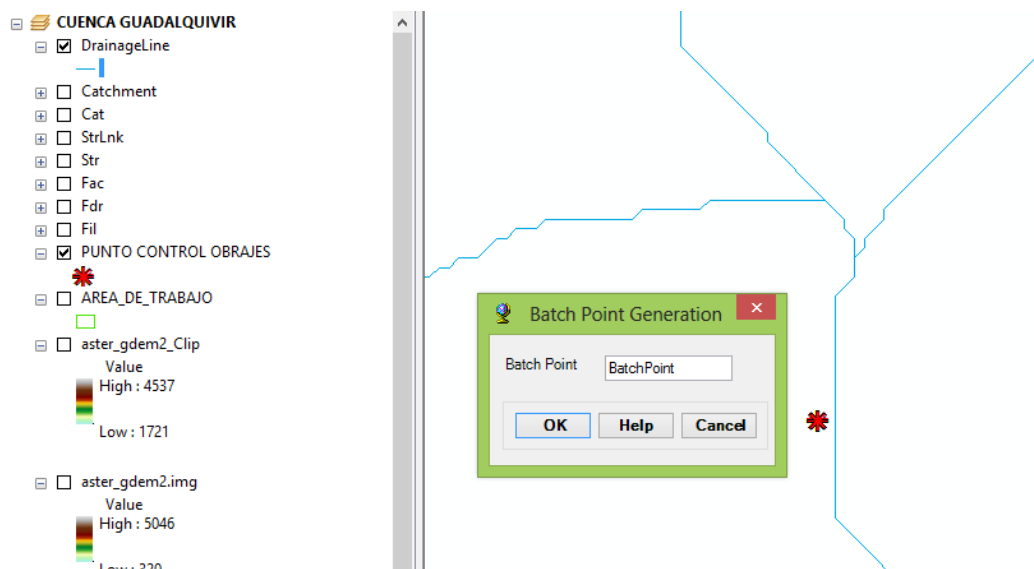
Ahora con **Arc Hydro Tools**, se selecciona el punto de la red de drenaje donde se va a colocar el punto de concentración para el micro cuenca, para ello se procede de la siguiente forma:

En la barra de herramientas de **Arc Hydro Tools**, seleccionar **Batch Point Generation**.



Luego dar clic sobre la red de drenaje, cerca del punto que representa la ubicación del punto de control Puente Obrajes, con lo cual se abre una ventana, donde se presenta la capa que va a guardar los puntos de concentración que se necesitan, esa capa se denomina **BatchPoint**.

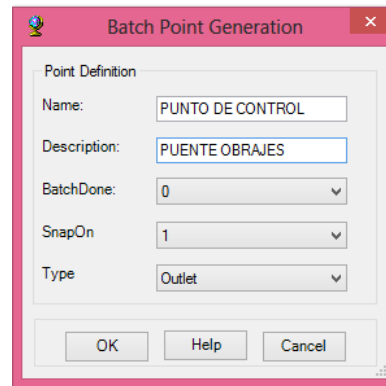
Figura 3.14: Definir el nombre del punto de control



Al dar clic en **OK** se abre otra ventana donde se debe incluir la siguiente información:

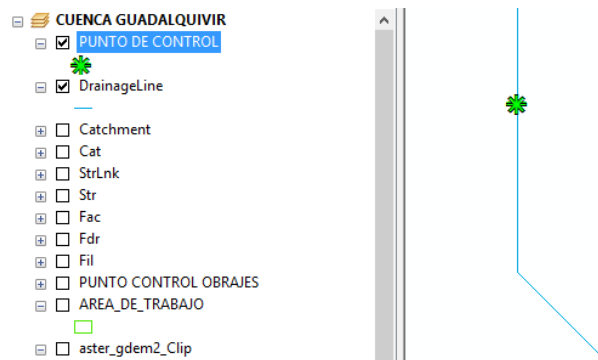
- ▶ **Name:** El nombre para identificar el punto de concentración, en este caso colocamos Punto de Control “PUNTO DE CONTROL”.
- ▶ **Description:** una breve descripción de ese punto “PUENTE OBRAJES”

- ▶ **BatchDone:** si está en cero indica a ArcHydro que es un punto que vamos a agregar, si está en uno dice que este punto ya se ha trabajado
- ▶ **Snap On:** Le decimos a la función que intente localizar el punto lo más cercano a un cauce existente.

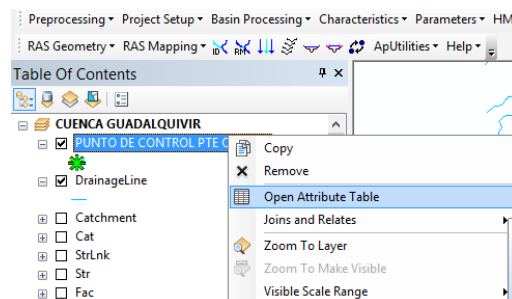


Al dar clic en **OK** se genera una capa con uno de los puntos, en este caso sólo contamos con un punto, sin embargo cuando son más se debe repetir el proceso para cada uno. El resultado es el siguiente:

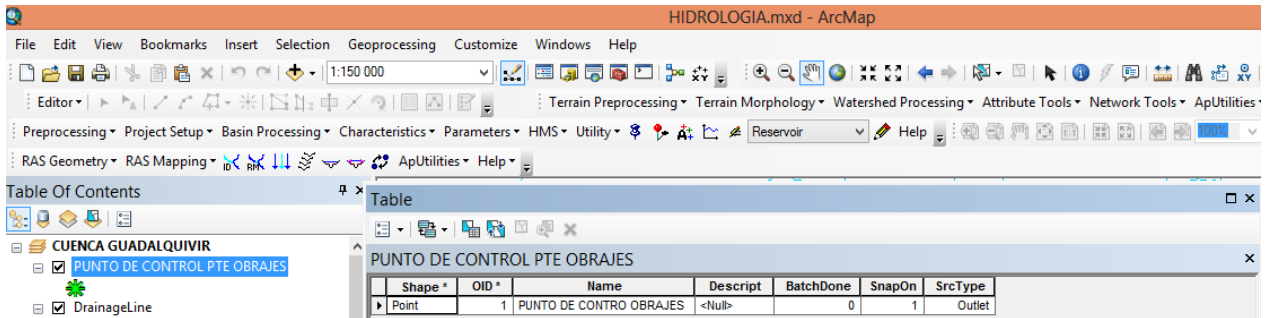
Figura 3.15: Punto de control



Para abrir la tabla de atributos del archivo generado se hace lo siguiente:



y el resultado es:

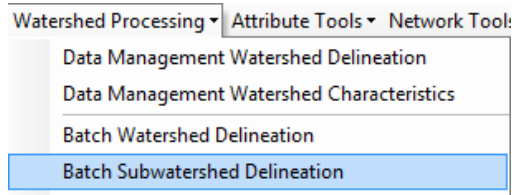


Una vez que los puntos han sido definidos, se procede a definir la cuenca (área de influencia) de cada punto de interés. Para esto **ArcHydro** cuenta con dos funciones:

Batch Watershed delineation. Que permite definir las cuencas donde es posible que se traslapen las áreas delimitadas para cada punto señalado (en caso de que sean varios puntos de interés).

Batch subwatershed delineation. Permite definir las subcuencas independientes, sin que se traslapen.

Para definir cuencas completas, es decir sin que se traslapen en caso de ser dos o más puntos, del menú Watershed Processing de ArcHydro, se selecciona Batch subwatershed delineation.

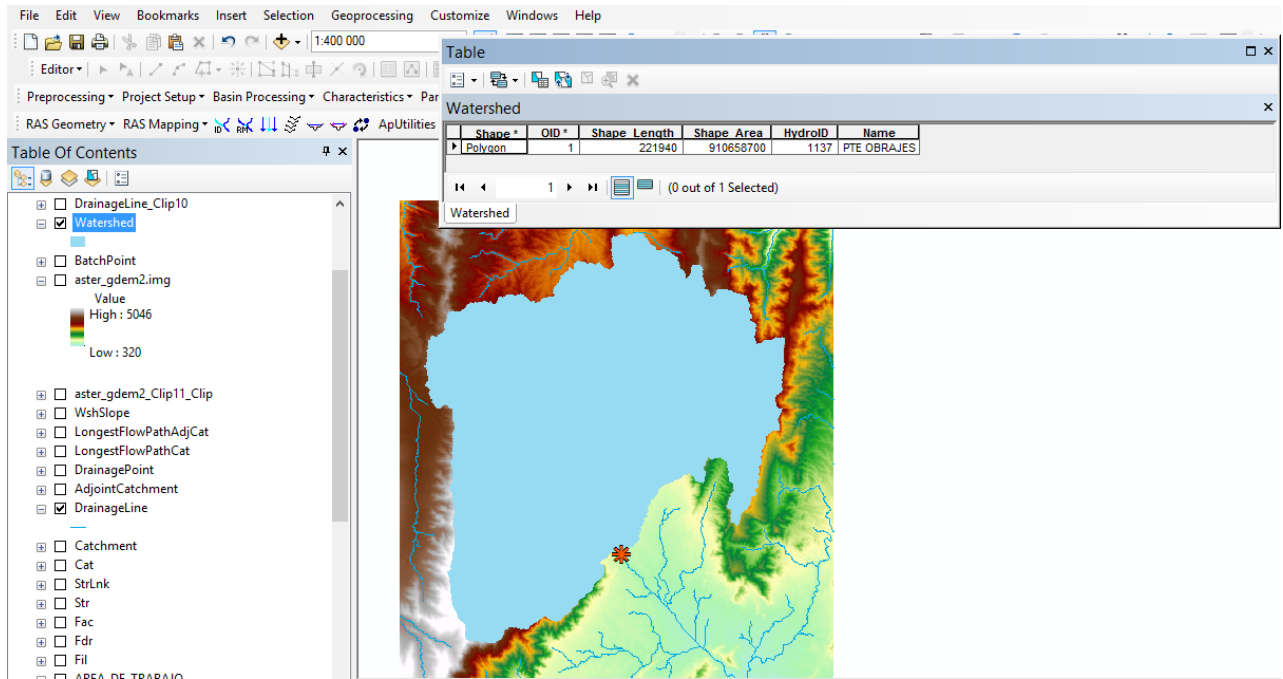


Aparece una nueva ventana, donde debemos asegurarnos de seleccionar los archivos correctos que fueron creados en la delimitación de cuencas para una determinada región.

- ▶ **Flow Direction Grid:** Archivo de dirección de flujo
- ▶ **Stream Grid:** Raster de la red de flujo.
- ▶ **Batch Point:** Archivo de puntos de concentración

- ▶ **Watershed y Watershed Point:** son los nombres de los archivos de salida.

Figura 3.16: Delimitación de la cuenca Guadalquivir con Arc Hydro



De esta forma se ha delimitado una cuenca específica para el punto de interés (punto de control puente Obrajes del río Guadalquivir) con la herramienta ArcHydro para ArcGIS 10.2 (Trial Versión).

3.1.11 AGREGACIÓN DE MICRO CUENCAS

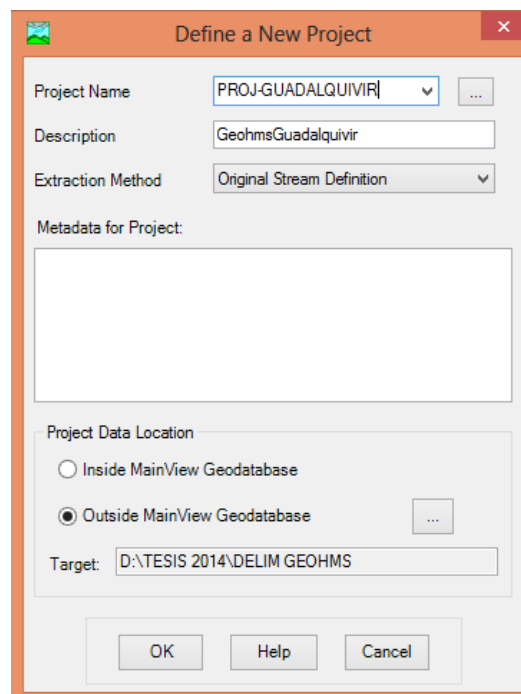
Con este paso se agrega la sub-cuenca desde aguas arriba en cada confluencia. En nuestro caso se trabajó con una cuenca, Éste es un paso que se realiza para mejorar la ejecución de los cálculos en la delimitación de las sub-cuenclas y extracción de los datos. Este paso no tiene significado hidrológico. Los pasos para agregar la cuenca consisten en: seleccionar **Terrain Preprocessing** → **Adjoint catchment processing** y posteriormente confirmar en un cuadro de diálogo que la entrada de la Línea de Drenaje es “**DrainagerLine**” y “**Catchment**”. La salida **Adjoint Catchment** es “**AdjointCatchment**”, para aceptar es paso presión OK.

3.1.12 INICIO DE UN NUEVO PROYECTO

En el menú **Projec Setup** dentro del HEC-GEOHMS, es el responsable para extraer los datos que serán usados en el desarrollo de la información necesaria para crear un proyecto HEC-HMS. El HEC-GEOHMS exporta los datos del área de drenaje aguas arriba para definir el punto de descarga. En una nueva estructura del ArcMap se especifica los datos del nuevo proyecto en la herramienta del HEC-GEOHMS Projec View se crea el nuevo archivo para el HEC-HMS project.

Desde el HEC-GEOHMS se seleccionó **Project Setup** → **Start New Project** se ingresó el nombre del nuevo proyecto y la descripción, como se muestra en la figura.

Figura 3.17: Ventana para definir nuevo proyecto




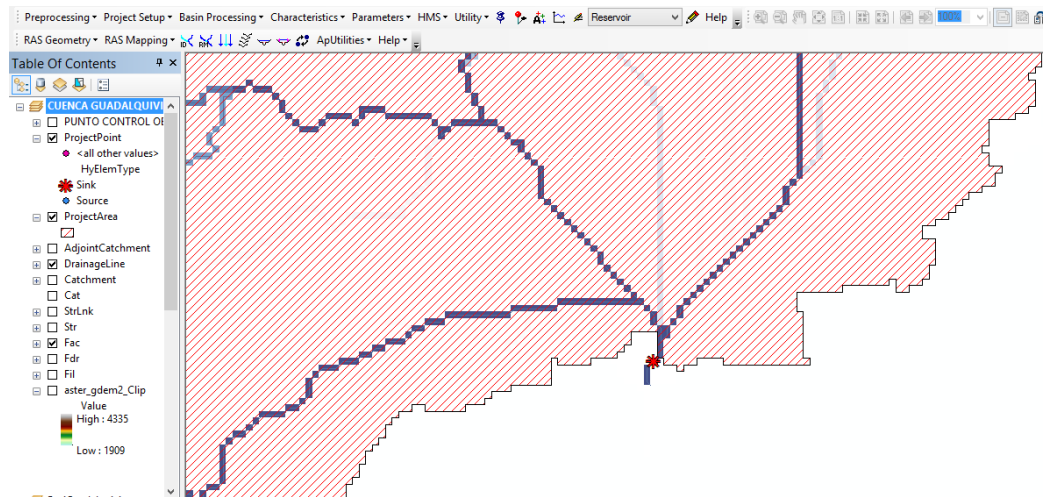
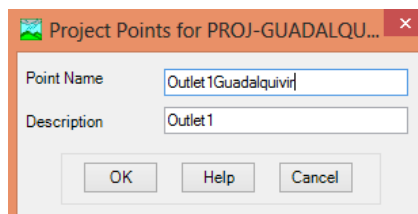
Luego se selecciona **Add Project Points**, se hace click en  para especificar el punto de descarga para el modelo de cuenca tributaria, como se muestra en la *figura 3.18*.

Figura 3.18: Definido el punto de descarga o salida



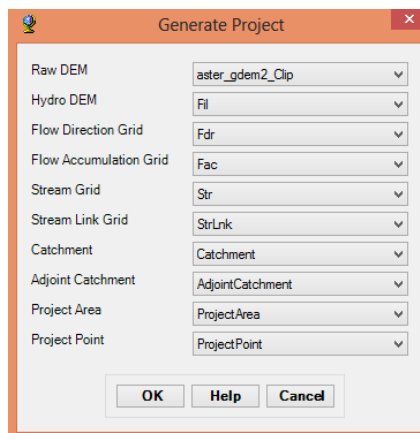
Luego se le da nombre al punto de descarga, aceptando en el dialogo los nombres por defecto, **Outlet-Guadalquivir** y la descripción **outlet 1**, presionar ok.

Figura 3.19: Editor de punto de proyecto



Se selecciona **HMS Project Setup** → **Generate Project**, generando así el proyecto, se pulsa **OK**.

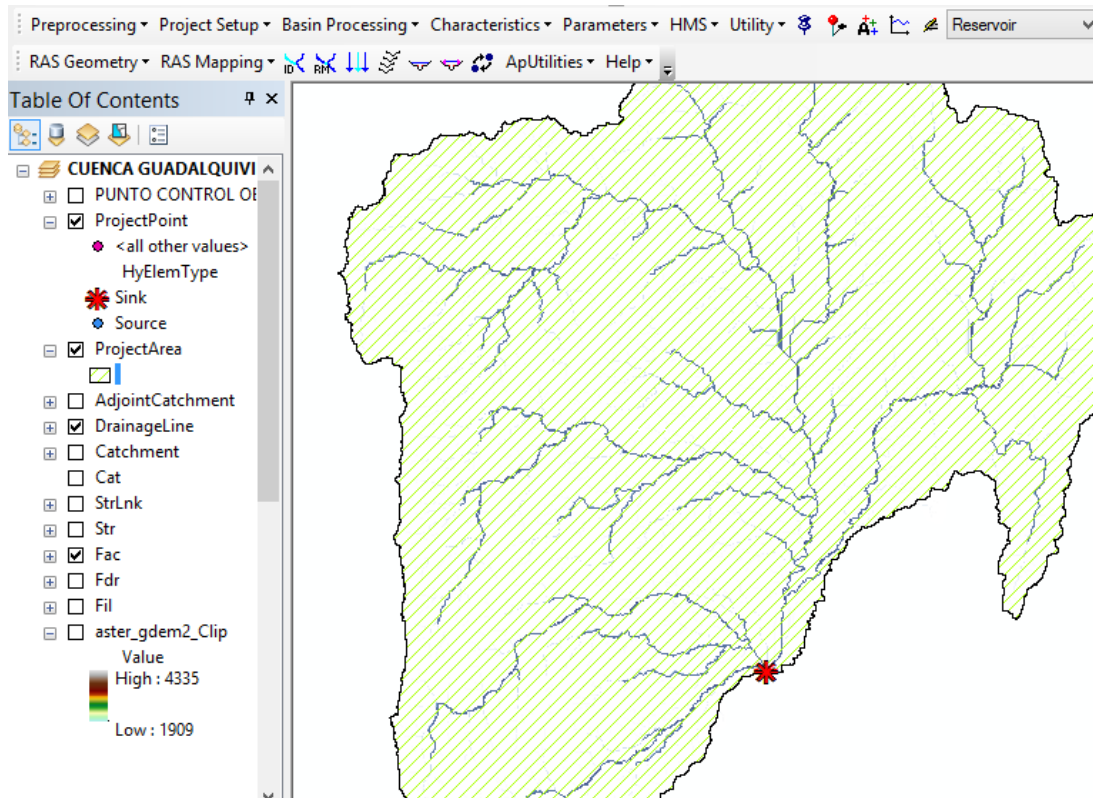
Figura 3.20: Definir datos del proyecto



Presiono ok, aceptando el nombre por defecto **New Project Layer Name**.

Al mostrar la ventana para crear **Generate Project** se pulsa yes, y genera la *figura 3.21*.

Figura 3.21: Área del nuevo proyecto

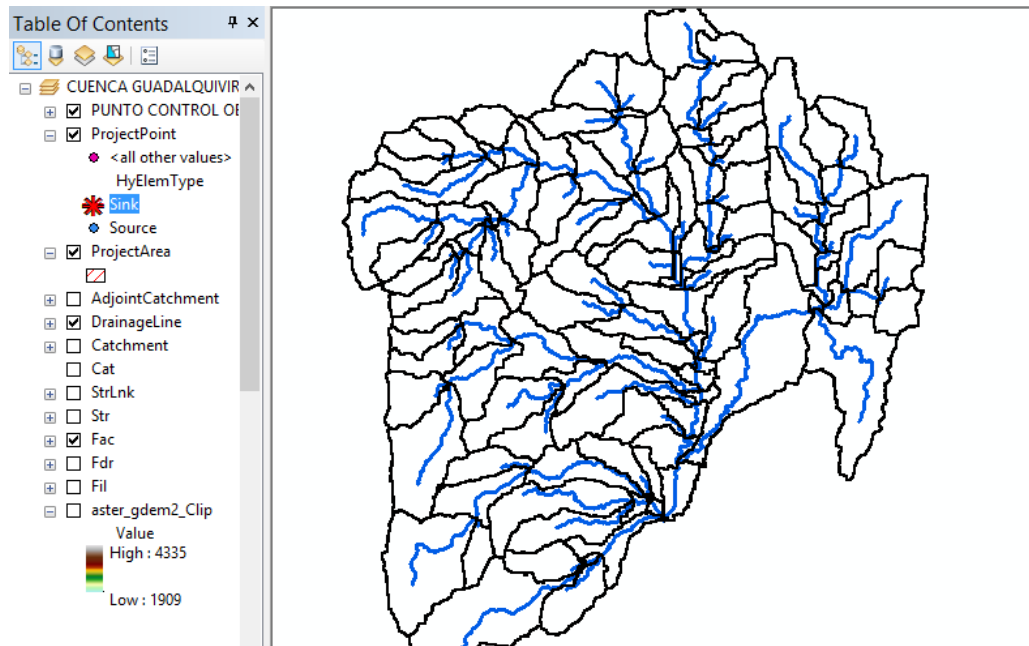


Los datos de interés se obtienen del área de descarga y se agregan a la estructura de datos del nuevo proyecto (**ProjGuadalquivir**). Estos datos serán usados por un proceso básico adicional (Basin processing), extrayendo las características básicas y desarrollando la entrada para el HEC-HMS.

3.1.13 PROCESAMIENTO DE LA CUENCA

Una vez terminado el proceso de extracción de la cuenca de estudio los datos aparecerán en la ventana “**ProjGuadalquivir**”.


Figura 3.22: Vista de ArcGIS una vez extraída la cuenca de estudio.



Como se puede observar en la figura anterior hay un número elevado de subcuencas, ya que HEC-GeoHMS ha delineado una subcuenca para cada tramo de cauce. Trabajar con este esquema propuesto por el programa es absurdo ya que por un lado no es necesario calcular los caudales en tantos puntos (se obtendrá un valor de caudal para punto de unión entre cauces), y por otro lado el tiempo de trabajo se alargará considerablemente al tener que calcular los parámetros hidrológicos de tantas subcuencas. Con el procesado de la cuenca se unirán y/o dividirán las subcuencas a criterio del usuario, para obtener los caudales únicamente en los puntos en los que el usuario lo desee.

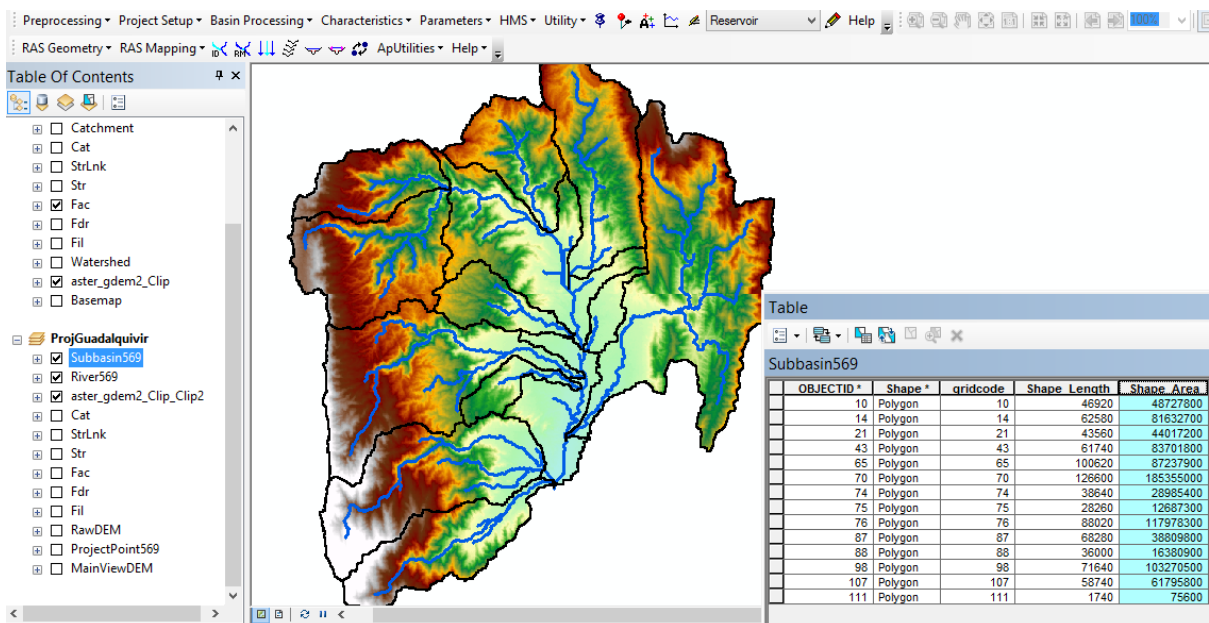
En este caso se ha optado por realizar una modelización semidistribuida, dejando solamente ***Trece subcuencas***, definidas por los puntos de unión entre los tramos fluviales más importantes.

PASOS A SEGUIR:

Se hace un **Basin Merge** para unificar la cuenca, seleccionando la herramienta Features , **Basin Processing** y luego **Basin Merge**. Considera la cuenca como un todo y la separa de lo que sería su vertiente.

Se obtendrán las características físicas de la cuenca, las cuales serán utilizadas posteriormente para determinar los parámetros útiles para la modelación hidrológica se podrán obtener las siguientes características físicas; perfil del río (**River Profile**), longitud de ríos (**River Length**), pendiente de ríos (**River Slope**), centroide de la cuenca (**Basin Centroid**), elevación del centroide (**Centroid Elevation**), longitud del tributario más largo (**Longest Flow Path**), longitud del flujo al centroide (**Centroidal Flow Path**).

Figura 3.23: Procesamiento de la cuenca Guadalquivir



3.1.14 PERFIL DEL RÍO


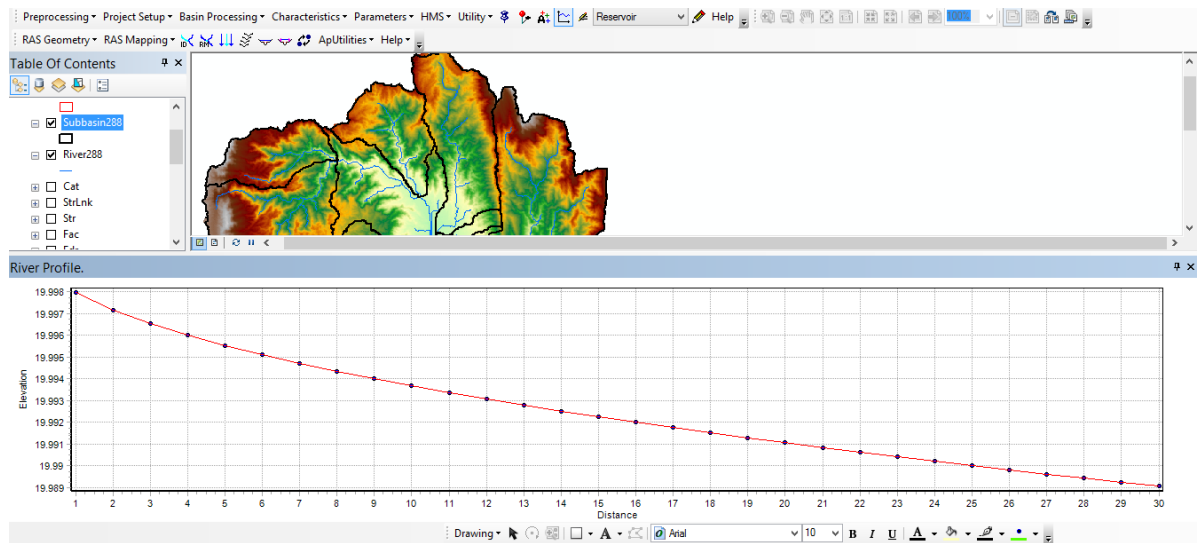
Seleccionar la herramienta  **River Profile**, verificando las propiedades de identificación que aparecen en el dialogo. Se muestra el perfil del río en la parte inferior de la imagen en pantalla.

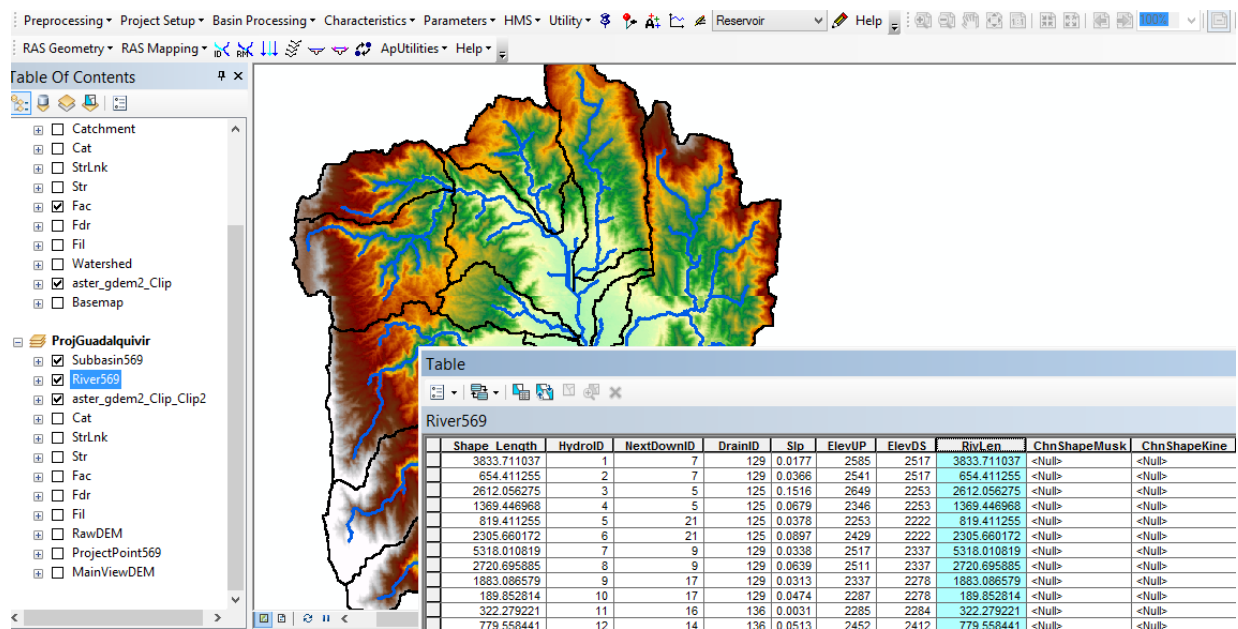
Figura 3.24: Perfil del Río



3.1.15 LONGITUD DEL RÍO

Los pasos para aplicar esta opción consisten en: seleccionar **Basin Characteristics**, eligiendo **River Length**. Luego se presiona **OK** para aceptar la opción de cálculo de la longitud de los ríos. Esta opción muestra una tabla de atributos donde se estimaron las longitudes de los ríos.

Figura 3.25: Tabla de atributos para la longitud del río

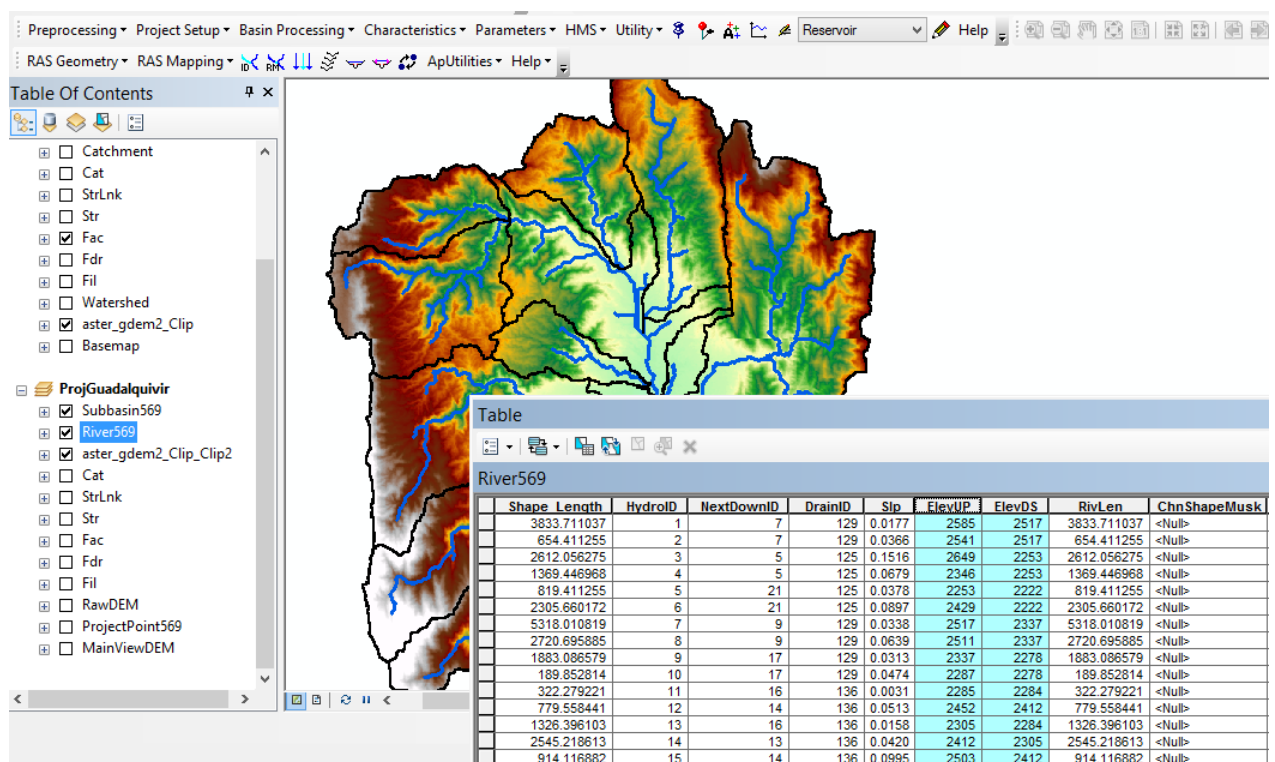


3.1.16 PENDIENTE DE RÍOS

El programa determina la elevación de los tramos de ríos aguas arriba y aguas abajo y en base a ello calcula las pendientes. Los pasos para aplicar esta opción implican; seleccionar **Basin Characteristics** → **River Slope**; seleccionando metros (**meters**) para la unidades verticales del MDT en el cuadro de dialogo **DEM Vertil Units**.

En la tabla de atributos se sumarán las columnas de elevaciones “**EleveUP**” y “**ElevDS**”.

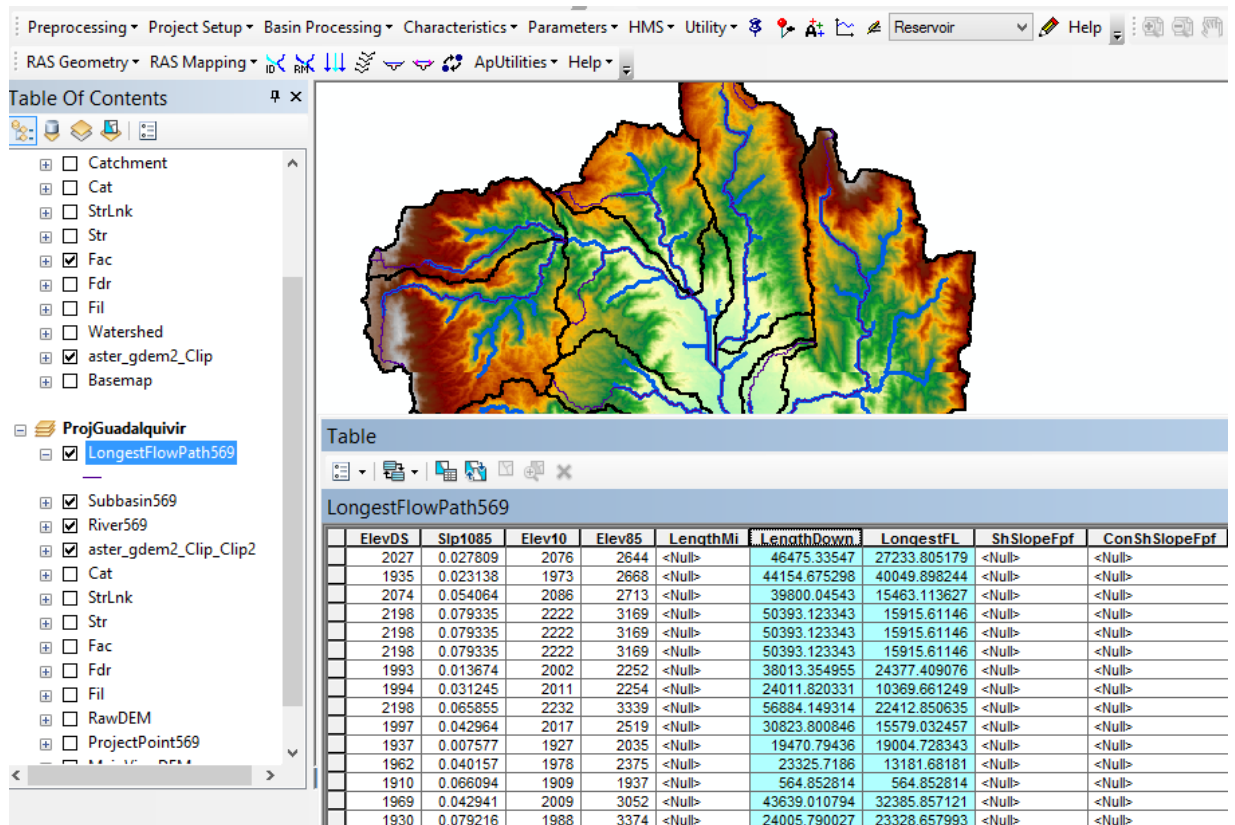
Figura 3.26: Tabla de atributo para las pendientes de ríos



3.1.17 TRAYECTO DE LA LONGITUD DEL RÍO

Seleccionado **Basin Characteristics** y luego **Longst Flow Path**, el programa computa las longitudes y agrega esta nueva columna **LongestFL** a la tabla de atributos.

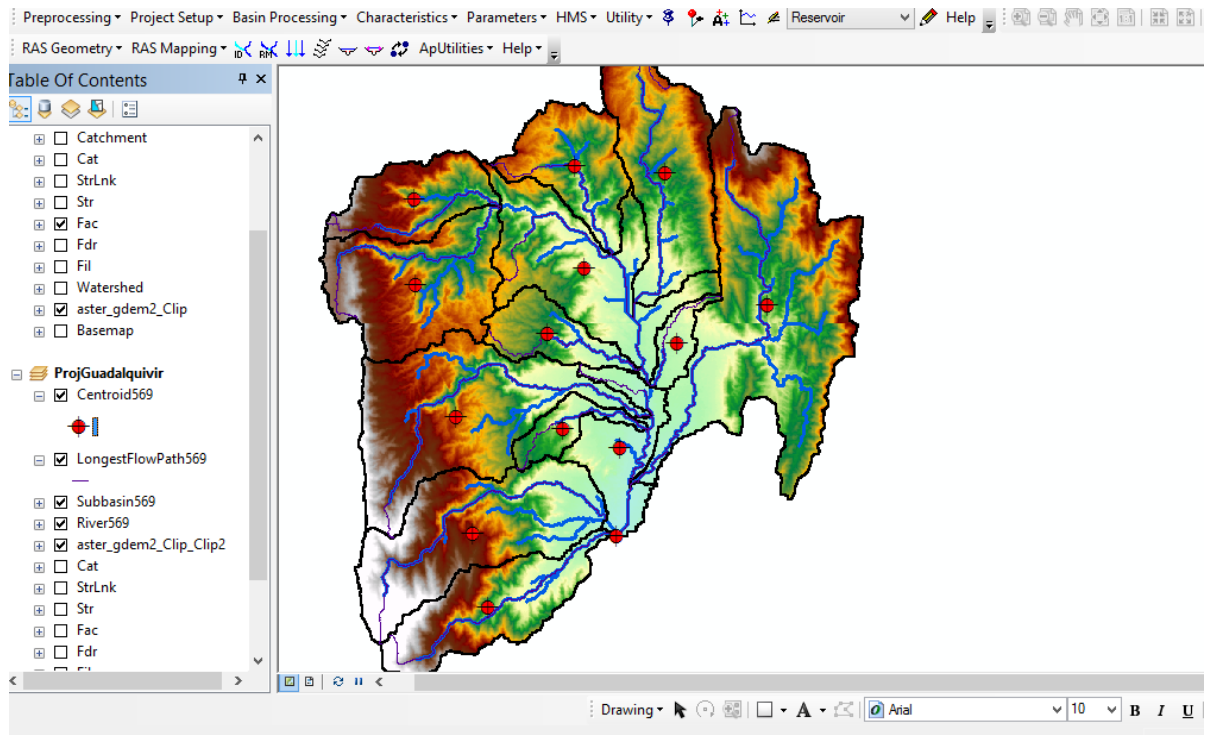
Figura 3.27: Creación del trayecto de la longitud del río



3.1.18 CENTROIDE DE LA CUENCA

El centroide, se estima mediante tres métodos: centro de gravedad, longitud del río más largo y el punto medio del área de la cuenca. Los pasos a usar esta opción son; seleccionar **Basin Characteristics**, luego la opción **Basin Centroid**. Para este estudio se seleccionó el método del Centro de Gravedad, **Center of Gravity Method**.

Figura 3.28: Metodo de centro de gravedad para el centroide de la cuenca

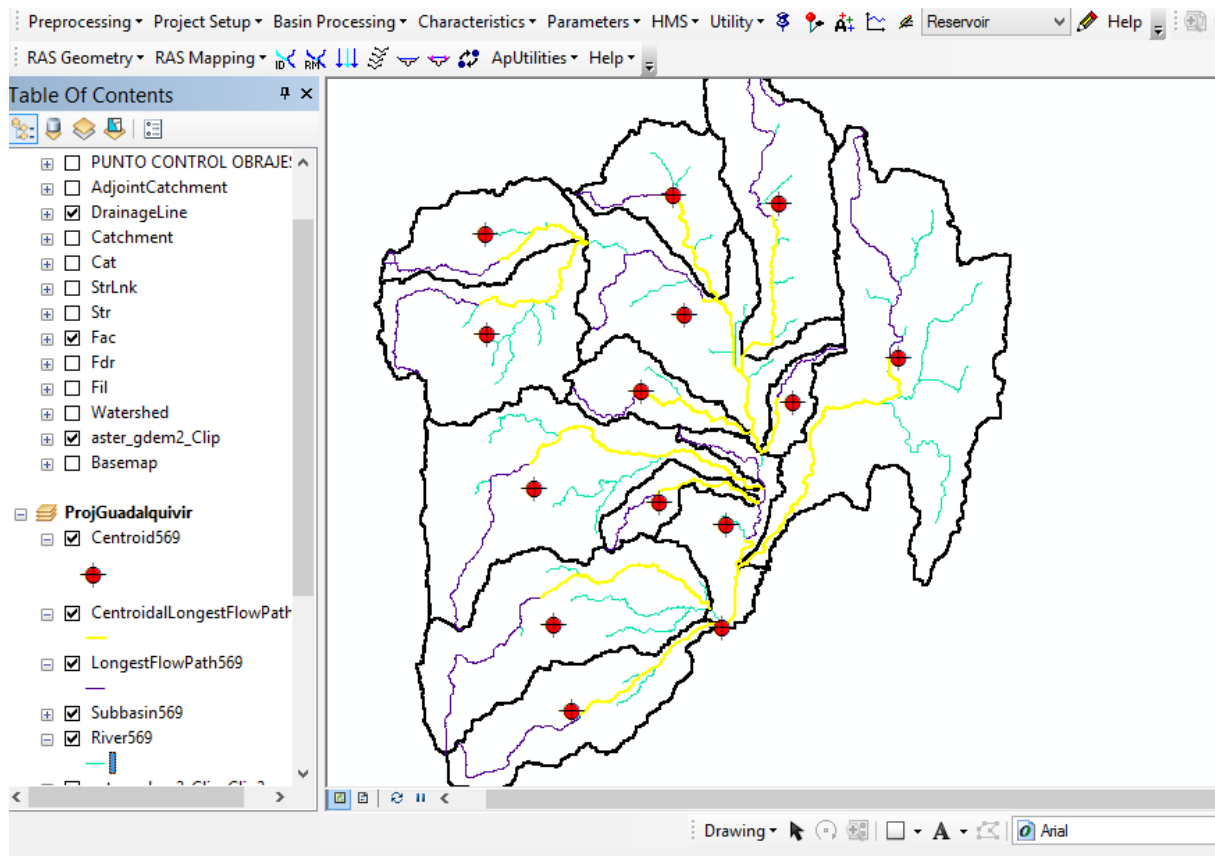


3.1.19 ELEVACIÓN DEL CENTROIDE

Seleccionado **Basin Characteristics**, luego la opción **Centroid Elevation**. Haciendo el nuevo MED, seleccionando centroid layers, se acepta **OK**. Se agrega una nueva columna elevation field a la tabla de atributos del centroide.

3.1.20 TRAYECTORIA DEL RÍO CENTROIDAL

La longitud del flujo centroidal se mide desde el punto proyección del centroide sobre la longitud del flujo más larga hasta la salida de la sub-cuenca, se escoge **Basin characteristics** y luego la opción **Centroidal Flow Path**. Se acepta por defecto el nombre en el dialogo para el **centroidal longest flow path**. **OK**.

Figura 3.29: Longitud del centroide en la trayectoria del río

3.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE (CN)

El número de curva (CN) es un parámetro hidrológico ampliamente difundido, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, para el cálculo de la precipitación neta a partir de la precipitación total caída en un área. La determinación del CN a partir de la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se basa en el la *pendiente, el tipo de suelo (definido en base a su textura) y los usos de suelo.*

3.2.1 MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN)

El método para la obtención del Número de Curva mediante herramientas SIG requieren cierta experiencia y habilidad en el trabajo con SIG, ya que hay que realizar continuas modificaciones en las tablas de atributos, creando nuevos campos, realizando uniones entre tablas, combinando campos, reclasificando distintas tablas y multiplicándolas, etc.

El método está basado en la publicación del CEDEX “Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica” de (Teodoro Estrela¹, Montserrat Ferrer y Joaquín Rodríguez²)

En la *Tabla 3.15* se muestran los valores del número de curva deducidos del parámetro umbral de escorrentía, P_0 , utilizado en el trabajo de Témex (1978). Ambos están relacionados por la expresión siguiente:

$$CN = \frac{5000}{(50 - P_0)}$$

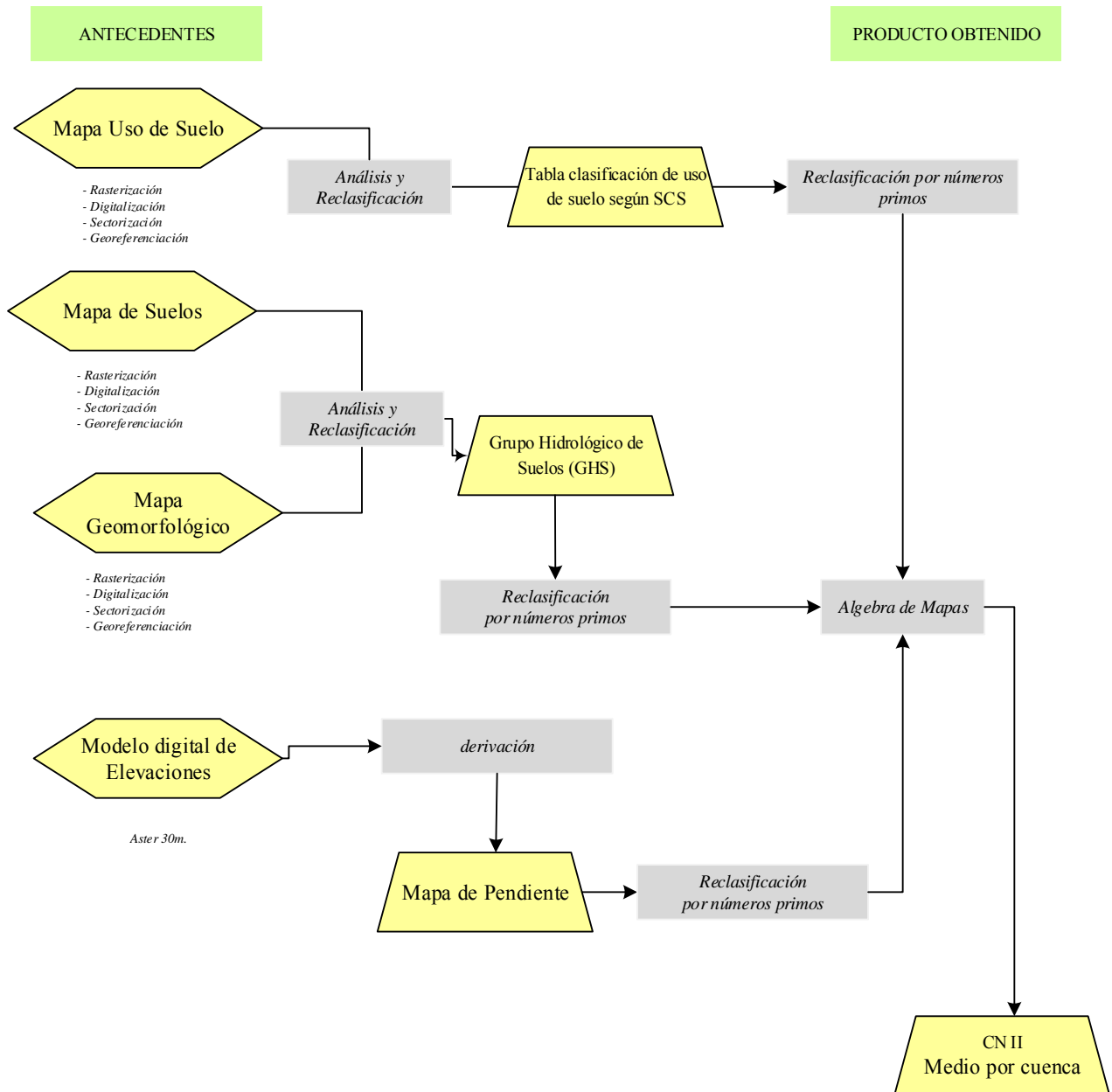
Como se observa en la *Tabla 3.15*, el valor del parámetro número de curva para condiciones medias de humedad en el suelo depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo.

¹ Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA

² Universidad Politécnica de Valencia

La construcción se basó en el procedimiento especificado según secuencia de la *figura 3.30*:

Figura 3.30: Flujograma de las operaciones realizadas



Fuente: Elaboración propia

A continuación se describe el proceso seguido para generar los mapas matriciales (también llamados capas de información) de cada una de las variables que intervienen en la determinación del número de curva, y la forma en que se superponen y establecen las relaciones necesarias para generar dicho mapa. En el presente trabajo, se ha utilizado el ArcGIS, desarrollado por ESRI (Environmental System Research Institute, compañía fundada en 1969).

3.2.2 GENERACIÓN DE (CN) CON LA PUBLICACIÓN DEL CEDEX

La metodología seguida para combinar las capas de información y obtener el número de curva se presentó en un informe del CEDEX³ (1994) realizado con la colaboración del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV⁴. A cada una de las variables que interviene en la obtención del número de curva se le asignó un número primo, considerando que la característica hidrológica era única (*Tabla 3.7*). Los mapas de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores, excepto el de pendientes, ya que sus valores ya coincidían con los correspondientes números primos (1 y 2).

La metodología es la siguiente:

- » Clasificar la leyenda geológica a grupos hidrológicos del suelo, según la *Tabla 3.4*.
- » Generar el mapa de pendientes y clasificar en dos grupos: $< 3\%$ y $\geq 3\%$. Después hay que reclasificar, asignando el valor 1 a las celdas con pendiente inferior al 3% y el valor 2 a las celdas con pendiente igual o superior al 3%.
- » Clasificar los usos del suelo de acuerdo a la leyenda propuesta en el método. Una propuesta se recoge en la *Tabla 3.5*.
- » Convertir a raster los shapefiles de tipos y usos de suelo, con tamaño de celda igual al del MDE.

³ Centro de Estudios y Experimentación de
Obra Públicas - Ministerio de Fomento

⁴ Universidad Politécnica de Valencia

- » Reclasificar pendientes, tipos y usos de suelo de acuerdo a la *Tabla 3.7* de números primos.
- » Multiplicar las tres capas con “Spatial Analyst”. Como están en formato raster se pueden multiplicar (el formato raster se trata matemáticamente como una matriz, esa es su principal ventaja). El motivo de hacer una reclasificación con números primos es que al multiplicar las tres capas reclasificadas solo habrá un único número expresado como combinación de las tres variables que condicionan el valor del número de curva.
- » Por último hay que deshacer la reclasificación pasando de números primos a números de curva, utilizando las *tablas 3.8* y *3.9*. Así a cada número primo le corresponderá un número de curva.

A continuación se muestran las tablas usadas en el método:

3.2.2.1 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA

La información geológica corresponde a los mapas geológicos editados por El Proyecto ZONISIG, cuyo nombre completo es “Proyecto de Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia”. El CD contiene los datos básicos que han sido generados por el ZONISIG durante el período 1993-2001 y el proyecto APDS⁵ durante el período de 1999-2001, a escala 1:250.000 y en formato ILWIS, versión 2.2.3 y ArcInfo, versión 3.5.1. Este último formato permite además la recuperación y el despliegue de la información en formato ArcView.

El tratamiento a realizar con la información geológica es asignarle a cada elemento de la leyenda un grupo hidrológico del suelo A, B, C o D. La asignación de un grupo hidrológico a una clase geológica no es directa, por lo que hay que realizar un estudio de la memoria geológica de cada hoja, donde se dan indicaciones más precisas de cada tipo de suelo.

⁵ Apoyo a la Planificación del Desarrollo Sostenible

A.- TIPO DE SUELO HIDROLÓGICO

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C, D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

Tabla 3.1: Clasificación hidrológica de los suelos

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla: Suelos muy permeables
B	Arenas finas y limos
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla
D	Arcilla en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub horizontes de roca sana; suelos muy impermeables

Fuente: ZNISIG – 2001

Para realizar la clasificación a unos de los cuatro grupos hidrológicos se tomó en cuenta la siguiente característica de los suelos: tipo de textura⁶. La combinación de estas dos variables y su procesamiento en un Sistema de Información Geográfica, nos permitió asignar el grupo hidrológico a un determinado suelo.

Textura. Se utilizó los diferentes tipos texturales que se encuentran en el Departamento (se ha utilizado las texturas modales)

Tabla 3.2: Tipos texturales

Símbolo	Textura
A	Arenosa
AF	arenosa - franca
F	Franca
FA	franco - arenosa
FL	franco - limosa
FY	franco - arcillosa
FYA	franco arcillo arenosa
FYL	franco arcillo limosa
Y	Arcillosa
YL	arcillo - limosa

Fuente: ZNISIG – 2001

⁶ Toda esta información proviene de la base de datos de la Zonificación Agroecológica y Socioeconómica del Departamento de Tarija (ZONISIG-2001)

3.2.2.2 MAPA DE TIPOS DE SUELO

Para realizar la clasificación a uno de los cuatro grupos hidrológicos se tomó en cuenta la siguiente característica de los suelos: **tipo de textura** y **tipo de suelo** el cual se tiene 38 tipos en Tarija como se muestra en la *tabla 3.3*:

Tabla 3.3: Leyenda mapa de suelos Tarija

Código mapa	Descripción
1	Consociación Leptosol
2	Asociación Leptosol - Cambisol - Regosol
3	Asociación Leptosol - Cambisol - Phaeozem
4	Asociación Leptosol - Phaeozem
5	Asociación Leptosol - Calcisol
6	Consociación Regosol
7	Asociación Regosol - Leptosol
8	Asociación Regosol - Fluvisol
9	Asociación Regosol - Solonetz- lixisol
10	Asociación Regosol - Lixisol
11	Asociación Fluvisol - Cambisol
12	Asociación Fluvisol - Solonchak
13	Consociación Cambisol
14	Asociación Cambisol - Leptosol
15	Asociación Cambisol - Fluvisol
16	Asociación Cambisol - Phaeozem
17	Asociación Cambisol - Calcisol - Solonchak
18	Asociación Cambisol - Solonchak
19	Asociación Cambisol - Lixisol
20	Consociación Phaeozem
21	Asociación Phaeozem - Fluvisol
22	Asociación Phaeozem - Cambisol
23	Asociación Phaeozem - Lixisol
24	Consociación Greyzem
25	Asociación Greyzem - Fluvisol
26	Asociación Greyzem - Cambisol
27	Asociación Greyzem - Lixisol
28	Consociación Calcisol
29	Asociación Calcisol - Arenosol
30	Asociación Calcisol - Cambisol
31	Asociación Calcisol - Phaeozem
32	Asociación Calcisol - Greyzem
33	Asociación Calcisol - Lixisol
34	Consociación Lixisol
35	Asociación Lixisol - Fluvisol

Código mapa	Descripción
36	Asociación Lixisol - Cambisol
37	Asociación Lixisol - Phaeozem
38	Asociación Lixisol - Calcisol

Fuente: Información ZONISIG

La combinación de estas dos variables y su procesamiento en un Sistema de Información Geográfica, nos permitió asignar el grupo hidrológico a un determinado suelo, tomando como unidad, al tipo de uso. Uno de los campos de la tabla de datos asociada es la textura. Dado que esta variable se define según su textura, con este dato se ha generado un mapa, y a cada clase se le ha asignado un tipo de suelo (A, B, C o D) de la clasificación utilizada por el SCS como se muestra en la siguiente tabla:

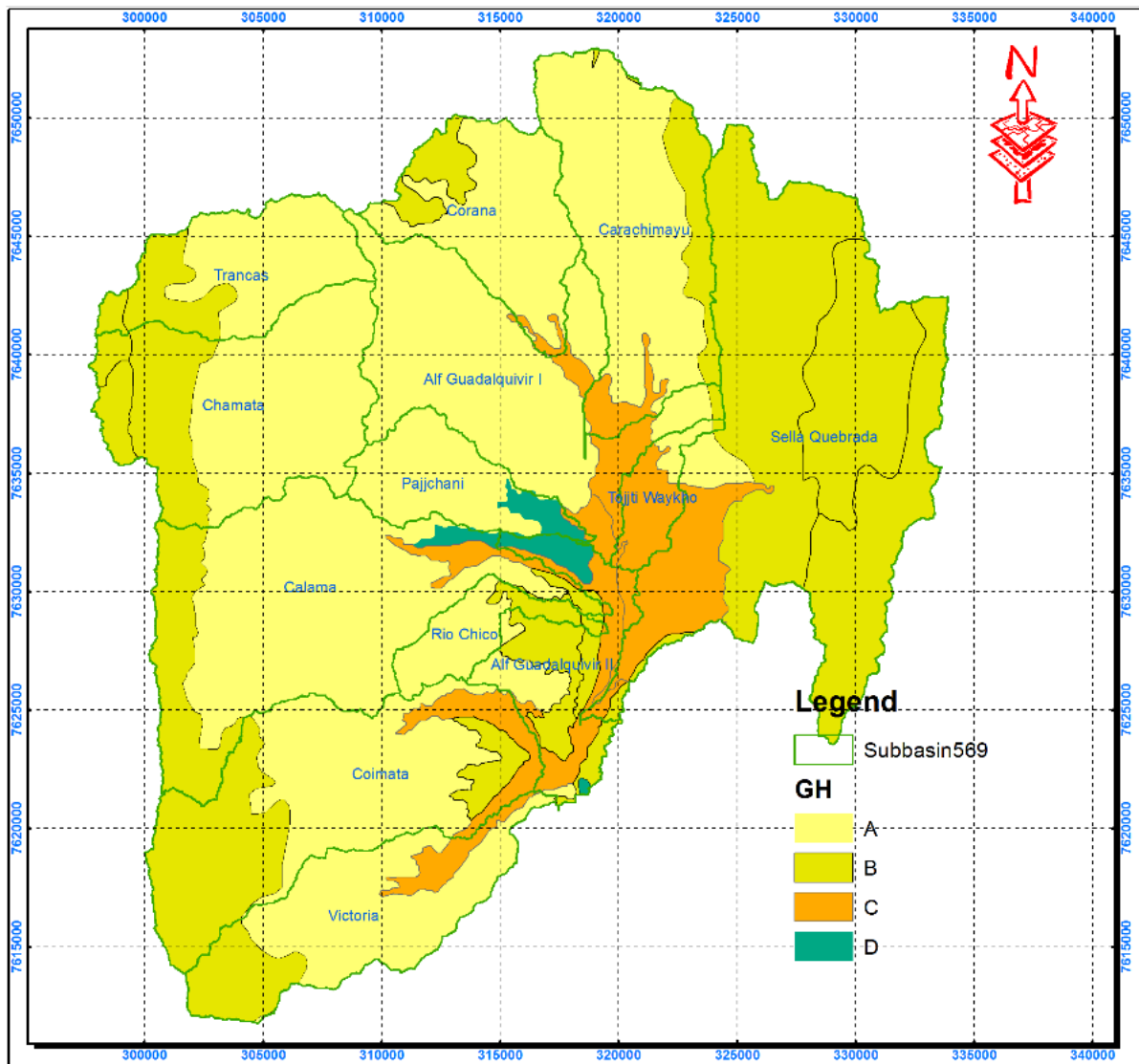
Tabla 3.4: GH del suelo en función de Textura y tipo de suelo

DOMAIN	DESCRIPCION	TEXTURA	GRUPO HIDROLOGICO O ASIGNADO
1	Consociación Leptosol	FYL	B
3	Asociación Leptosol - Cambisol - Phaeozem	FA	B
4	Asociación Leptosol - Phaeozem	FA	B
2	Asociación Leptosol - Cambisol - Regosol	AF	A
13	Consociación Cambisol	FA	B
13	Consociación Cambisol	FA	B
4	Asociación Leptosol - Phaeozem	FA	B
36	Asociación Lixisol - Cambisol	FL	C
16	Asociación Cambisol - Phaeozem	F	B
36	Asociación Lixisol - Cambisol	YL	D
19	Asociación Cambisol - Lixisol	FYL	C
36	Asociación Lixisol - Cambisol	FYA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	FYA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	FA	B
34	Consociación Lixisol	FA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	YL	D

Fuente: Elaboración Propia de la fusión de mapas tipos de suelo y textura

Esta capa de información se generó, básicamente, de dos formas: digitalizando el mapa de acuerdo a las unidades A, B, C y D, puesto que ya se dispone de un mapa general de tipos de suelo en el SIG, se reclasifica el mapa mediante una tabla anterior y tenemos el mapa de Grupo hidrológico para la cuenca.

Figura 3.31: Procesamiento de mapa de grupo hidrológico



3.2.2.3 MAPA DE PENDIENTES

Una de las variables necesarias para definir el número de curva es la pendiente, clasificada en dos grupos: menor del 3%, o mayor o igual al 3%.

Para la obtención del mapa de pendientes, se necesita un Modelo de Elevación Digital, que se puede definir como una matriz de números ordenados que representa la distribución espacial de las elevaciones sobre algún dato arbitrario del territorio. Prácticamente en todos los SIG existe la función automática de obtención de pendientes

derivada del Modelo de Elevación Digital. Si no es así, es posible generarla a partir de las diferencias de altitud que existen entre las celdas vecinas al analizarlas mediante filtros.

El mapa de pendientes resultante puede obtenerse tanto en forma de porcentaje como en grados. En este último caso deberá reconvertirse a porcentajes.

Una vez obtenido este mapa, se ha de reclasificar en dos grupos: celdas con pendiente menor del 3 % y mayor o igual al 3 %. En la mayoría de los SIG esta operación puede hacerse fácilmente a través de las tablas de reclasificación. La estructura de dichas tablas variará según el SIG, aunque en esencia responden a un formato tal como el que se muestra a continuación:

0 hasta 2	1	Pendientes menores de 3%
3 hasta 1000	2	<i>Pendientes iguales o mayores del 3%</i>

Aplicando esta tabla se genera un nuevo mapa que tiene las siguientes categorías: **1** en todas aquellas celdas del mapa de pendientes inicial en las que la pendiente era menor del 3% ; **2** para aquellas celdas que tenían una pendiente igual o mayor al 3%; y **0**, que significa que está fuera del área de análisis.

Para la obtención del mapa de pendientes, se generó un Modelo de Elevación Digital con un tamaño de pixel de 30 x 30 m, de él se derivó automáticamente, con los comandos propios del SIG, un mapa de pendientes. Este mapa se reclasificó agrupando las diferentes pendientes en dos tipos: mayores o iguales a un 3% y menores de un 3%.

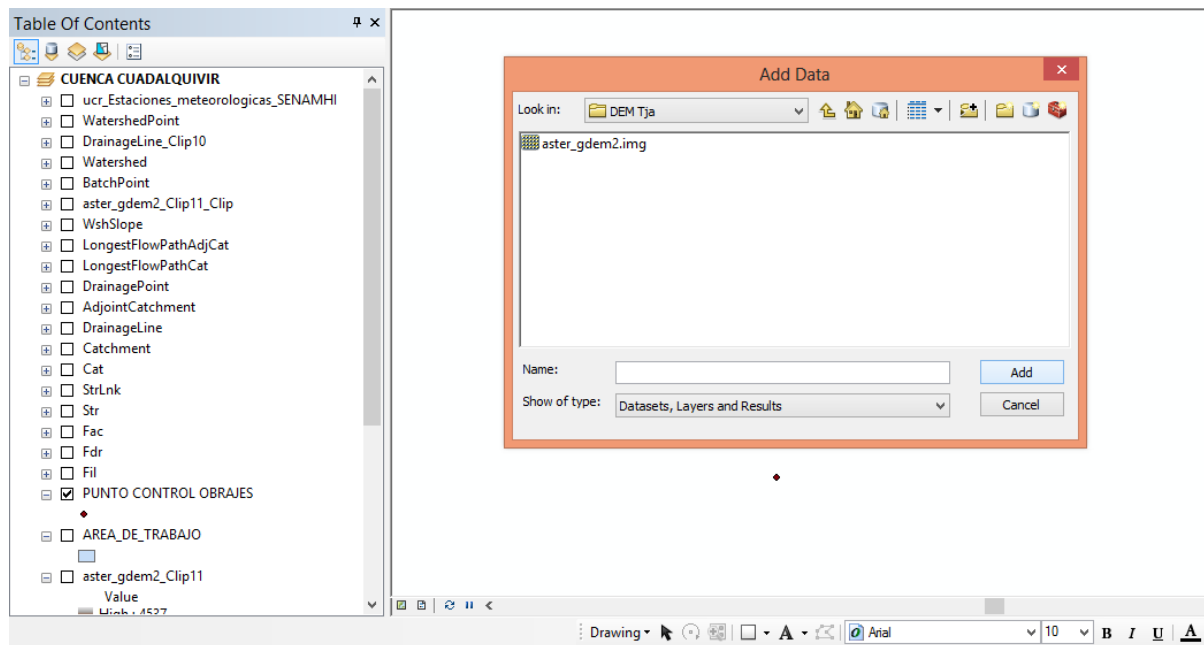
3.2.2.3.1 GENERACIÓN DE MAPA DE PENDIENTE PARA LA CUENCA

Paso 1: Para cargar el Modelo de Elevación Digital

En ArcGIS, se siguen los siguientes pasos:

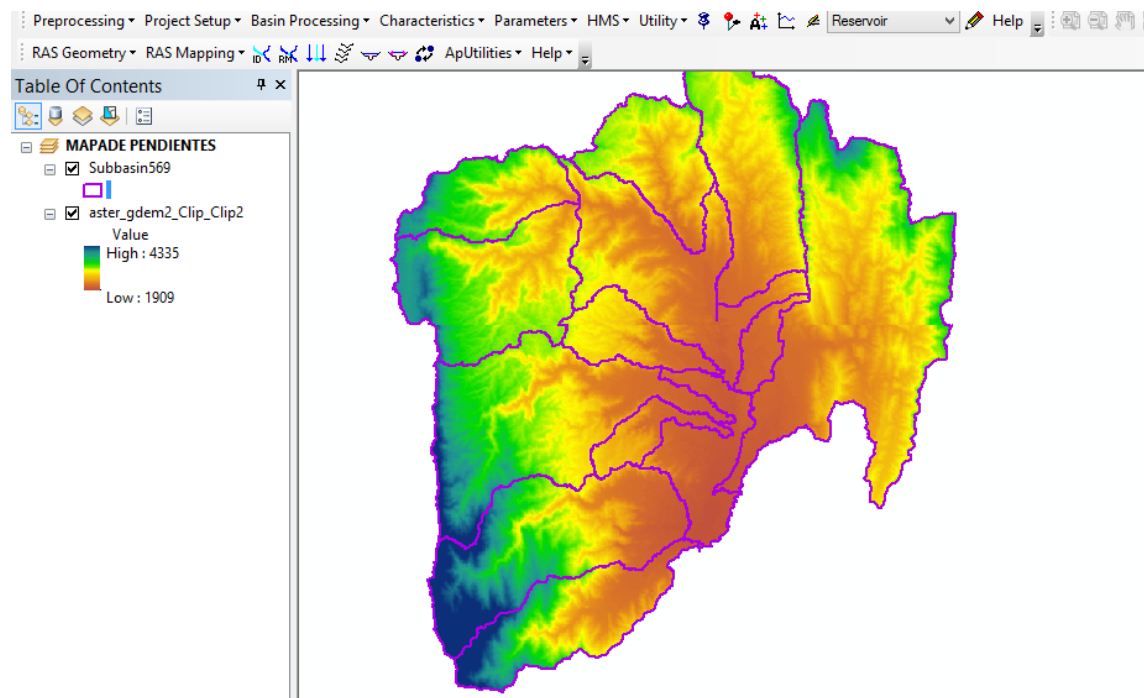
En la barra de herramientas hacer clic en el ícono que se muestra en la siguiente figura (representado por un símbolo de más), enseguida se abrirá una ventana en la que se debe navegar hasta la carpeta en la que se guardó el archivo.

Figura 3.32: Añadir el DEM de Tarija

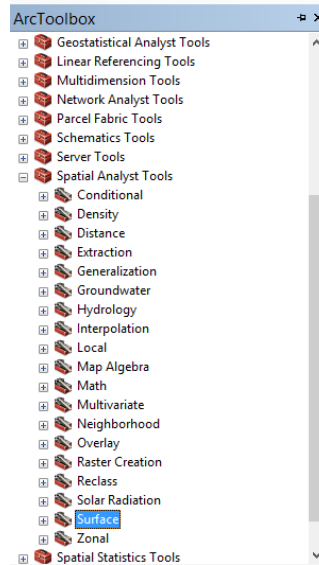


Al presionar el botón Add (agregar) se cargará el Continuo de Elevaciones, visualizándose de la siguiente manera:

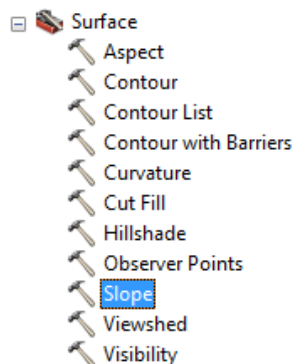
Figura 3.33: Modelo de Elevación Digital de Tarija



Paso 2: Ahora con **ArcToolbox**, se selecciona el menú **Spatial Analyst Tools**, seguidamente se selecciona el **Surface** como se muestra:

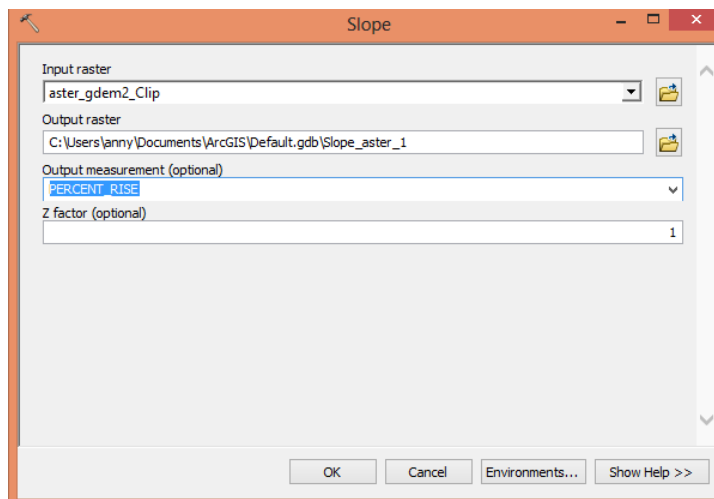


Ahora clic en **Surface** luego doble clic en **Slope**



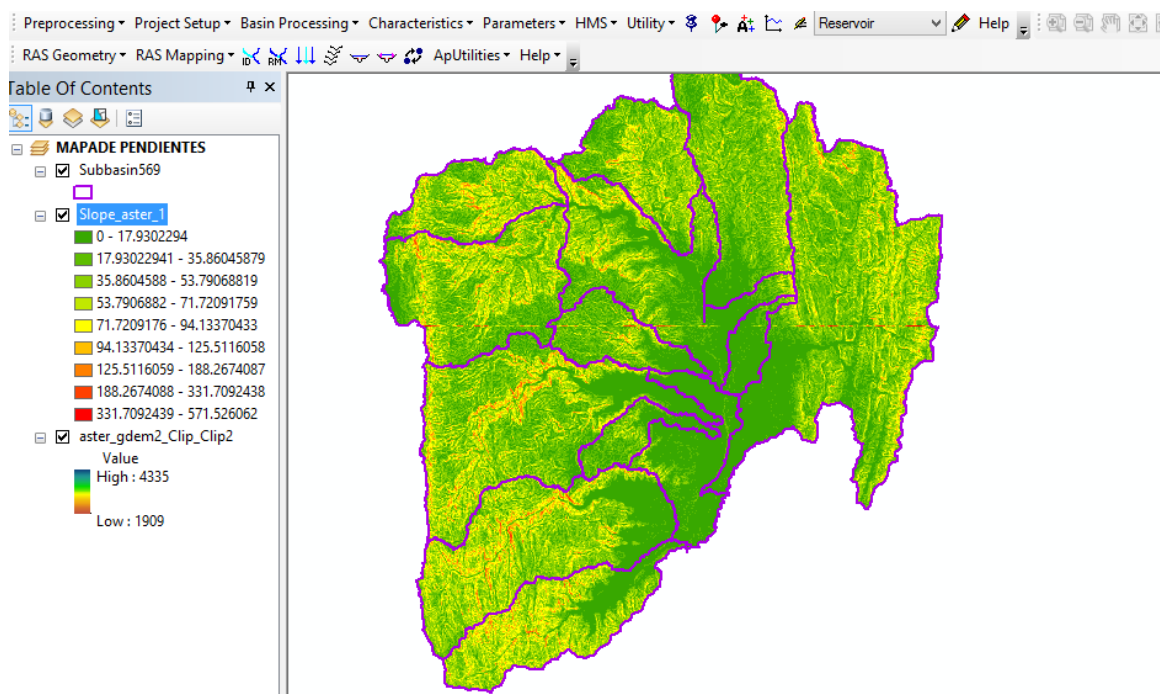
En la ventana que se abre, se debe colocar la siguiente información.

- ▶ **Input raster:** se introduce el DEM corregido, en este caso “aster_gdem2.Clip”.
- ▶ **Output raster:** Se direcciona en donde se guardara y se introduce el nombre con el que se quiere guardar el raster de cuenca, por ejemplo “Slope_aster_1”
- ▶ **Output measurement (optional):** se selecciona en porcentaje “PERCENT_RISE”

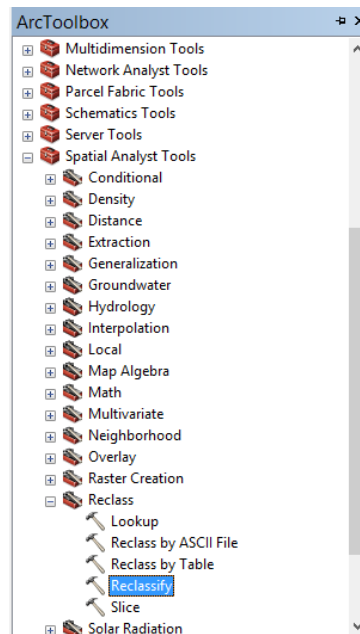


OK... El resultado obtenido es...

Figura 3.34: Resultado obtenido del proceso de mapa de pendiente

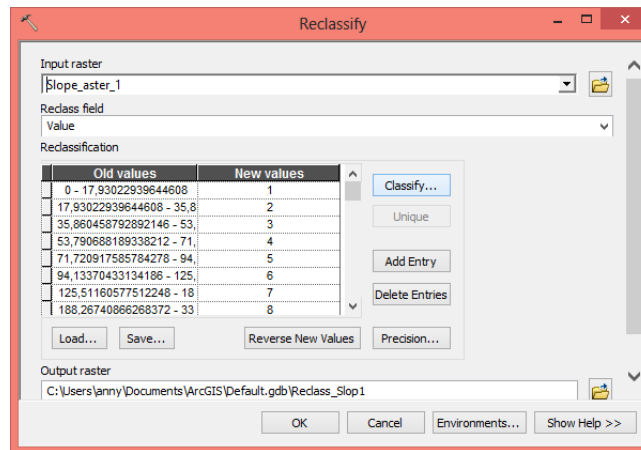


Paso 2: Ahora con **ArcToolbox**, se selecciona el menú **Spatial Analyst Tools**, seguidamente se selecciona el **Reclss** y luego doble clic **Reclassify** como se muestra:



En la ventana que se abre, se debe colocar la siguiente información.

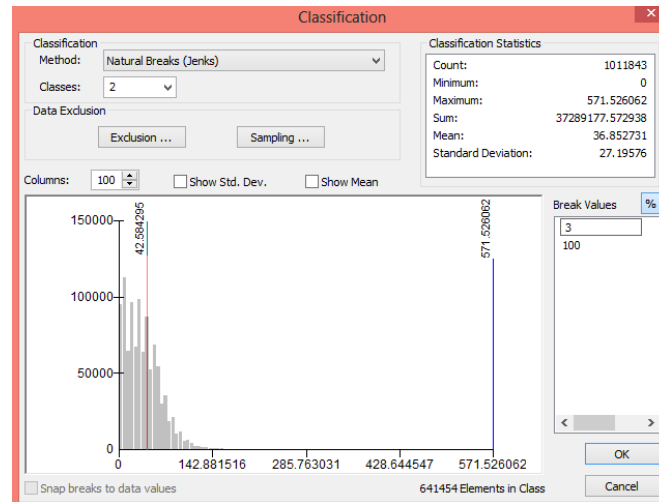
- ▶ **Input raster:** se introduce en este caso “Slope_aster_1”.
- ▶ **Classify:** doble clic.



En la ventana que se abre, se debe colocar la siguiente información.

- ▶ **Method:** se selecciona “Natural Breaks (Jenks)”.
- ▶ **Classes:** se introduce en cuantos clases se desea clasificar en este caso 2 clases:

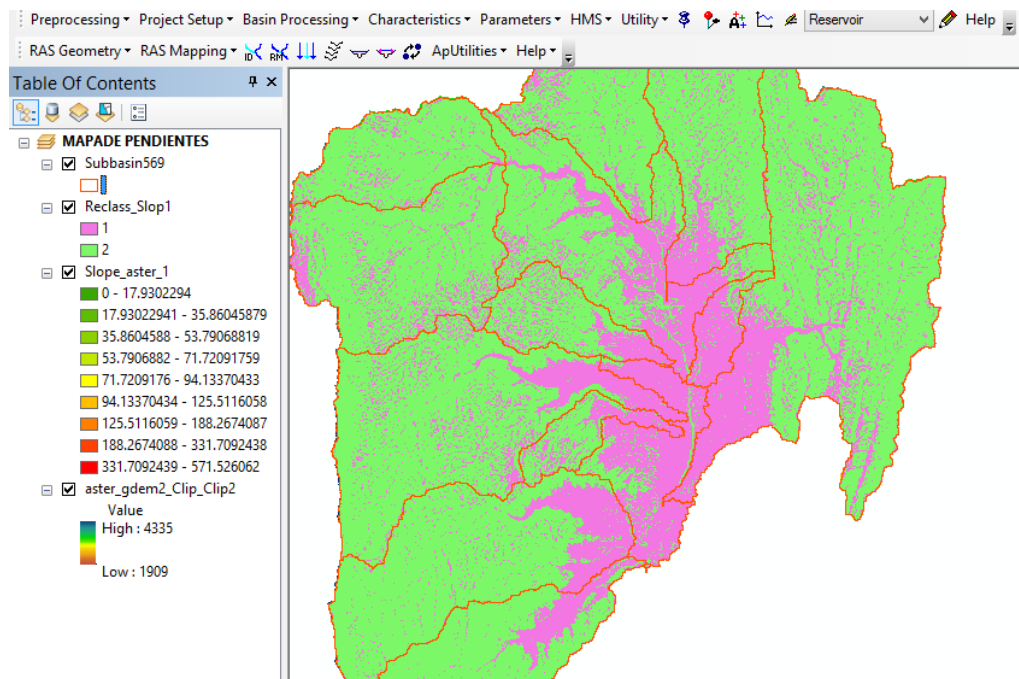
- **Break Values:** se selecciona en porcentaje y se introduce el intervalo con la que se desea clasificar en el caso 3 y 100 %.



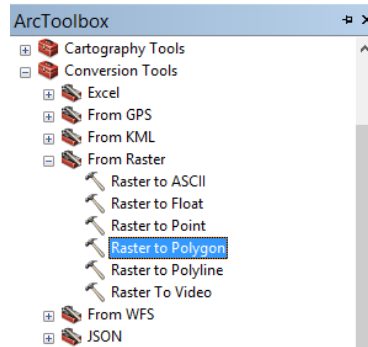
Old values	New values
0 - 17,145781860351562	1
17,145781860351562 - 57	2
NoData	NoData

OK... El resultado obtenido es...

Figura 3.35: Proceso de mapa de pendientes formato raster

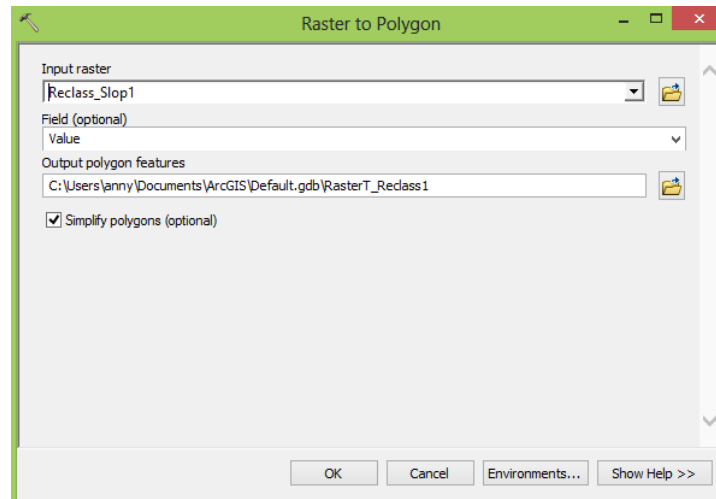


Paso 3: Ahora con **ArcToolbox**, se selecciona el menú **Conversion Tools**, seguidamente se selecciona el **From Raster** y luego doble clic **Raster to Polygon** como se muestra:



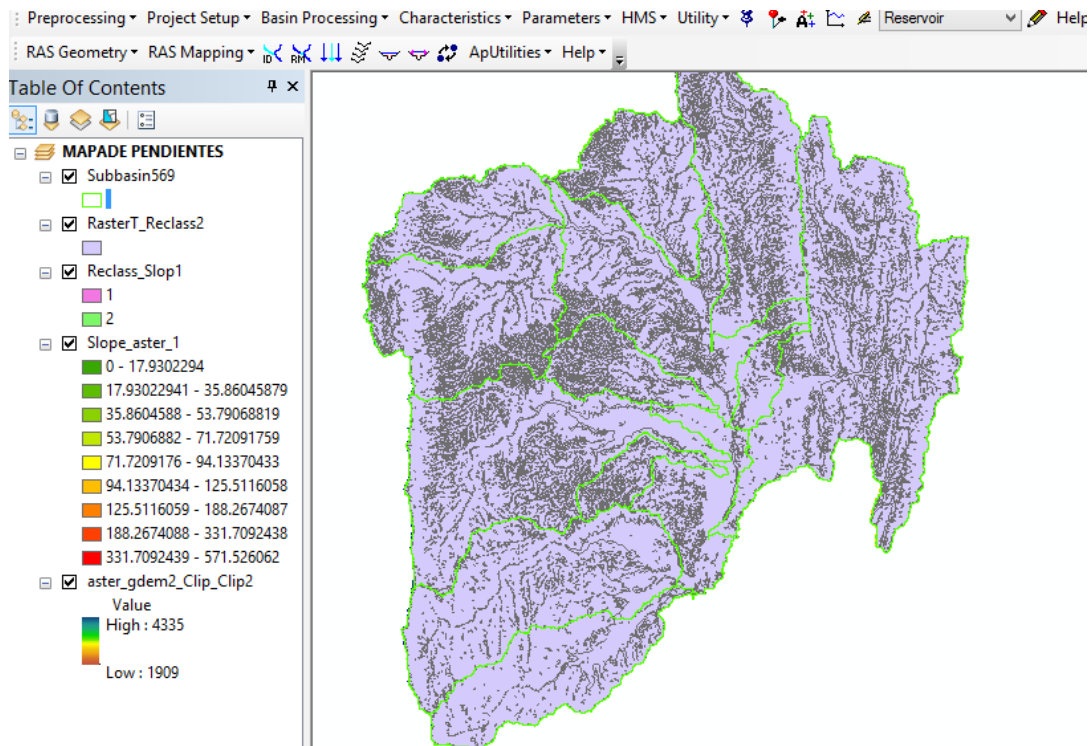
En la ventana que se abre, se debe colocar la siguiente información.

- ▶ **Input raster:** se introduce “Reclass_Slop1”.
- ▶ **Field (optional):** se deja por defecto “Value”
- ▶ **Output polygon features:** Se direcciona en donde se guardara y se introduce el nombre con el que se quiere guardar el raster de salida, por ejemplo “RasterT_Reclass1”.



OK... El resultado obtenido es...

Figura 3.36: Mapa de pendientes formato shp



3.2.2.4 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE USOS DE SUELO

Al igual que la información utilizada para la caracterización de los usos del suelo en este proyecto ha sido suministrada por el proyecto de *“Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia”*.

Para el proyecto se tomará como clases de tratamiento / uso, a la clasificación de uso que se presenta en la Zonificación Agroecológica y Socioeconómica del Departamento (ZAE), clasificación que tiene [19 tipos de uso](#) y se realizará una analogía con el que presenta en la publicación del CEDEX *“Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica”*, para determinar de esta manera el valor del número de curva, una vez que previamente fue determinado el grupo hidrológico.

Figura 3.37: Mapa de uso de la cuenca Guadalquivir

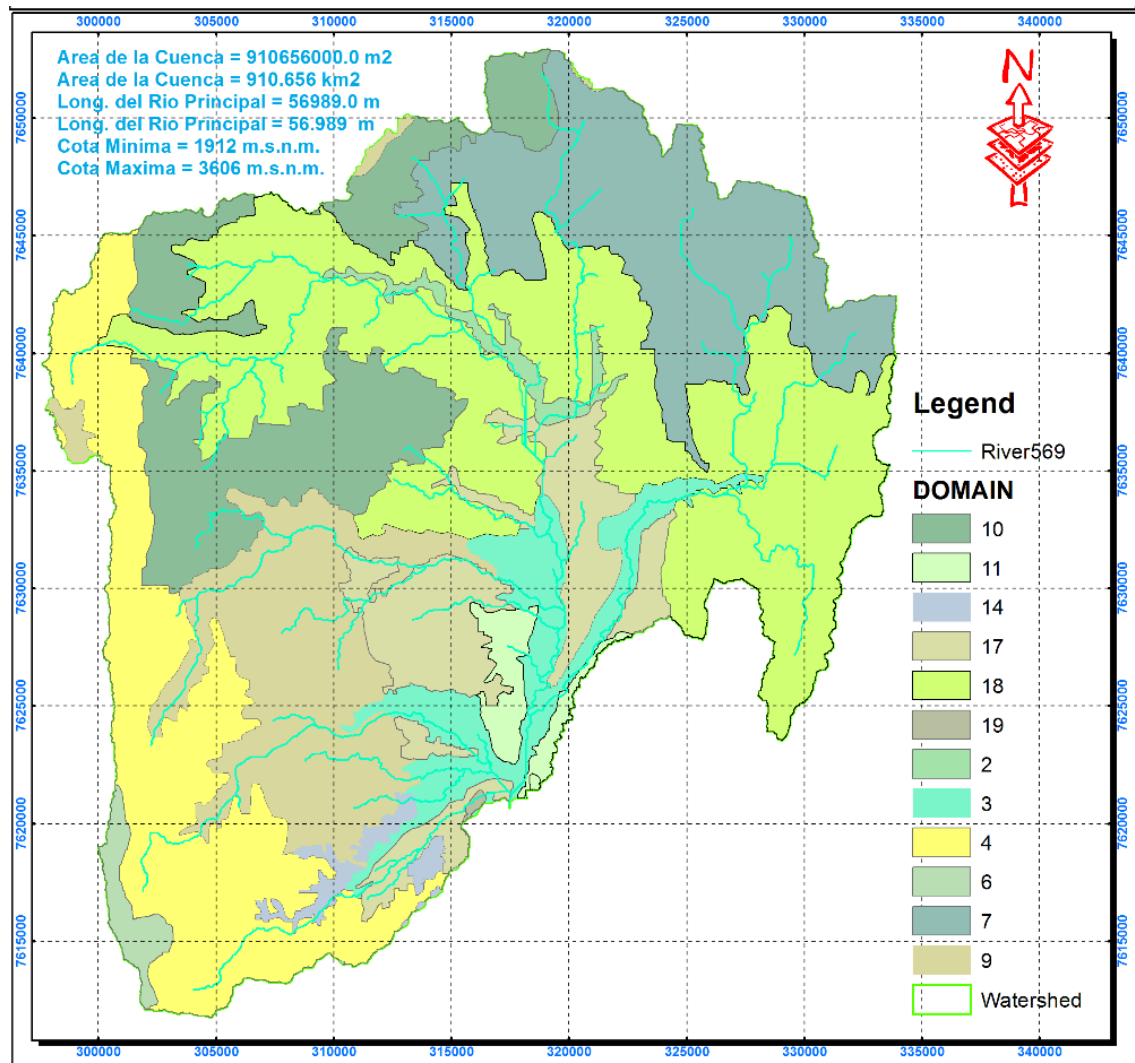


Tabla 3.5: Clasificación de los usos del suelo para aplicar el método del CEDEX.

Código mapa	Uso actual del suelo (ZAE)	USO (CEDEX)
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	Rotación de cultivos densos
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	Rotación de cultivos densos
3	Agropecuario intensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos	Rotación de cultivos densos
4	Ganadero extensivo con ovinos	Pradera buena
5	Ganadero extensivo con ovinos y vacunos	Pradera buena
6	Ganadero extensivo con ovinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramiento rocoso)	Pradera buena
7	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos	Pradera buena
8	Ganadero extensivo con caprinos. Uso secundario: áreas sin uso	Pradera media

Código mapa	Uso actual del suelo (ZAE)	USO (CEDEX)
	(afloramientos rocosos)	
9	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	Cultivo en hilera R
10	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)	Cultivo en hilera R
11	Agropecuario extensivo con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	Cultivo en hilera R
12	Silvopastoril con vacunos y tala selectiva	Masa forestal clara
13	Silvopastoril con vacunos, caprinos y extracción de productos del bosque	Masa forestal espesa
14	Silvopastoril con vacunos, caprinos, ovinos y extracción de productos del bosque	Masa forestal media
15	Silvopastoril con vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	Masa forestal muy clara
16	Agrosilvopastoril con vacunos, caprinos, cultivos anuales y tala selectiva	Masa forestal clara
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	Masa forestal media
18	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales	Masa forestal media
19	Bosque implantado. Uso secundario: ganadero extensivo con vacunos y caprinos	Masa forestal clara

Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por CEDEX

A partir del Mapa de Uso actual del suelo (ZAE), se generó el mapa de usos de suelo con leyenda del SCS (*Figura 3.37*). Los usos que se dan en la Cuenca del río Guadalquivir son:

Tabla 3.6: Usos de suelo, áreas de la cuenca del Río Guadalquivir

DOMAIN	Descripción	Área (km ²)
7	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)	129,261
10	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)	111,941
4	Ganadero extensivo con ovinos	138,312
9	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	105,273
18	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	256,992
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	10,076
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	84,162
3	Agropecuario intensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos	50,200
11	Agropecuario extensivo con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	14,542
6	Ganadero extensivo con ovinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramiento rocoso)	9,326

DOMAIN	Descripción	Área (km ²)
19	Bosque implantado. Uso secundario: ganadero extensivo con vacunos y caprinos	0,572
TOTAL ÁREA		910,656

Fuente: Elaboración propia en base a la información SIG

A continuación una tabla donde a cada una de las variables que interviene en la obtención del número de curva se le asignó un número primo, considerando que la característica hidrológica era única (*Tabla 3.7*). Los mapas de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores, excepto el de pendientes, ya que sus valores ya coincidían con los correspondientes números primos (1 y 2).

Tabla 3.7: Reclasificación de números primos.

Característica	Número primo
Pendiente < 3%	1
Pendiente ≥ 3%	2
Grupo hidrológico de suelo A	3
Grupo hidrológico de suelo B	5
Grupo hidrológico de suelo C	7
Grupo hidrológico de suelo D	11
Barbecho	13
Cultivos en hilera	17
Cereales de invierno	19
Rotación de cultivos pobres	23
Rotación de cultivos densos	29
Pradera pobre	31
Pradera media	37
Pradera buena	41
Pradera muy buena	43
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	47
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal medio	53
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal bueno	59
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara	61
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara	67
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media	71
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa	73
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa	79
Rocas permeables	83
Rocas impermeables	89

Fuente: Información publicada por CEDEX

En la *Tabla 3.8* se muestran los valores del número de curva deducidos del parámetro umbral de escorrentía, P_0 , utilizado en el trabajo de Témez (1978).

Como se observa en la *Tabla 3.8*, el valor del parámetro número de curva para condiciones medias de humedad en el suelo depende del *uso del suelo*, las *características hidrológicas*, la *pendiente del terreno* y el *tipo de suelo*.

Tabla 3.8: Números de curva para condiciones media de humedad

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho	$\geq 3\%$	77	68	89	93
Barbecho	$< 3\%$	71	78	82	86
Cultivos en hilera	$\geq 3\%$	69	79	86	89
Cultivos en hilera	$< 3\%$	64	73	78	82
Cereales de invierno	$\geq 3\%$	63	75	83	86
Cereales de invierno	$< 3\%$	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres	$\geq 3\%$	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres	$< 3\%$	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos	$\geq 3\%$	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos	$< 3\%$	52	67	76	79
Pradera pobre	$\geq 3\%$	68	78	86	89
Pradera media	$\geq 3\%$	49	69	78	85
Pradera buena	$\geq 3\%$	42	60	74	79
Pradera muy buena	$\geq 3\%$	39	55	69	77
Pradera pobre	$< 3\%$	46	67	81	88
Pradera media	$< 3\%$	39	59	75	83
Pradera buena	$< 3\%$	29	48	69	78
Pradera muy buena	$< 3\%$	17	33	67	76
Plantac. regul. aprovech. forestal	$\geq 3\%$	45	66	77	83
Plantac. regul. aprovech. forestal	$\geq 3\%$	39	60	73	78
Plantac. regul. aprovech. forestal	$\geq 3\%$	33	54	69	77
Plantac. regul. aprovech. forestal	$< 3\%$	40	60	73	78
Plantac. regul. aprovech. forestal	$< 3\%$	35	54	69	77
Plantac. regul. aprovech. forestal	$< 3\%$	25	50	67	76
Masa forestal muy clara	no	56	75	86	91
Masa forestal clara	no	46	68	78	83
Masa forestal media	no	40	60	69	76
Masa forestal espesa	no	36	52	62	69
Masa forestal muy espesa	no	29	44	54	60
Rocas permeables	$\geq 3\%$	94	94	94	94
Rocas permeables	$< 3\%$	91	91	91	91

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Rocas impermeables	$\geq 3\%$	96	96	96	96
Rocas impermeables	$< 3\%$	93	93	93	93

Fuente: Información publicada por CEDEX

Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un número diferente. Así pues, si se multiplican los mapas de usos de suelo, pendiente y tipos de suelo, dará un resultado diferente por cada combinación de tres números primos (*Tabla 3.9*). De esta manera, conociendo el resultado del producto se puede saber de qué características de uso, tipo del suelo y de pendiente se tratan y se podrá encontrar su número de curva en la *Tabla 3.8*. Para obtenerlo con el SIG de una manera automática, se ha creado un archivo de reclasificación con todos los valores posibles, el cual se utiliza para reclasificar el mapa que contiene el producto de los tres mapas de entrada. (CEDEX 1995).

Estos valores del número curva pueden verse modificados según sean las condiciones de humedad del suelo anteriores al evento estudiado. Los valores presentados en la *Tabla 3.8* corresponden a unas características de humedad medias.

Tabla 3.9: Valores resultantes del producto de los números primos.

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho	$\geq 3\%$	78	130	182	286
Barbecho	$< 3\%$	39	65	91	143
Cultivos en hilera	$\geq 3\%$	102	170	238	374
Cultivos en hilera	$< 3\%$	51	85	119	187
Cereales de invierno	$\geq 3\%$	114	190	266	418
Cereales de invierno	$< 3\%$	57	95	133	209
Rotación de cultivos pobres	$\geq 3\%$	138	230	322	506
Rotación de cultivos pobres	$< 3\%$	69	115	161	253
Rotación de cultivos densos	$\geq 3\%$	174	290	406	638
Rotación de cultivos densos	$< 3\%$	87	145	203	319
Pradera pobre	$\geq 3\%$	186	310	434	682
Pradera media	$\geq 3\%$	222	370	518	814
Pradera buena	$\geq 3\%$	246	410	574	902
Pradera muy buena	$\geq 3\%$	258	430	602	946
Pradera pobre	$< 3\%$	93	155	217	341
Pradera media	$< 3\%$	111	185	259	407

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Pradera buena	< 3%	123	205	287	451
Pradera muy buena	< 3%	129	215	301	473
Plantac. regul. aprovech.	≥ 3%	282	470	658	1034
Plantac. regul. aprovech.	≥ 3%	318	530	742	1166
Plantac. regul. aprovech.	≥ 3%	354	590	826	1298
Plantac. regul. aprovech.	< 3%	141	235	329	517
Plantac. regul. aprovech.	< 3%	159	265	371	583
Plantac. regul. aprovech.	< 3%	177	295	413	649
Masa forestal muy clara	≥ 3%	366	610	854	1342
Masa forestal clara	≥ 3%	402	670	938	1474
Masa forestal media	≥ 3%	426	710	994	1562
Masa forestal espesa	≥ 3%	438	730	1022	1606
Masa forestal muy espesa	≥ 3%	474	790	1106	1738
Masa forestal muy clara	< 3%	183	305	427	671
Masa forestal clara	< 3%	201	335	469	737
Masa forestal media	< 3%	213	355	497	781
Masa forestal espesa	< 3%	219	365	511	803
Masa forestal muy espesa	< 3%	237	395	553	869
Rocas permeables	≥ 3%	498	830	1162	1826
Rocas permeables	< 3%	249	415	581	913
Rocas impermeables	≥ 3%	534	890	1246	1958
Rocas impermeables	< 3%	267	445	623	979

Fuente: Fuente: Información publicada por CEDEX 1995

3.3 PROCESO DEL MODELO DE CUENCA DE HEC-HMS

HEC-HMS está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentamiento en cuencas. HEC-HMS está planteado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un rango general de problemas. Esta herramienta puede ser utilizada en pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención, los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, etc.

3.3.1 COMPONENTES DEL MODELO HMS

Los componentes del modelo son utilizados para simular la respuesta hidrológica en una cuenca. Estos incluyen; **modelos de cuencas**, **modelos meteorológicos**, **especificaciones de control** y **datos de entrada**. En una simulación se calcula la respuesta de la cuenca dada a una precipitación, una vez definido el modelo meteorológico, las especificaciones de control definen el tiempo, y el **intervalo de tiempo** para el cual se realizará la simulación. Y los datos de entrada tales como series de tiempo, datos de grilla son requeridos muchas veces como parámetros o condiciones de borde en la cuenca y el modelo meteorológico.

3.3.2 MODELO DE CUENCA

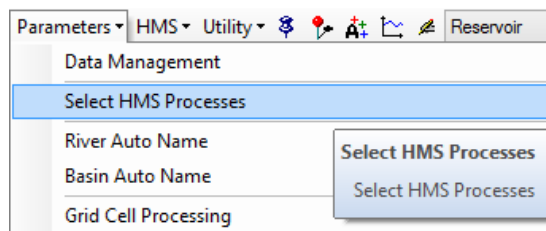
El modelo de cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos en la cuenca. El modelo de cuenca del presente estudio fue elaborado a través del programa ArcGIS 10.2 y la extensión ArcHydro y HEC-GeoHMS, en el cual se realizó la delimitación inicial de la cuenca, utilizando como insumo el DEM para la zona de estudio.

Contiene parámetros y datos conectados para elementos hidrológicos de la cuenca del Río Guadalquivir. Los elementos son: subcuenca, uniones, reservorios, fuentes y derivaciones, en cada uno de ellos se asignan atributos y parámetros.

Los parámetros de entrada que requiere el modelo de la cuenca fueron calculados utilizando el programa ArcGIS 10.2 y las extensiones *Basin 1*, *Spatial analysis*, *Hydrologic Modeling*, que son extensiones necesarias para el trazo automatizado de las micro cuencas dentro del Río Guadalquivir.

3.3.3 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

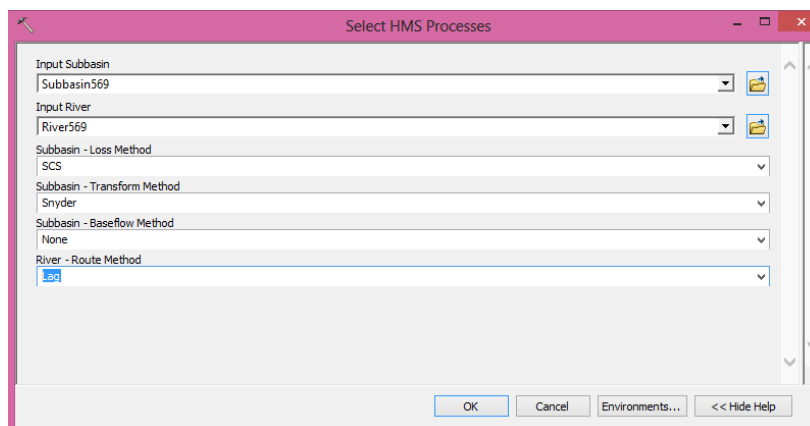
Para la estimación de los parámetros hidrológicos se desarrolla cada una de las opciones es el menú **Parameters**, los cuales están constituidos por: **Select HMS Processes**, River Auto Name, Basin Auto Name, Grid cell Processing, Subbsin Parameters from Raster, Subbassin Parameters from Features.



3.3.3.1 SELECCIÓN DEL PROCESO PARA HMS

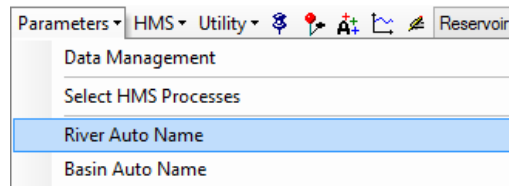
En **Parameters**, seleccionar **HMS processes**. En la ventana **Select HMS processes** para subcuenca, seleccionar para **Loss Methd**, **Initial+Constant**, para método de transformación, **Clark**, para tipo de subcuenca, **ninguno (none)**. Para el río, en el método de la ruta seleccionar **none** y **OK**. Como se muestra en la *figura 3.38*.

Figura 3.38: Selección de métodos de modelación para HMS.



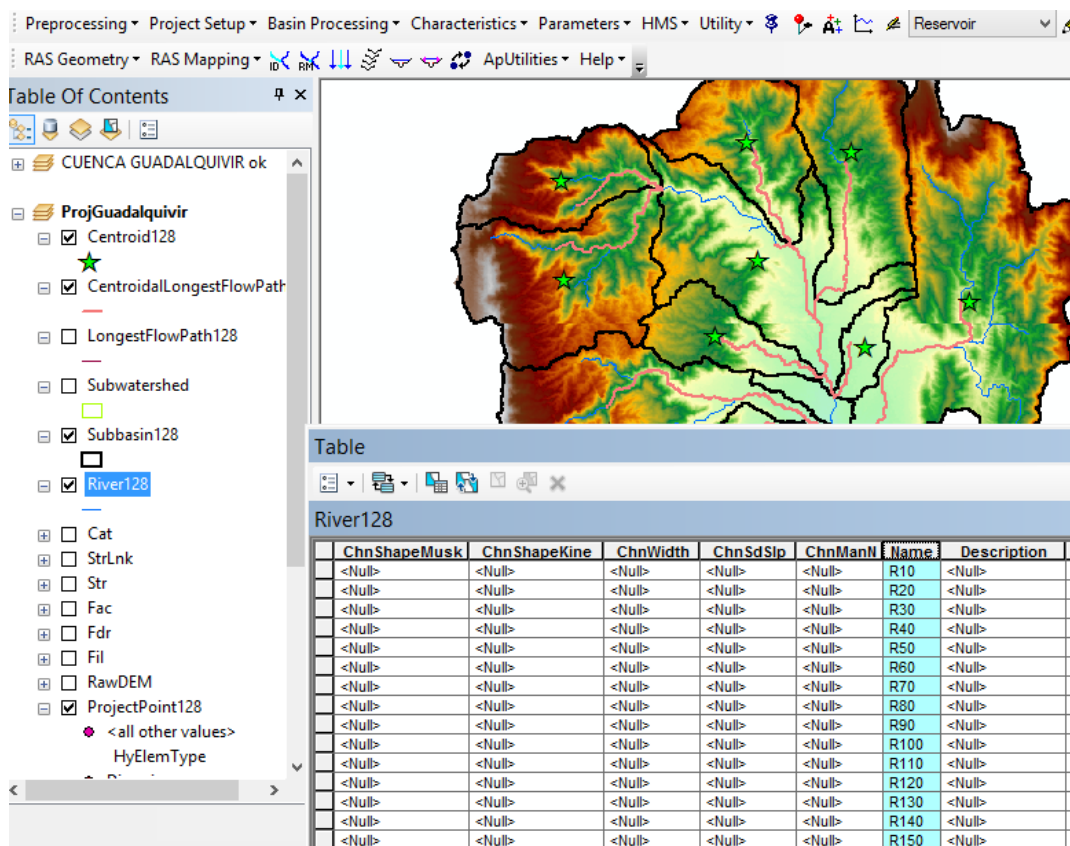
3.3.3.2 AUTO NOMBRE DEL RÍO

Seleccionar **Parameters**, luego **River Auto Name**:



En el despliegue; escoger la capa de la subcuenca y aceptar **OK**.

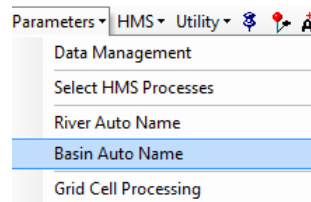
Figura 3.39: Auto nombre del río



Este paso crea una columna denominada **“Name”** en la tabla de atributos de la subcuenca, esto para identificarlas en caso de tener varias, considerando desde aguas arriba hasta aguas abajo. La conversión de nombre combina la letra **“R”** con un número por ejemplo R10. R20; los nombres se pueden editar manualmente de acuerdo a algunas características de la zona en estudio.

3.3.3.3 AUTO NOMBRE DE LA CUENCA

Seleccionar **Parameters**, luego **Basin Auto Name**:



En el despliegue; escoger la capa de la subcuenca y aceptar **OK**.

Figura 3.40: Auto nombre de la cuenca

 A screenshot of a software interface. On the left is a 'Table of Contents' pane showing a tree view of layers. The 'Subbasin128' layer is selected and highlighted in blue. The main window displays a topographic map of a watershed with subbasins outlined in black and colored by elevation. A table window titled 'Subbasin128' is open in the foreground, showing a list of subbasins with their attributes.

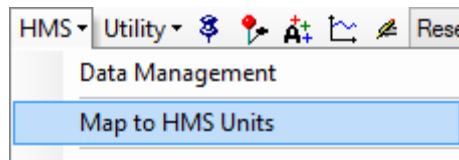
Shape	Length	Shape Area	HydroID	DrainID	Name	Description	PrecipGage	TotStormP
62760		81261900	52	52	W520	<Null>	<Null>	<Null>
48620		48641400	53	53	W530	<Null>	<Null>	<Null>
43380		43966800	57	57	W570	<Null>	<Null>	<Null>
61140		83502900	60	60	W600	<Null>	<Null>	<Null>
100620		87237900	61	61	W610	<Null>	<Null>	<Null>
38640		28985400	76	76	W760	<Null>	<Null>	<Null>
28260		12687300	79	79	W790	<Null>	<Null>	<Null>
87900		117966600	82	82	W820	<Null>	<Null>	<Null>
124860		183238200	83	83	W830	<Null>	<Null>	<Null>
36000		16380900	87	87	W870	<Null>	<Null>	<Null>
68460		38745000	93	93	W930	<Null>	<Null>	<Null>
71460		103248900	94	94	W940	<Null>	<Null>	<Null>
58140		60840000	102	102	W1020	<Null>	<Null>	<Null>

Este paso crea una columna denominada “**Name**” en la tabla de atributos de la subcuenca, esto para identificarlas en caso de tener varias, considerando desde aguas arriba hasta aguas abajo. La conversión de nombre combina la letra “W” con un número por ejemplo W520. W530; los nombres se pueden editar manualmente de acuerdo a algunas características de la zona en estudio.

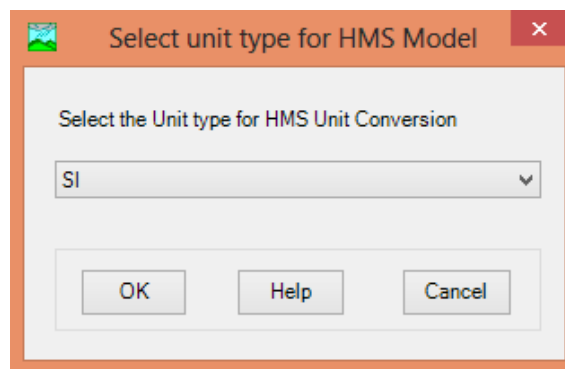
3.3.3.4 DESARROLLAR LA ENTRADA PARA HMS

3.3.3.4.1 CONVERSIÓN DE UNIDADES PARA EL MAPA EN HMS

Seleccionar **HMS**, luego **Map to HMS Units**:



Esta conversión agrega a algunas columnas de las tablas de sub-cuencas y ríos la terminación “HMS”, convirtiendo las características físicas de los tramos y subcuencas desde las unidades del mapa a las unidades de HMS. Los pasos para aplicar esta opción consisten en; seleccionar **HMS**, luego seleccionar **Map to HMS Units**. Escoger del menú desplegable las unidades **SI**.



Los resultados de la conversión de unidades se añaden columnas a tablas de atributos de la subcuenca (*Figura 3.41*) y el río (*Figura3.42*) capas. Las columnas añadidas contienen los "_HMS" que terminan.

Figura 3.41: Área campo agregado a la tabla de atributos de la capa de Subcuenca

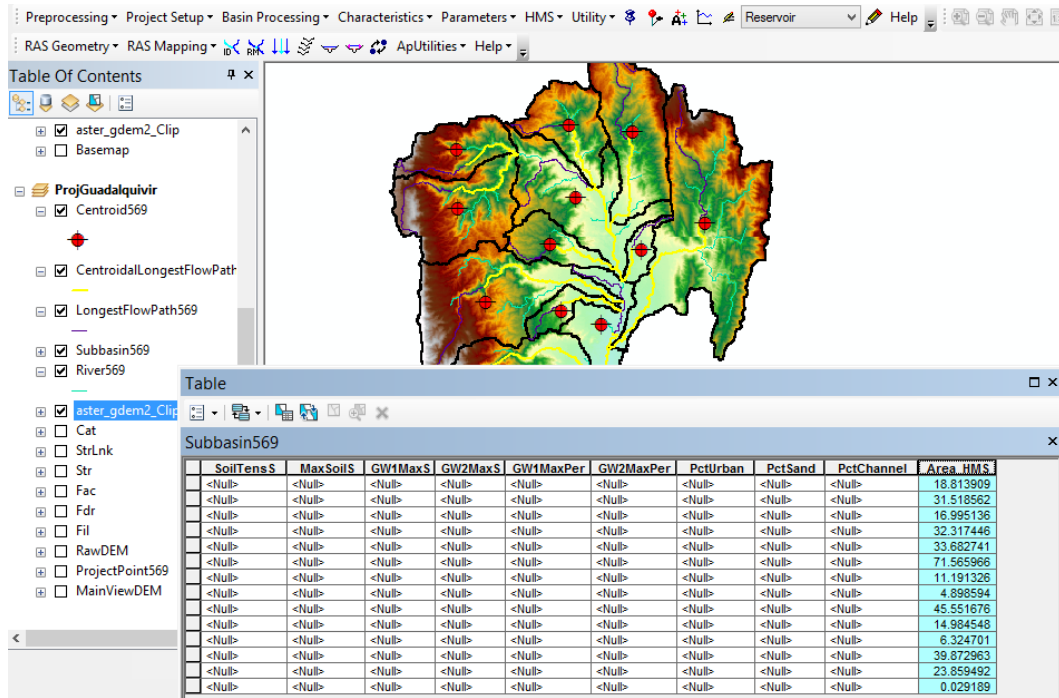
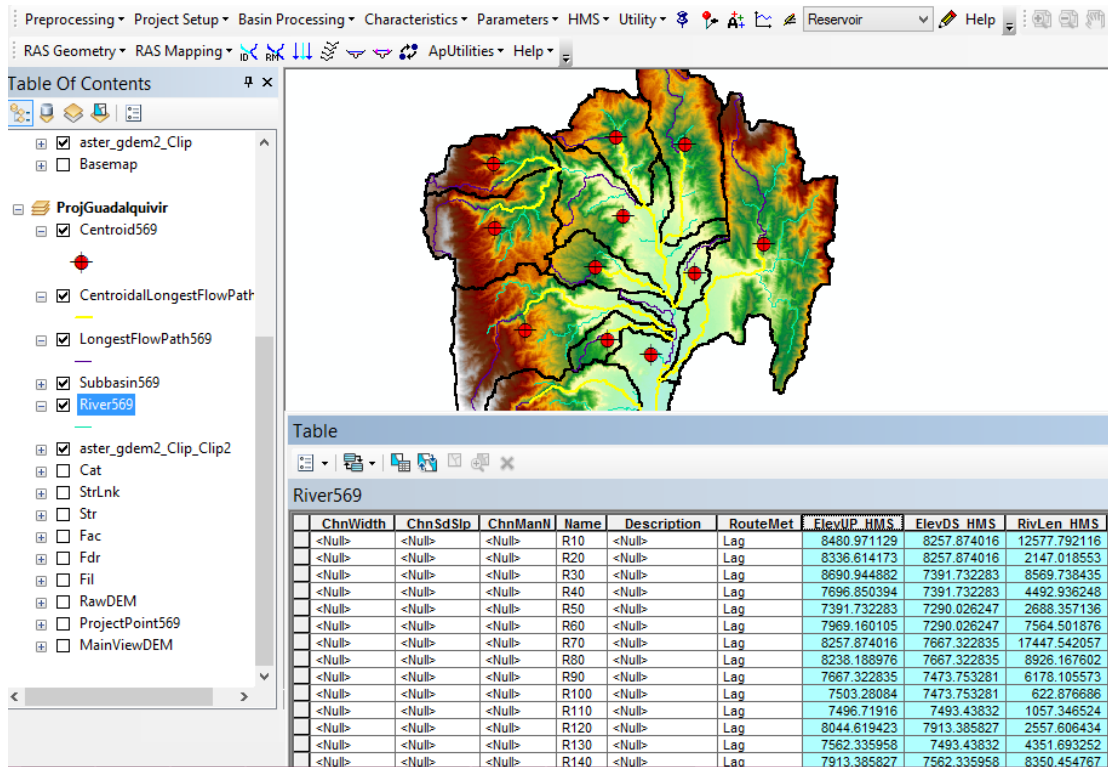
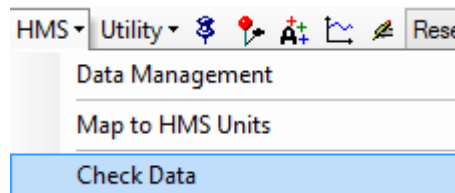


Figura 3.42: Elevación y Longitud campos Añadido a la tabla de atributos del río de Capa



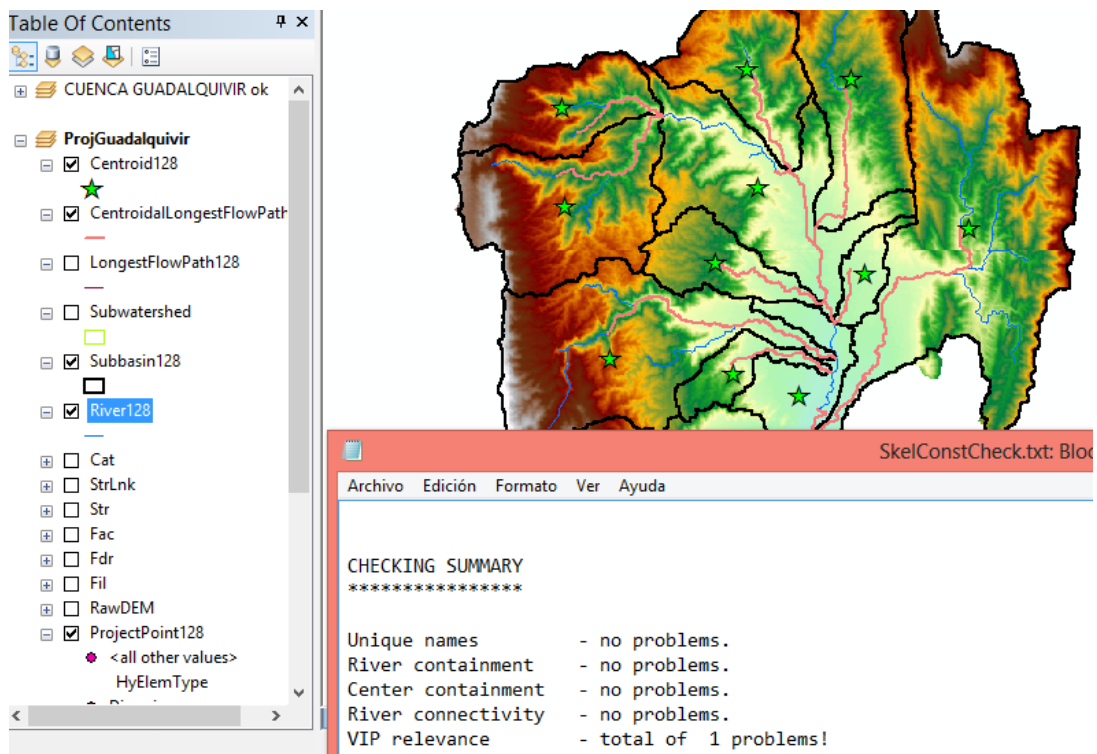
3.3.3.4.2 REVISIÓN DE DATOS DEL HMS

En esta parte se chequea los conjuntos de datos para la consistencia en la descripción de la estructura del modelo hidrológico. Por ejemplo, el programa verifica los nombres únicos para los tramos, subcuencas, y puntos de salida. Adicionalmente, cheque que los ríos estén conectados en los puntos principales creados durante el procedimiento paso a paso. Para ejecutar se selecciona **HMS, HMS Check Data**.



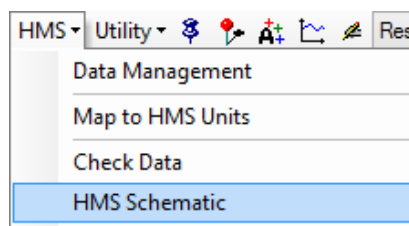
Se verifican que las capas sea seleccionadas correctamente en el cuadro de dialogo HMS Check Data; el archivo de entrada "SkelConsChk.txt", contiene el resultado de la revisión de los datos.

Figura 3.43: Resultados de la revisión de datos



3.3.3.4.3 ESQUEMA DE LA CUENCA HEC-HMS

El esquema de la cuenca en HMS es una representación del Sistema de Información Geográfica (SIG) de los modelos HEC-HMS. Esta herramienta es una simple estructura para las redes hidrológicas que contienen elementos de los modelos HMS y muestra su conexión. Este paso crea sobre la capa un enlace de HMS con la conectividad y de HMS con las capas de nodos, muestra las subcuencas y localiza las uniones de los nodos. Un nodo está localizado en el centroide de la subcuenca. Para usar esta opción vamos a **HMS**, luego **HMS Schematic**.



Verificando que las capas de entrada sean correctamente seleccionadas en el HMS schematic editor, aceptando por defecto o colocando un nuevo nombre para “HMS Link” y la capa “HMS Node”.

Figura 3.44: HMS Esquema Editor

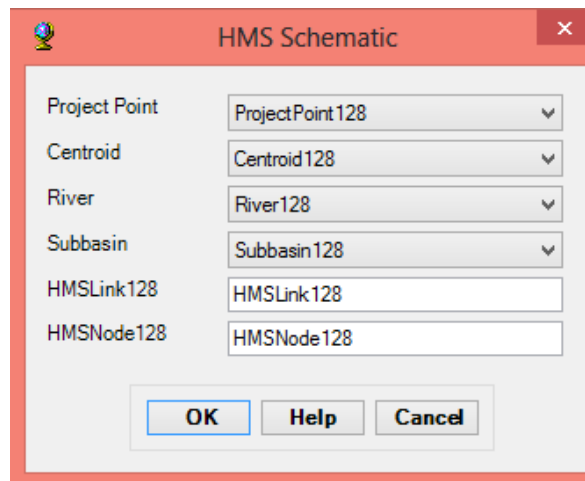
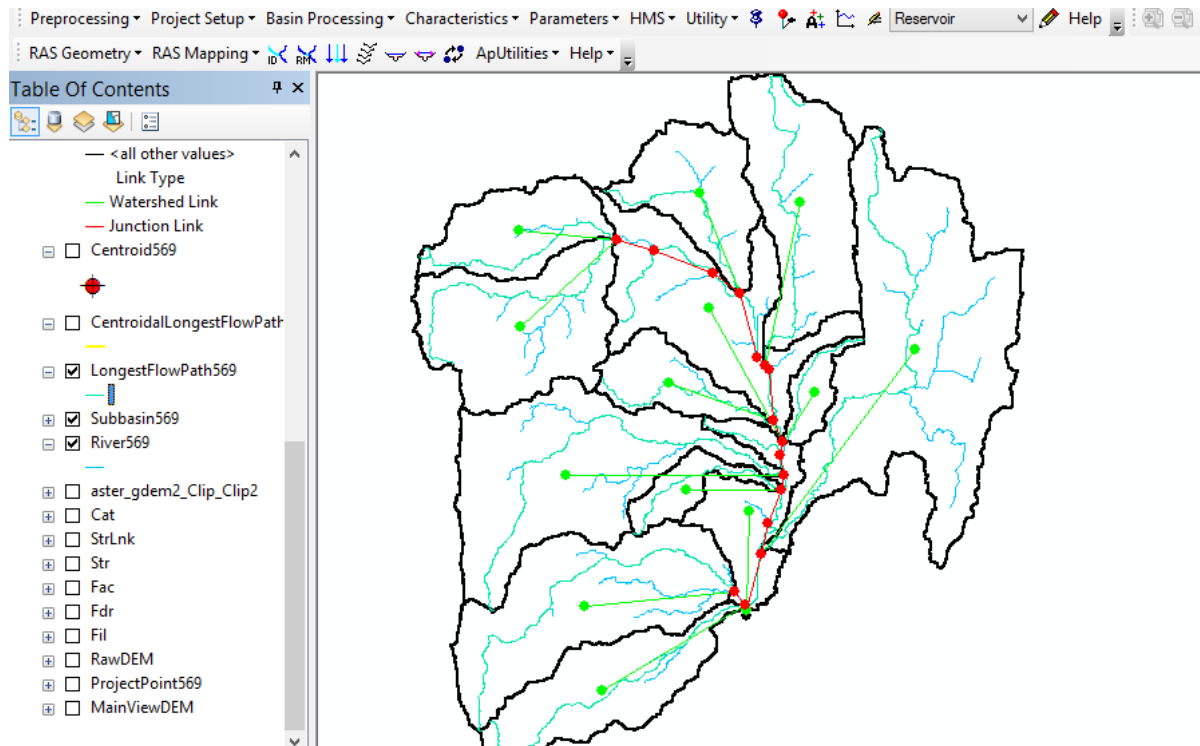
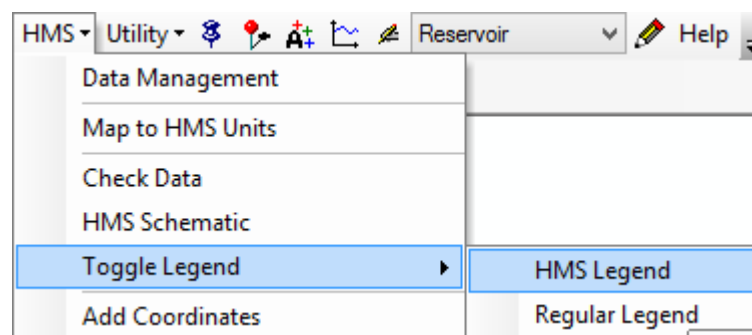


Figura 3.45: Esquema inicial HMS



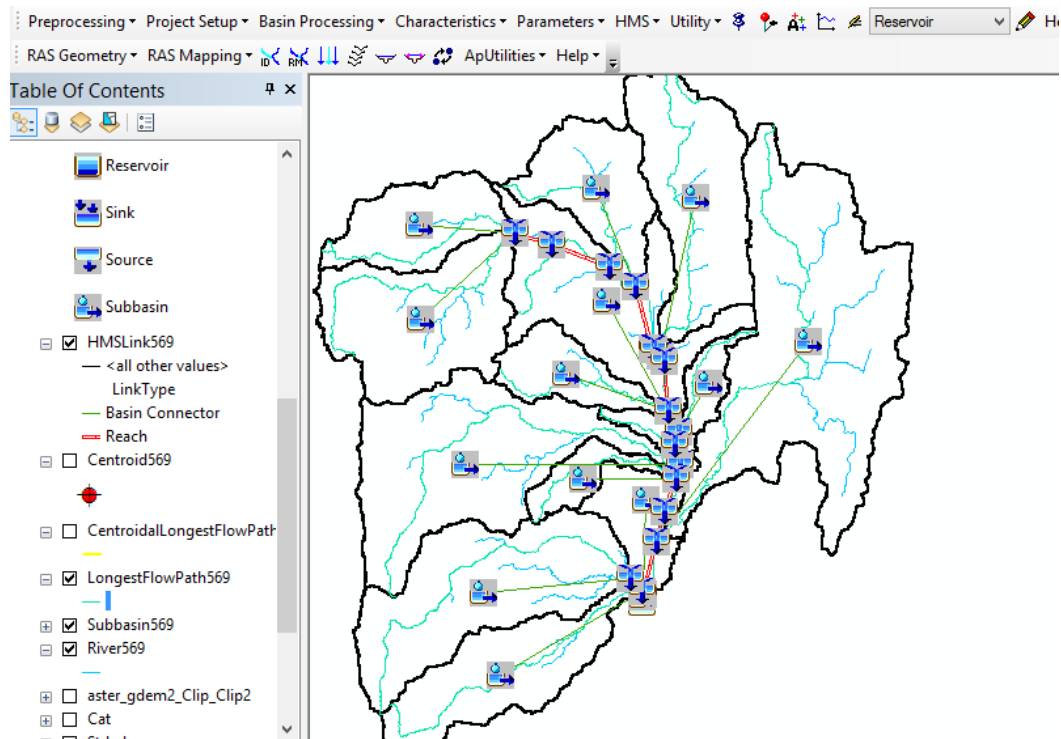
3.3.3.4.4 LEYENDA HMS

El HEC-HMS usa esta herramienta para representar iconos de elementos, puntos y líneas de elementos en los nodos y enlaces de capas de HMS. Para su utilización seleccionamos **HMS**, y **Tooggle HMS Legend** mostrando **HMS legend**:



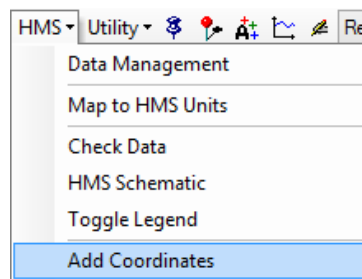
El usuario puede alternar entre **HMS legend** y **Regular Legend**, quedándonos con la primera opción.

Figura 3.46: Esquematación con la leyenda de HMS



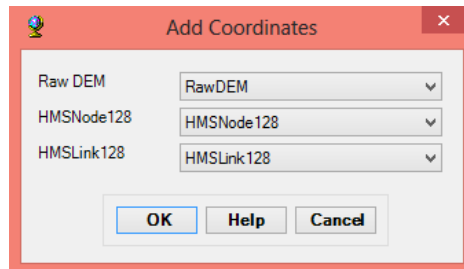
3.3.3.4.5 AÑADIR COORDENADAS

Este paso une las coordenadas geográficas a los elementos en el nodo y en las capas de enlace del HMS. La adición de coordenadas permite que los datos del SIG sean exportados en formato ASCII y se preserve la información geográfica. Las coordenadas son añadidas a las tablas de atributos. Para aplicar esta opción seleccionar **HMS** y **Add Coordinates**:



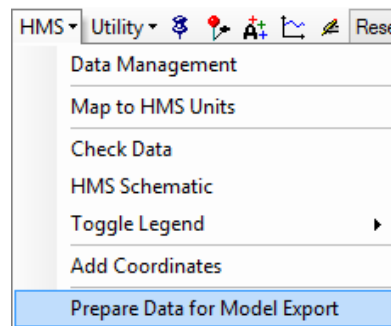
Revisar los conjuntos de datos de entrada, como se muestra en la *Figura 3.40*. Pulse **OK**

Figura 3.47: Añadir Coordenadas Editor



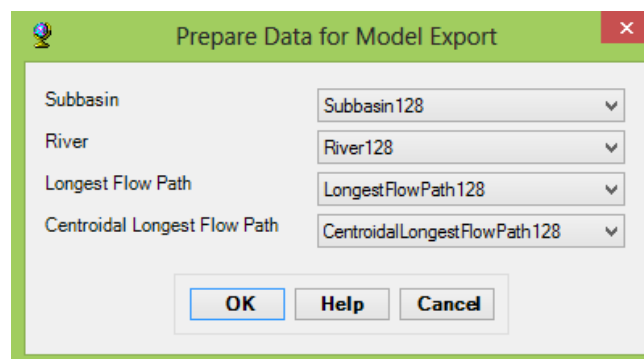
3.3.3.4.6 PREPARAR DATOS PARA EXPORTAR EL MODELO

El archivo del modelo de la cuenca en HMS que contiene la estructura de datos hidrológicos que incluye los elementos hidrológicos y su conexiones, relaciona los parámetros HEC-GeoHMS exportando algún parámetro para el archivo del modelo de la cuenca del HMS. Seleccionar **HMS**, luego **Prepare Data for Model Export**.



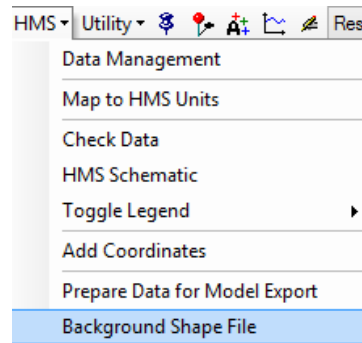
Constatar la selección correcta de la capa de río y la subcuenca en la **prepare for model export editor OK**.

Figura 3.48: Preparar datos para el modelo de exportación de diálogo



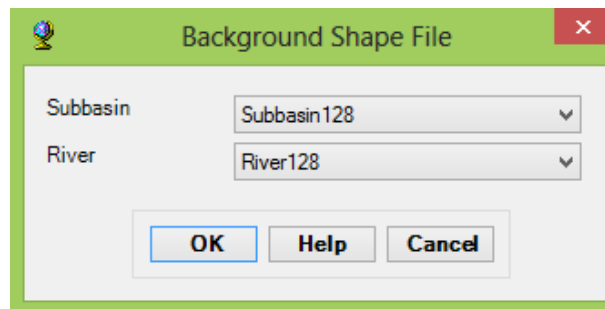
3.3.3.4.7 ARCHIVO DE RESPALDO DE MAPA

Las capas de respaldo de mapas capturan la información geográfica de los límites de subcuencas y extensiones de corrientes. Seleccionar **HMS**, luego **Background Shape File**.



El respaldo de archivos de mapas o archivo shape copia el directorio del proyecto desde el GeoHMS al directorio de proyecto del HMS cargando los archivos como un proyecto del HMS.

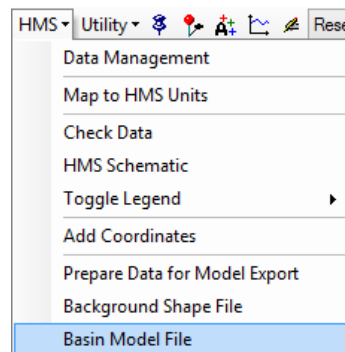
Asegúrese de que las capas subcuenca del río y se seleccionan y pulse OK.



Se abrirá una ventana que indica los archivos de forma se ha creado correctamente. Pulse **OK**. Estos archivos se guardan de forma automática en el directorio del proyecto.

3.3.3.4.8 ARCHIVO DE CUENCA

El archivo del modelo de la cuenca captura elementos hidrológicos, sus conexiones, y relaciona la información geográfica con un archivo de texto ASCII que será leído por el HMS. Para generar este paso seleccionamos **HMS, Basin File**.



Se ubica el nombre del archivo y se presiona **OK**.

Archivos de proyecto HEC-HMS adicionales pueden ser creados por HEC-GeoHMS; Sin embargo, no son necesarios. Los archivos de mapa de archivos de modelo de cuenca y de fondo se pueden importar en un proyecto de HEC-HMS existente.

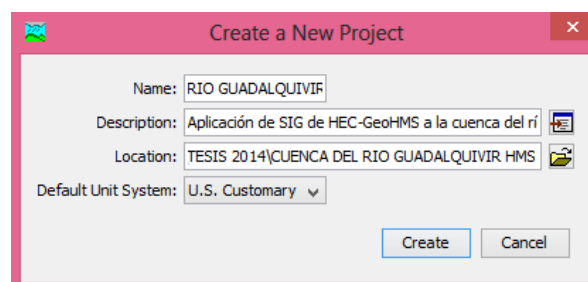
3.3.3.5 PROCESO DEL MODELO METEOROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR MEDIANTE EL USO HEC-HMS 4

Se establece un modelo HEC-HMS con entrada desde HEC-GEOHMS y un directorio, para crear un nuevo proyecto, se toma la copia del archivo de respaldo de mapas y el archivo del modelo de la cuenca a la carpeta del HEC-HMS.

3.3.3.5.1 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO

Para crear un nuevo proyecto se selecciona en el menú de comando **File**, luego seleccionar **New**, abrirá una ventana **Create a New Project**, asignando el nombre con el cual ya se ha identificado, se escribe una descripción, se ubica el lugar donde se encuentra el archivo en el equipo y se selecciona las unidades en que se desea trabajar. Se hace click en crear (Create).

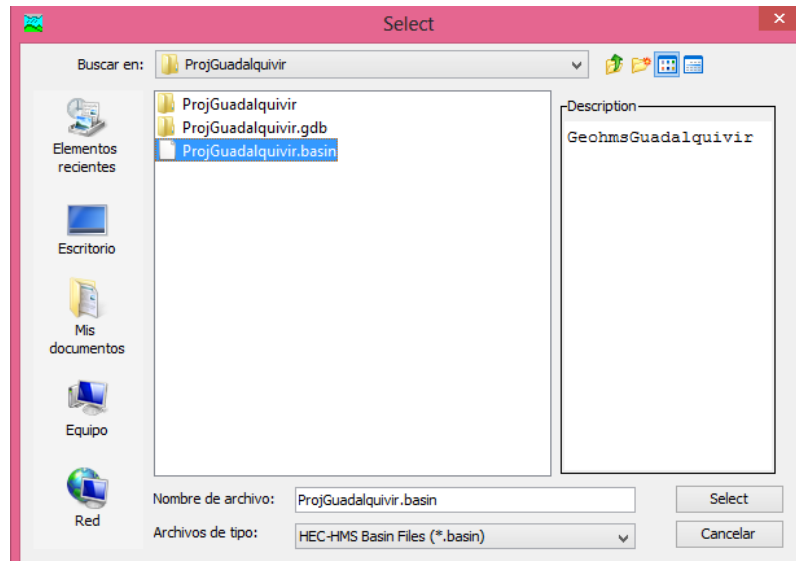
Figura 3.49: Creación de un nuevo proyecto en HEC-HMS



3.3.3.5.2 IMPORTAR EL ARCHIVO

Para importar el archivo del modelo de la cuenca creado por HEC-GeoHMS se selecciona **File → Import → Basin Model**, se busca la carpeta en el equipo y se trae el proyecto, se verifica la descripción y se le da **select**. Una vez el programa HEC-HMS ubica el archivo del proyecto, lo asume y lo muestra dentro de sus componentes.

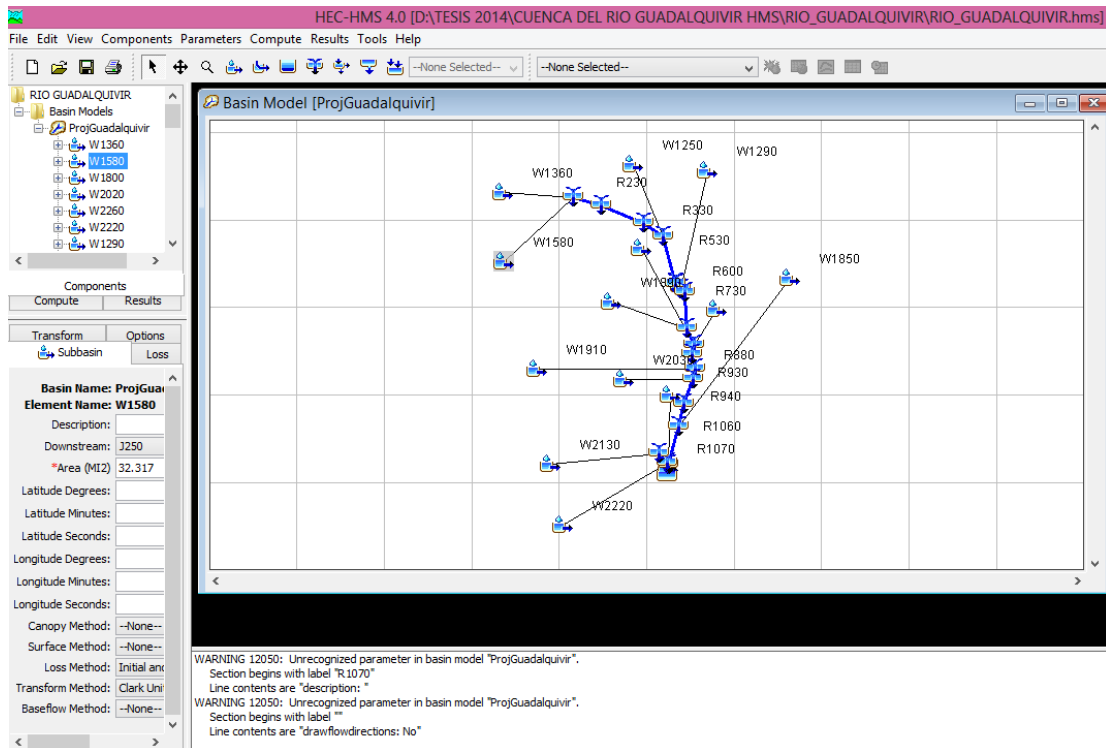
Figura 3.50: Importando archivos del modelo de cuenca



Vaya a la ubicación correcta y seleccione el archivo de modelo de cuenca, "**ProjGuadalquivir.basin**". Pulse el botón **Select**.

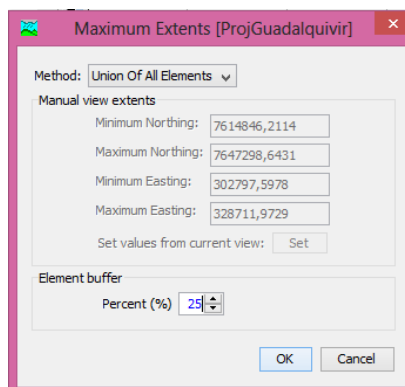
Usted debe notar se añade una carpeta Modelos Cuenca a la del Explorador de cuencas. El modelo de cuenca **ProjGuadalquivir** está contenida en esta carpeta. Cuando se selecciona el modelo de cuenca **ProjGuadalquivir** en el Explorador de cuencas, el mapa modelo de cuenca se abrirá en el área del escritorio, como se muestra en la *Figura 3.51*.

Figura 3.51: Modelo de la cuenca



- » Seleccione la opción de menú **View** → **Maximum Extents** para abrir el Editor de *Maximum Extents* (Figure 3.45-3.46).
- » Elija un método de la **Union of All Elements** y un Elements buffer de **25 %**.
- » Haga clic en el botón **OK** y el mapa cambiará de tamaño automáticamente. El elemento de red será similar a la del proyecto de HEC-GeoHMS.

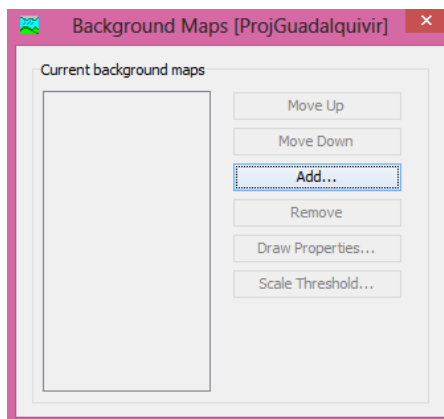
Figura 3.52: Establezca las extensiones Mapa



Añadir los archivos de forma de fondo **View** → **Background Maps**.

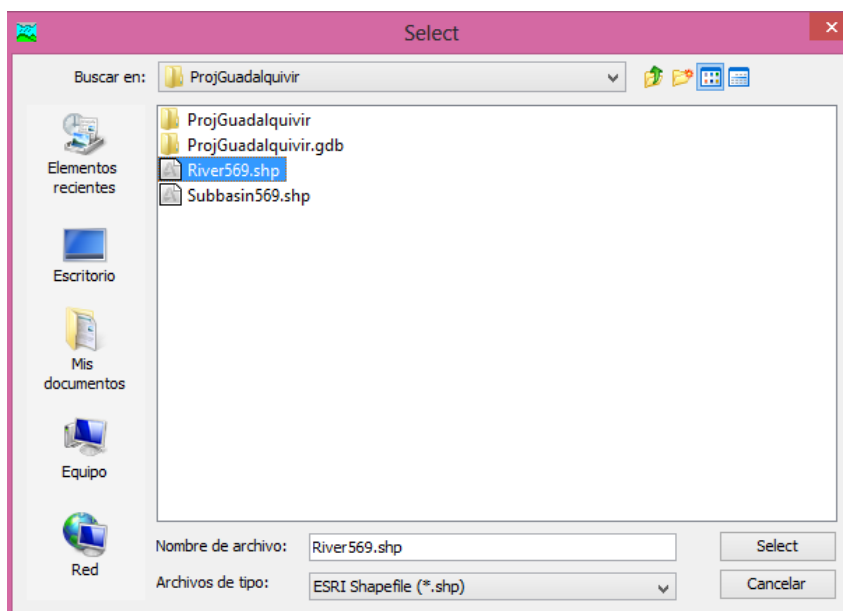
Haga clic en el botón **Add** en la ventana de Background **Maps** window (*Figure 3.53*)

Figura 3.53: Añadir Mapas de fondo utilizando el Editor de mapas de fondo



Asegúrese de que el tipo de archivo es ESRI Shapefiles (*.shp) y navegue hasta el directorio donde se encuentran los archivos de fondo la forma como se muestra en la *Figura 3.54*.

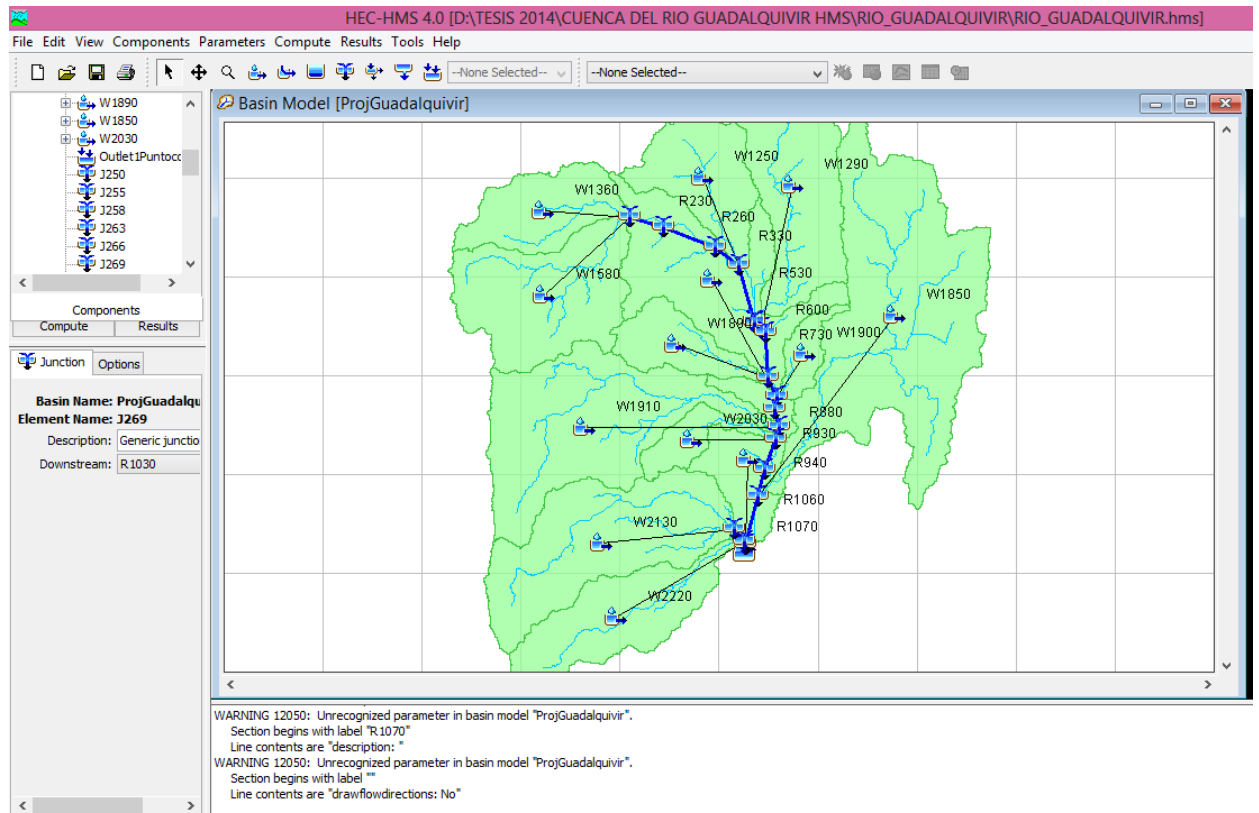
Figura 3.54: Seleccione el archivo de formas a Agregar un Mapa de fondo



Seleccione el archivo de forma **subbasin** y pulse el botón **Select**. El archivo forma se añadirá automáticamente al mapa modelo de cuenca. A continuación, agregue el

archivo de formas río al mapa. El **Background Maps** se puede utilizar para ordenar los archivos de forma de manera que las líneas de los ríos se dibujen en la parte superior de los polígonos subcuena y editar las propiedades de dibujo de las líneas y polígonos. La *figura 3.55* muestra el mapa de modelo de cuenca después de importar los archivos de fondo de forma.

Figura 3.55: Mapa de Modelo de la Cuenca



3.3.4 MODELO METEOROLÓGICO

Para la construcción del modelo meteorológico es necesario determinar la precipitación máxima diaria de cálculo para cada período de retorno y elegir un patrón de distribución temporal para esa precipitación.

El modelo meteorológico es uno de los muchos componentes en un proyecto. Su principal propósito es preparar las condiciones meteorológicas límites de la cuenca durante la simulación. Usualmente se crea mínimo un modelo de cuenca para luego

crear el modelo meteorológico. Las características que diferencian las tormentas dependen de dos parámetros; la duración de la tormenta y el período de retorno de la misma.

3.3.4.1 PRECIPITACIONES MÁXIMAS

Las estaciones pluviométricas que están ubicadas dentro de la cuenca son: Tucumillas, Coimata, Sella Quebrada y trancas, como ocurre casi en toda Tarija, no se dispone de mediciones de lluvias y sus correspondientes duraciones mediante pluviógrafos.

3.3.4.2 SELECCIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO

Para el estudio se obtienen valores para el período de retorno de 50 y 100 años, con el objeto de establecer conjeturas en relación a la variación de la escorrentía superficial.

3.3.4.3 SELECCIÓN DE LA DURACIÓN DE LA TORMENTA DE DISEÑO

Por definición, la duración de la lluvia más desfavorable y que provoca mayor pico de caudal de hidrograma es la del tiempo de concentración, que es el momento a partir del cual toda la superficie de la cuenca aporta agua en nuestra sección de estudio. Si la duración es menor, hay parte de la superficie de la cuenca que no aporta agua, por lo que el pico de caudal será menor, y si la duración es mayor, el pico es el mismo que cuando tomamos como duración el tiempo de concentración de la cuenca, ya que la superficie de agua es la misma, no aumenta. La tormenta seleccionada debería ser lo suficientemente larga de manera que toda la cuenca contribuya al escurrimiento en el punto de concentración. De modo que, la duración exceda el tiempo de concentración de la cuenca; algunos recomiendan que debería ser 3 o 4 veces el tiempo de concentración (Placer County, 1990).

La selección de la duración se basó en el análisis del tiempo de concentración de las sub-cuencas, este tiempo se estimó mediante el método de KIRPICH Z. P. (Californiana) y BASSO, E. son las fórmulas que más se adecuan a la cuenca. El tiempo de concentración de toda la cuenca del Río Guadalquivir es de **5,7 horas**. La duración para la tormenta de diseño de este estudio se ajusta al valor del tiempo de concentración de **6 horas**.

3.3.4.4 ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE LA TORMENTA DE DISEÑO

La estimación de la tormenta de diseño se llevó a cabo mediante la aplicación de un modelo empírico para estimar los valores de la curva Intensidad-Duración- Frecuencia. Sobre la base de los registros de los pluviómetros de las Estaciones Coimata, Trancas, Tucumillas y Sella Quebrada.

La precipitación varía con el tiempo para una misma tormenta y la duración varía de una tormenta a otra, esto es lo que se denomina un Análisis de Intensidad Duración- Frecuencia. Para llevar a cabo este análisis se tabulan los registros obtenidos en las estaciones pluviométricas, se ordenan los valores máximos anuales de mayor a menor.

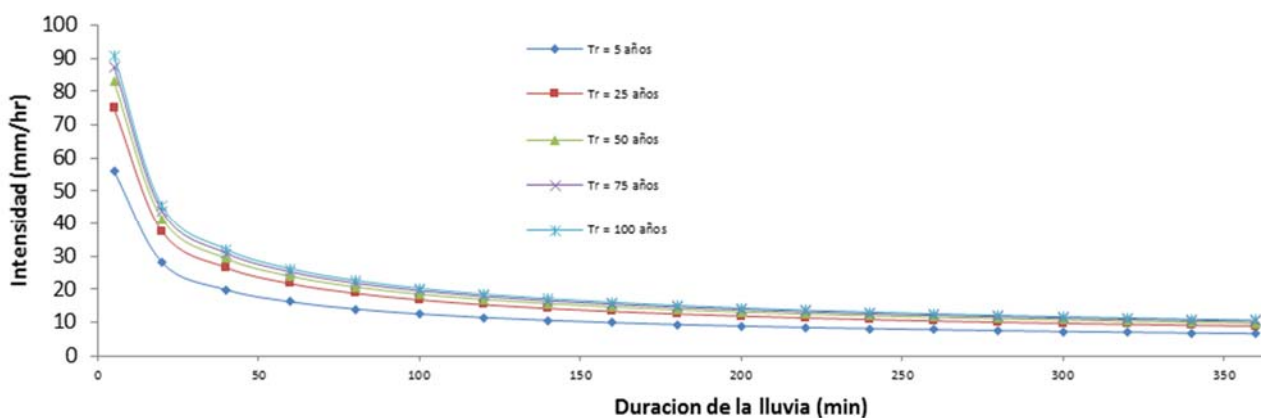
Se grafican los valores de las Intensidades máximas para distintas duraciones y períodos de retorno, y se obtienen del gráfico los valores de alturas de lluvia o de intensidades, los cuales son llevados a escala aritmética obteniéndose así la gráfica IDF.

Tabla 3.10: Datos para la gráfica IDF

TR (años)	Duración de la lluvia, en minutos																		
	5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
5	56.017	28.009	19.805	16.171	14.004	12.526	11.434	10.586	9.903	9.336	8.857	8.445	8.085	7.768	7.486	7.232	7.002	6.793	6.602
25	74.980	37.490	26.509	21.645	18.745	16.766	15.305	14.170	13.255	12.497	11.855	11.304	10.822	10.398	10.020	9.680	9.372	9.093	8.836
50	82.832	41.416	29.286	23.912	20.708	18.522	16.908	15.654	14.643	13.805	13.097	12.487	11.956	11.487	11.069	10.694	10.354	10.045	9.762
75	87.397	43.698	30.899	25.229	21.849	19.542	17.840	16.516	15.450	14.566	13.819	13.176	12.615	12.120	11.679	11.283	10.925	10.598	10.300
100	90.627	45.313	32.041	26.162	22.657	20.265	18.499	17.127	16.021	15.104	14.329	13.663	13.081	12.568	12.111	11.700	11.328	10.990	10.680

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.56: Curvas IDF Estación Trancas



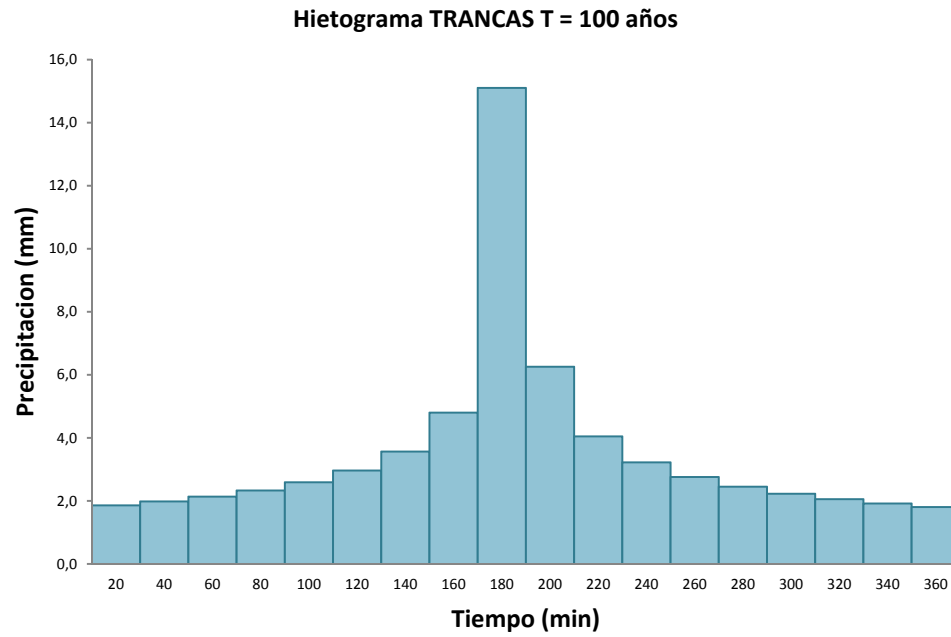
3.3.4.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE LA TORMENTA DE DISEÑO

La distribución de los valores de la tormenta de diseño se realizó según el método de bloques alternativos (Chow, Maidment, 1988) para desarrollar un pluviograma de valores de precipitación incremental. Este método sitúa el bloque de altura incremental máximo en la mitad de la duración requerida. Los bloques remanentes se arreglan entonces en orden descendente, alternativamente antes y después del bloque central. La precipitación resulta de multiplicar la intensidad (mm/h) por el intervalo de tiempo en horas.

Tabla 3.11: Resultado de precipitación a usar para el modelo

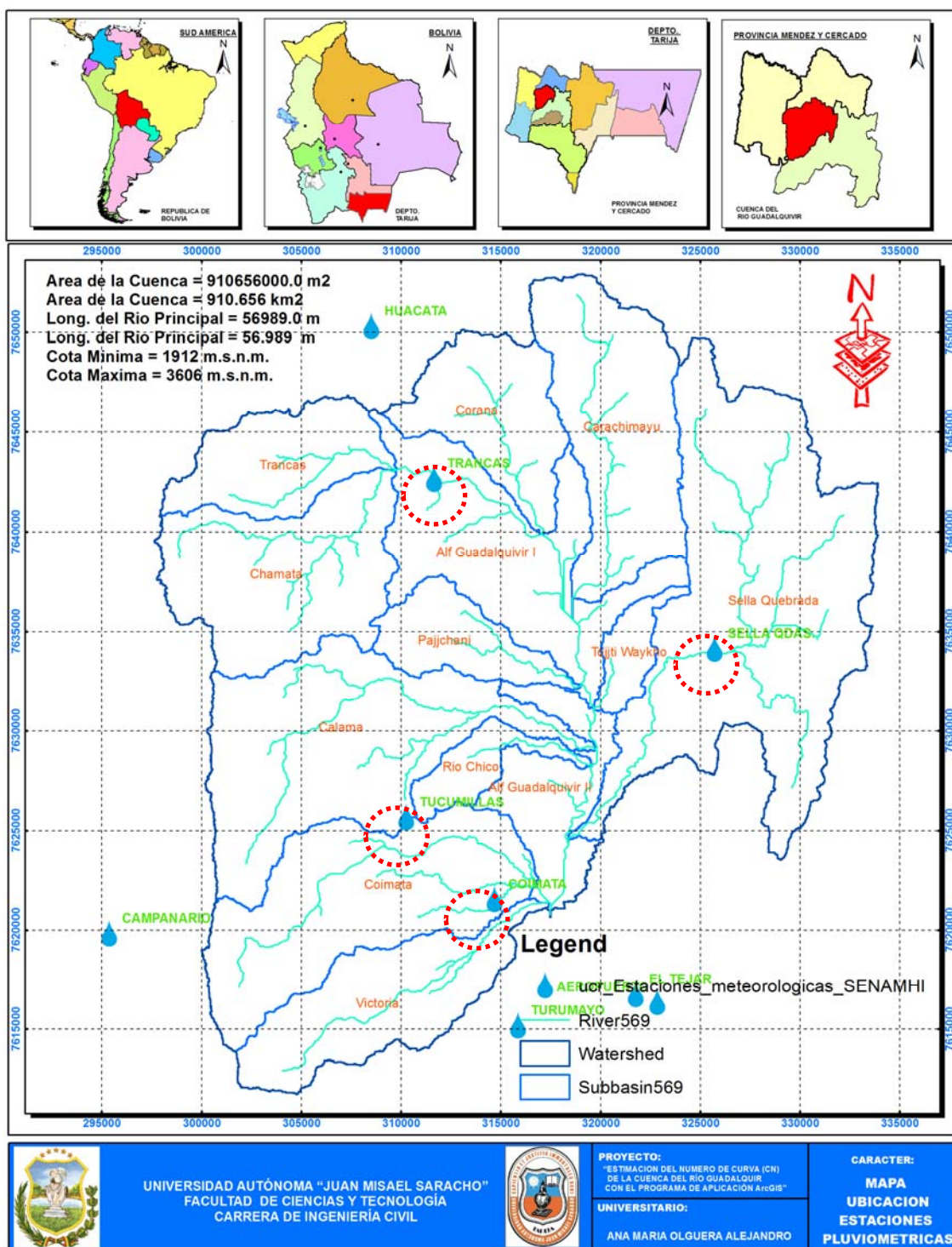
Período de Retorno	T	100	años	
Intervalo de Tiempo	Δt	20	min	
t (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Δ Precipitación	Hietograma
20	45.313	15.104	15.104	1.9
40	32.041	21.361	6.256	2.0
60	26.162	26.162	4.801	2.1
80	22.657	30.209	4.047	2.3
100	20.265	33.775	3.566	2.6
120	18.499	36.998	3.224	3.0
140	17.127	39.963	2.964	3.6
160	16.021	42.722	2.759	4.8
180	15.104	45.313	2.592	15.1
200	14.329	47.765	2.451	6.3
220	13,663	50,096	2,331	4.0
240	13,081	52,324	2,228	3.2
260	12.568	54,460	2,137	2.8
280	12.111	56,516	2.056	2.5
300	11.700	58,499	1.984	2.2
320	11.328	60,418	1,919	2.1
340	10.990	62,277	1,859	1.9
360	10.680	64,083	1,806	1.8

Fuente: Elaboración propia



Para las estaciones Coimata, Sella Qda. Y Tucumillas fueron realizadas de la misma forma para períodos de retorno 50 y 100 años los cuales serán introducidos en el modelo.

Figura 3.57: Mapa de ubicación de las estaciones



Fuente: Elaboración propia

3.3.4.6 MENÚ COMPONENTES DE HEC-HMS

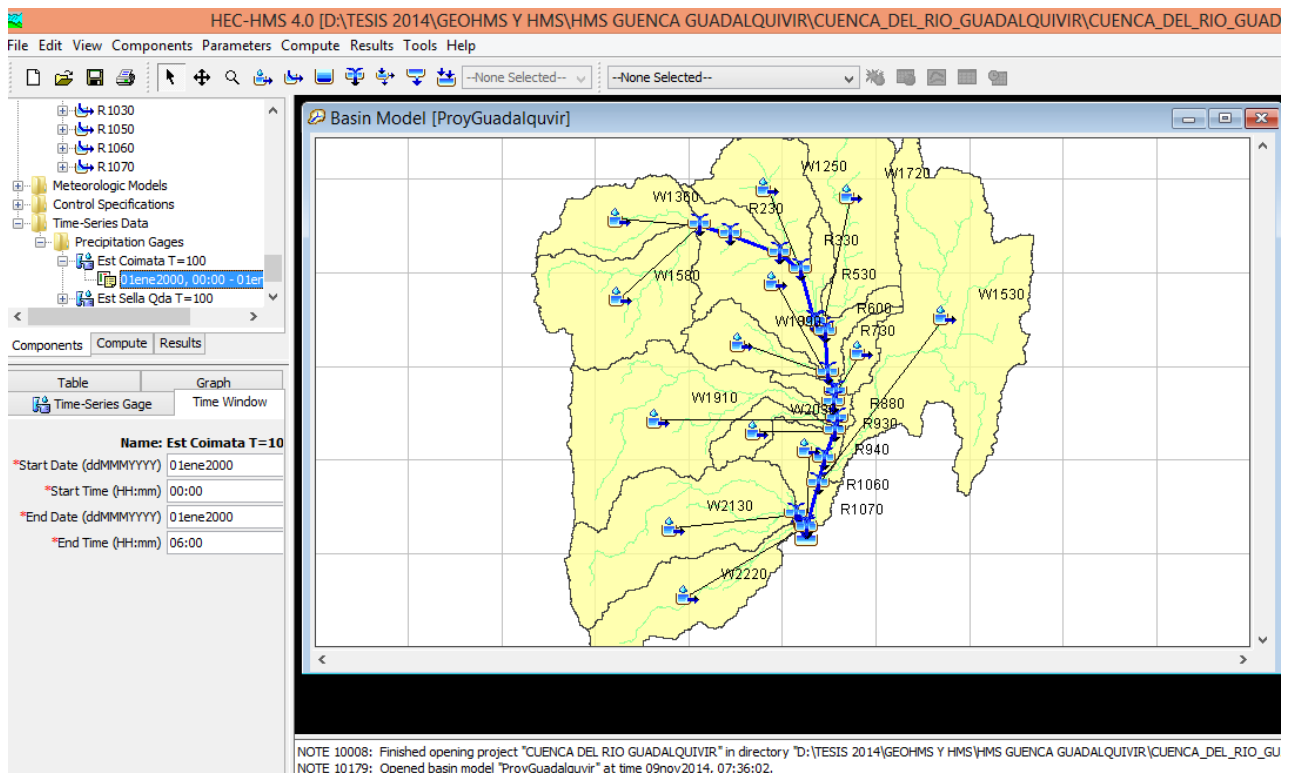
El comando del menú Components incluye una lista de componentes como: Time – Series Data Manager, Meteorologic Model Manager, Control Specifications Manager.

3.3.4.7 ADMINISTRADOR DE LAS SERIES DE DATOS DEL TIEMPO

Desde Menú **components Time - Series Data manager**, en la ventana se selecciona **Precipitación gage New**, luego se le asigna nombre de la estación y descripción se hace click en **Create**.

Una vez creado el archivo **Time-Series Data Manager** en la tabla de contenidos del project, se despliega la carpeta **Precipitation Gage** que muestra las estaciones creadas y haciendo click sobre cada estación, al abrirse la ventana se asignará las características de ubicación, (latitud y longitud).

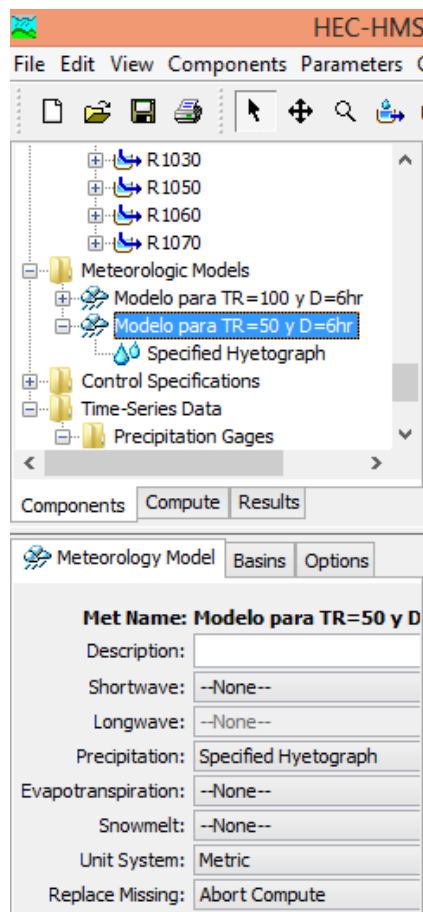
Figura 3.58: Ventana del administrador de series de datos.



3.3.4.8 CREACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO

Desde el menú **Components Meteorologic Model Manager**, para crear un nuevo modelo meteorológico para cada año, se presiona el botón **New**. Se crea un modelo meteorológico, generando una tormenta de diseño, las características que diferencian las tormentas dependen de dos parámetros: la duración de la tormenta y el período de retorno de la misma, se considera una duración de diseño de 6 horas, correspondientes a tres períodos de retorno 50 y 100 años.

Figura 3.59: Creación del modelo meteorológico.

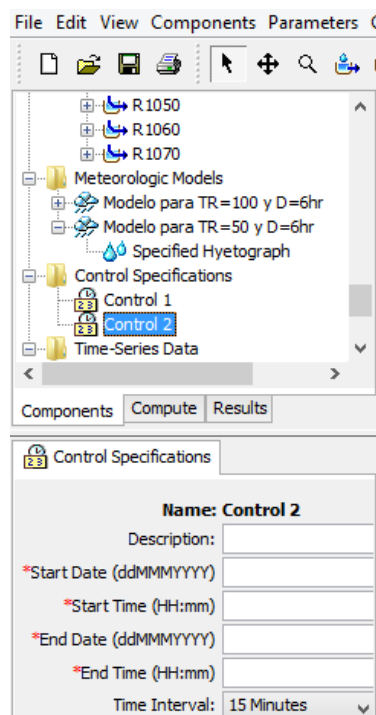


3.3.5 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Las especificaciones de control fijan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación. La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación.

En esta sección se le asigna un control, que es el medio virtual que va a observar como circula el caudal a través de la cuenca. Para ello se selecciona **Component**→**Control specification** →**New**, se le asigna nombre y descripción y se presiona **OK**, en el siguiente menú se coloca el día en que caerá la tormenta (**Start date** y **End date**), un intervalo de tiempo (**Time interval**) en lo posible que sea menor que el 30% del intervalo de tiempo que se usará para ingresar los datos de los pluviómetros (si no el programa protesta), y el inicio y final del tiempo de observación lluvia (**Start time** y **End time**), que tendrá que ser mayor que el tiempo que se supondrá que dura la lluvia, porque si no se realiza de esta manera, entonces no le dará tiempo a observar como baja todo el caudal y por lo tanto no se tendrán hidrogramas completos.

Figura 3.60: Especificaciones de control.



3.3.5.1 CORRIDA DE LA SIMULACIÓN

Es uno de los tres componentes que calcula los resultados, está compuesto de un modelo meteorológico, un modelo de cuenca y las especificaciones de control, los resultados son visualizados como gráficos, tablas y tablas de tiempo de series.

Compute Create a Simulation Run, se asigna en **Name** cada corrida como se muestra en la secuencias siguientes.

Para ver los resultados generados por el programa se puede seleccionar en los menús desplegables del modelo de cuenca la opción **Result** ⇒ **Global summary table**, o bien se puede situar el puntero del mouse sobre cualquiera de los elementos del modelo, darle al botón derecho y seleccionar cualquiera de las opciones del submenú **Results**.

Es conveniente indicar que *cms* son *cubic meters per second*, esto es, m^3/s , y es la unidad con la que se miden los caudales. Los hidrogramas se ven en **Result** → **Graph**, como se muestra en la Figura.

Figura 3.61: Creciente para T=100 años y D = 6h

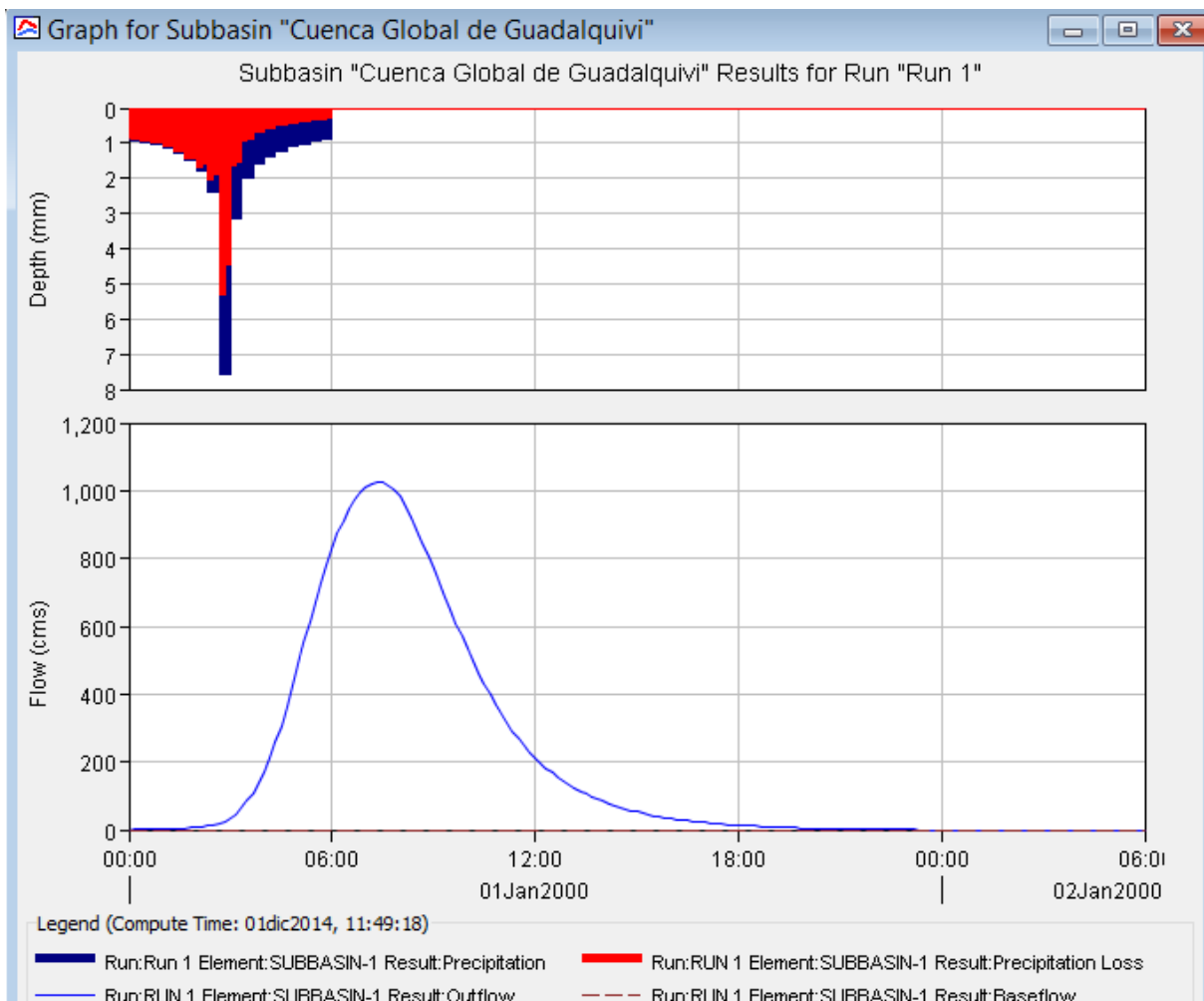


Figura 3.62: Tormenta para T=2 años y D=1h

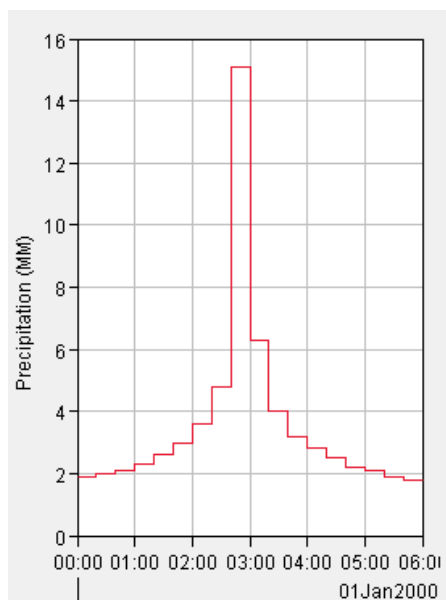
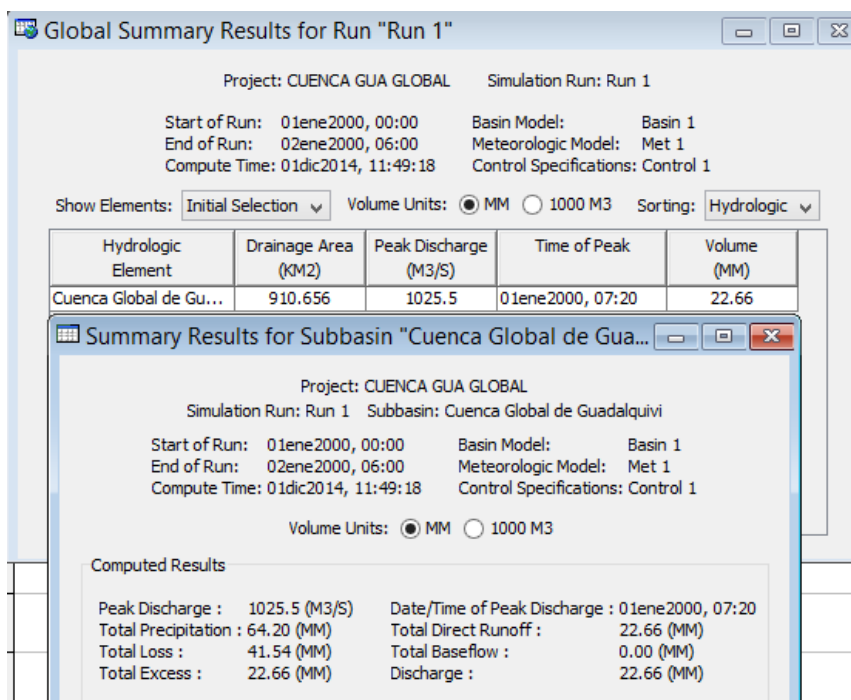


Figura 3.63: Tabla de resultados de la simulación.



3.4 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)

3.4.1 CÁLCULO DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO C

A continuación se presenta el procedimiento realizado para la determinación de C.

Para la obtención de esta variable, es necesario utilizar mapas de *uso de suelo*, *pendiente*, *textura del suelo*. Utilizando un programa desarrollado para Sistemas de Información Geográfica que es el ArcGIS.

En la *Tabla 3.12* se muestran los valores del coeficiente basada en parcela experimentales en función de uso de suelo, pendiente y textura de suelo (%).

3.4.2 MÉTODO DE PREVERT

Ampliamente difundida en Europa y basada al igual que otros métodos, en parcelas experimentales. Su contenido es el siguiente:

Tabla 3.12: Valores coeficiente de escorrentía C (método Prevert)

Uso del Suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos - limoso Limoso - arenoso	Limoso Limoso - arcilloso	Arcilloso
BOSQUE	0 - 5	0,10	0,3	0,4
	5 - 10	0,25	0,35	0,5
	10 - 30	0,3	0,4	0,6
	> 30	0,32	0,42	0,63
PASTIZAL	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 - 10	0,3	0,4	0,55
	10 - 30	0,35	0,45	0,65
	> 30	0,37	0,47	0,68
CULTIVO AGRICOLA	0 - 5	0,3	0,5	0,6
	5 - 10	0,4	0,66	0,7
	10 - 30	0,5	0,7	0,8
	> 30	0,53	0,74	0,84

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia “Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (C)”

3.4.3 GENERACIÓN DE (C)

La metodología seguida para combinar las capas de información y obtener el coeficiente de escorrentía (C) será al igual que para el número de curva. A cada una de las variables que interviene en la obtención del coeficiente de escorrentía se le asignó un número primo, considerando que la característica hidrológica era única (*Tabla 3.13*). Los mapas de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores.

Tabla 3.13: Reclasificación de números primos.

CARACTERISTICAS	NUMEROS PRIMOS
pendiente 0,15 %	1
pendiente 0 - 5 %	2
pendiente 5 - 10 %	3
pendiente 10 - 30 %	5
pendiente > 30 %	7
Arenos - Limoso Limoso - Arenoso	11
Limoso Limoso - Arcilloso	13
Arcilloso	17
Bosque	19
Pastizal	23
Cultivo Agrícola	29

Fuente Elaboración propia

Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un número diferente. Así pues, si se multiplican los mapas de usos de suelo, pendiente y textura de suelo, dará un resultado diferente por cada combinación de tres números primos (*Tabla 3.14*). De esta manera, conociendo el resultado del producto se puede saber de qué características de uso, textura y de pendiente se tratan y se podrá encontrar su coeficiente de escorrentía en la *Tabla 3.12*. Para obtenerlo con el SIG de una manera automática, se ha creado un archivo de reclasificación con todos los valores posibles, el cual se utiliza para reclasificar el mapa que contiene el producto de los tres mapas de entrada.

Tabla 3.14: Valores resultantes del producto de los números primos.

Uso del Suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos - limoso Limoso - arenoso	Limoso Limoso - arcilloso	Arcilloso
BOSQUE	0 - 5	418	494	646
	5 - 10	627	741	969
	10 - 30	1045	1235	1615
	> 30	1463	1729	2261
PASTIZAL	0,15	253	299	391
	5 - 10	759	897	1173
	10 - 30	1265	1495	1955
	> 30	1771	2093	2737

Uso del Suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos - limoso Limoso - arenoso	Limoso Limoso - arcilloso	Arcilloso
CULTIVO AGRICOLA	0 - 5	638	754	986
	5 - 10	957	1131	1479
	10 - 30	1595	1885	2465
	> 30	2233	2639	3451

Fuente Elaboración propia

Para una cuenca formada por varios tipos de suelo (textura del suelo) y pendientes a un C ponderado se calcula mediante la Ecuación:

$$C_{ponderado} = \frac{\sum C_i * A_i}{\sum A_i} \quad (3.1)$$

Donde:

C ponderado: Coeficiente de escorrentía ponderado para calcular el volumen de escurrimiento.

I: Índice de subdivisiones de la cuenca para tipo de suelo y uso de la tierra.

C_i: Coeficiente de escorrentía para la subdivisión i.

A_i: Área de drenaje de la subdivisión i.

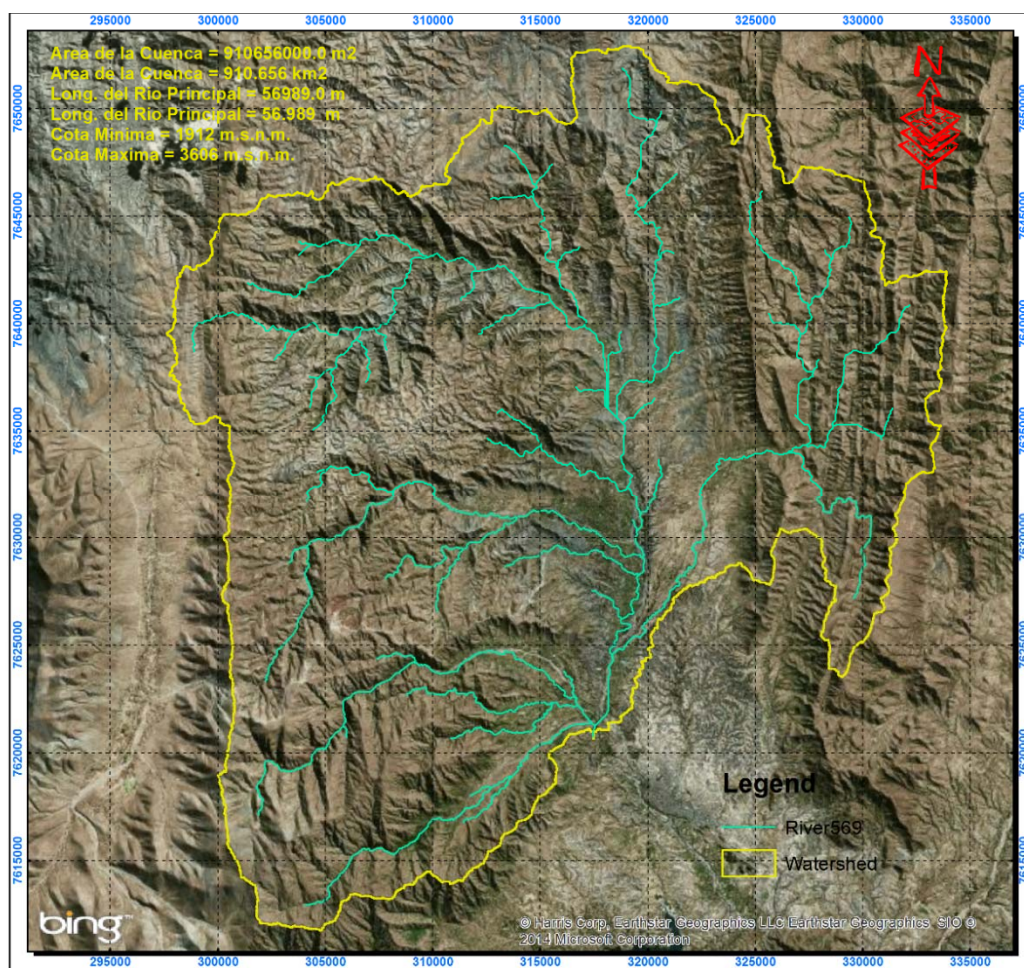
CAPÍTULO IV. PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1 OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE CAUCES Y SUBCUENCAS

La delimitación de cuencas y áreas de drenaje se realizó en base a imágenes satelitales y con ayuda del mapa de elevación digital del terreno (DEM) obtenido del SRTM (proyecto de la NASA denominado Shuttle Radar Topography Misión), como se describe en el *apartado 3.1-3.120*.

Para cada subcuenca hay que determinar el área, la longitud máxima de flujo en ella y sus cotas superior e inferior.

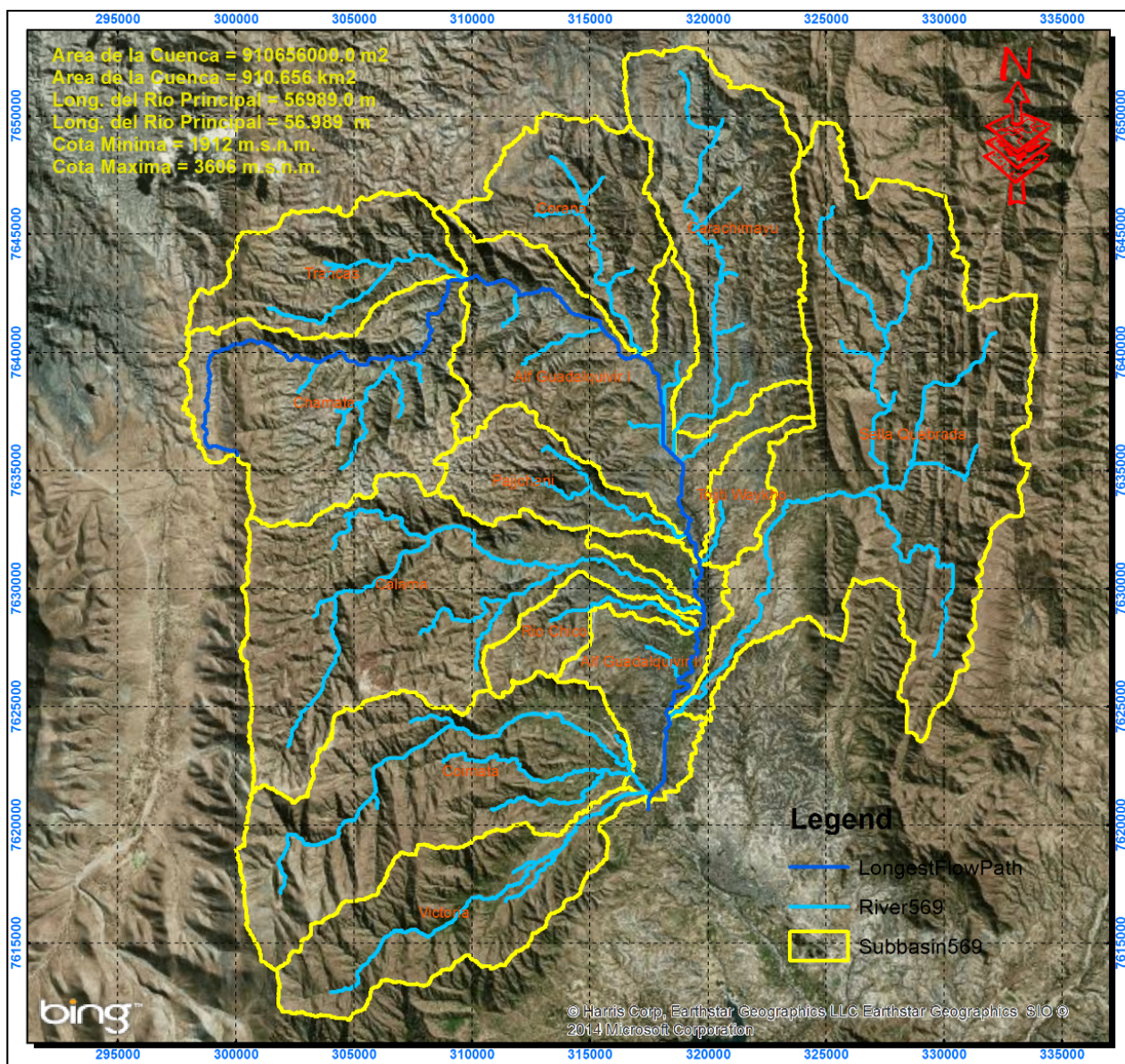
Figura 4.1: Mapa de delimitación de la cuenca de aporte Guadalquivir



Fuente Elaboración propia

De este modo, la superficie total de la cuenca hidrológica del río Guadalquivir abarca una superficie de 910,656 km² y 56,898 km de trayectoria del curso principal. Este curso tiene una pendiente media de 2,973% desde el punto más alto (3.606 msnm) hasta el de punto más bajo de la cuenca (1.912 msnm).

Figura 4.2: Mapa de Delimitación de las subcuencas de aporte Guadalquivir



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.1: Resumen características fisiográficas de la cuenca (Global)

NAME	NOMBRE	AREA (km2)	ElevUP m.s.n.m	ElevDS m.s.n.m	Longitud	Pendiente m/m
	SUBCUENCA				Río	
					km2	
W1250	CORANA	48.728	2861	2027	27.23	0.03
W1360	TRANCAS	44.017	3610	1935	40.05	0.04
W1580	CHAMATA	83.702	2923	2074	15.46	0.05
W1530	SELLA	185.355	3471	2198	15.92	0.08
W1720	CARACHIMAYU	81.633	2735	1993	24.38	0.03
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87.238	2698	1994	10.37	0.07
W1890	PAJCHANI	28.985	3606	2198	22.41	0.06
W1900	TOJJTI WAYKHO	12.687	2786	1997	15.58	0.05
W1980	CALAMA	117.978	2223	1910	19.47	0.02
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38.885	2576	1962	13.18	0.05
W2030	RÍO CHICO	16.381	3969	1969	32.39	0.06
W2130	COIMATA	103.271	4216	1930	23.33	0.10
W2220	VICTORIA	61.796	4175	1937	28.23	0.08

Fuente: Elaboración Propia

4.2 OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

A continuación se describe la metodología seguida para generar automáticamente el número de curva a escala regional y se presentan los resultados obtenidos en su aplicación a la cuenca del río Guadalquivir.

4.2.1 MAPA DE GRUPO HIDROLÓGICO

En principio se ha asignado el grupo hidrológico A, B, C, D en función del tipo de suelo y textura que se muestra en la *figura 4.3* y *figura 4.4* se reporta la *tabla 4.2* y *figura 4.5 (mapa de grupo hidrológico)* de la fusión de los mapas de tipo de suelo y textura del suelo.

Tabla 4.2: GH del suelo en función de Textura y tipo de suelo

DOMAI N	DESCRIPCION	TEXTURA	GRUPO HIDROLOGIC O ASIGNADO
1	Consociación Leptosol	FYL	B
3	Asociación Leptosol - Cambisol - Phaeozem	FA	B
4	Asociación Leptosol - Phaeozem	FA	B

DOMAI N	DESCRIPCION	TEXTURA	GRUPO HIDROLOGIC O ASIGNADO
2	Asociación Leptosol - Cambisol - Regosol	AF	A
13	Consociación Cambisol	FA	B
13	Consociación Cambisol	FA	B
4	Asociación Leptosol - Phaeozem	FA	B
36	Asociación Lixisol - Cambisol	FL	C
16	Asociación Cambisol - Phaeozem	F	B
36	Asociación Lixisol - Cambisol	YL	D
19	Asociación Cambisol - Lixisol	FYL	C
36	Asociación Lixisol - Cambisol	FYA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	FYA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	FA	B
34	Consociación Lixisol	FA	B
10	Asociación Regosol - Lixisol	YL	D

Fuente: Elaboración Propia de la fusión de mapas tipos de suelo y textura

4.2.2 MAPA DE USO DE SUELO

Luego tendremos el uso de suelo que generan mapas de usos del suelo a partir de imágenes de satélite, en el presente estudio la fuente de información de esta variable es ZONISIG que se clasifico según ZAE en 19 tipos de usos en Tarija, habiendo 11 tipos de usos para la cuenca del Río Guadalquivir como se indica en la *tabla 4.3* y *figura 4.6*, siendo el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del área es por ello por lo que se ha propuesto una tabla (*tabla 3.5*) de equivalencia entre los usos del suelo que aparecen en la leyenda de dicho mapa y los usos del suelo propuestos por el SCS.

Tabla 4.3: Tipos de usos de la cuenca Guadalquivir

DOMAIN	Descripción	Área (km ²)
7	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)	129,261
10	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)	111,941
4	Ganadero extensivo con ovinos	138,312
9	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos	105,273
18	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y	256,992

DOMAIN	Descripción	Área (km ²)
	caprinos	
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales	10,076
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña	84,162
3	Agropecuario intensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos	50,200
11	Agropecuario extensivo con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)	14,542
6	Ganadero extensivo con ovinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramiento rocoso)	9,326
19	Bosque implantado. Uso secundario: ganadero extensivo con vacunos y caprinos	0,572
TOTAL ÁREA		910,656

Fuente: Elaboración propia en base a la información ZONISIG

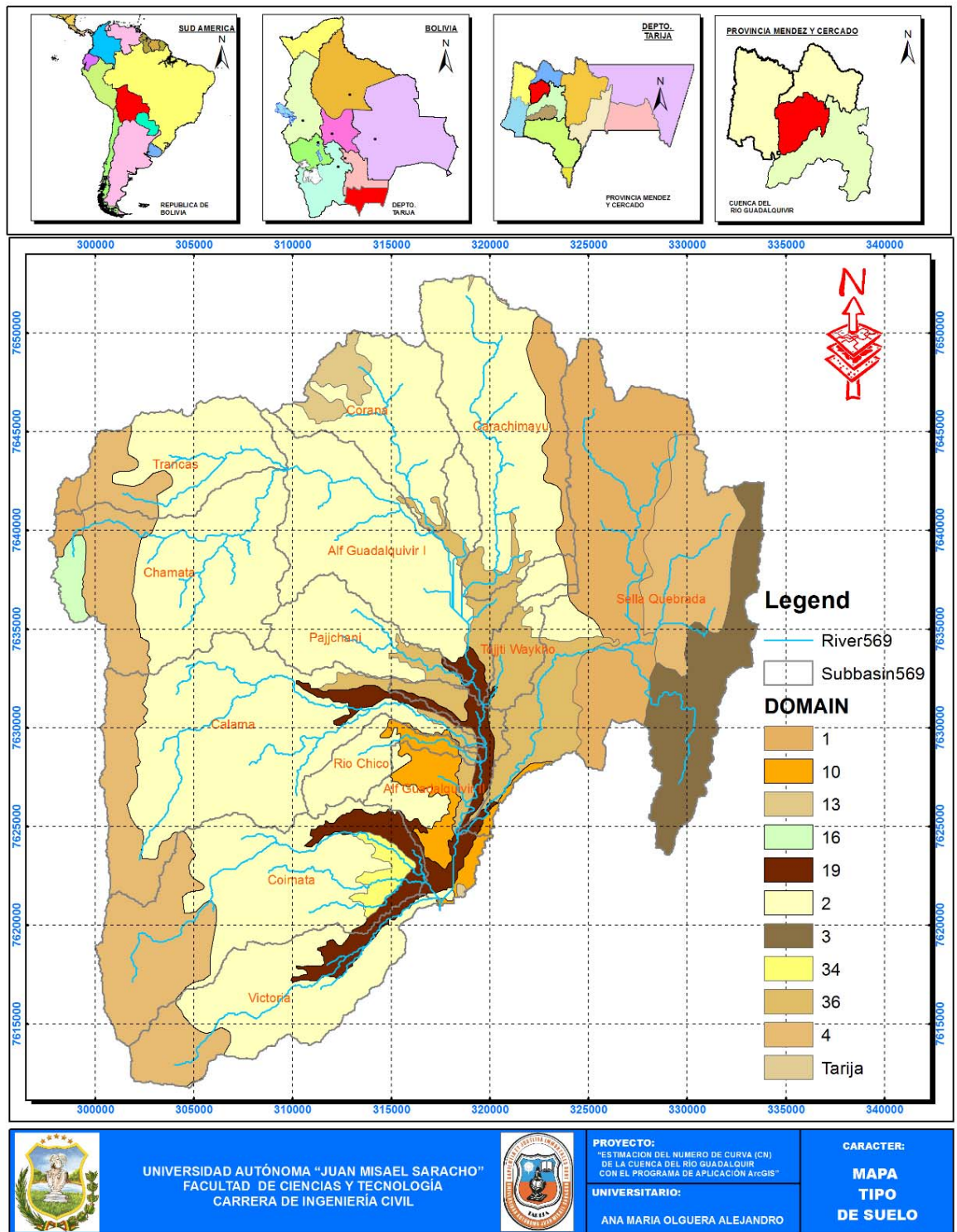
4.2.3 MAPA DE PENDIENTES

Asimismo se elaboró el mapa de pendientes como se observa en la *figura 4.7*, para ello se necesitó un Modelo de Elevación Digital, que se puede definir como una matriz de números ordenados que representa la distribución espacial de las elevaciones sobre algún dato arbitrario del territorio (Moore et al., 1993) los pasos en el *capítulo 3*.

4.2.1 GENERACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

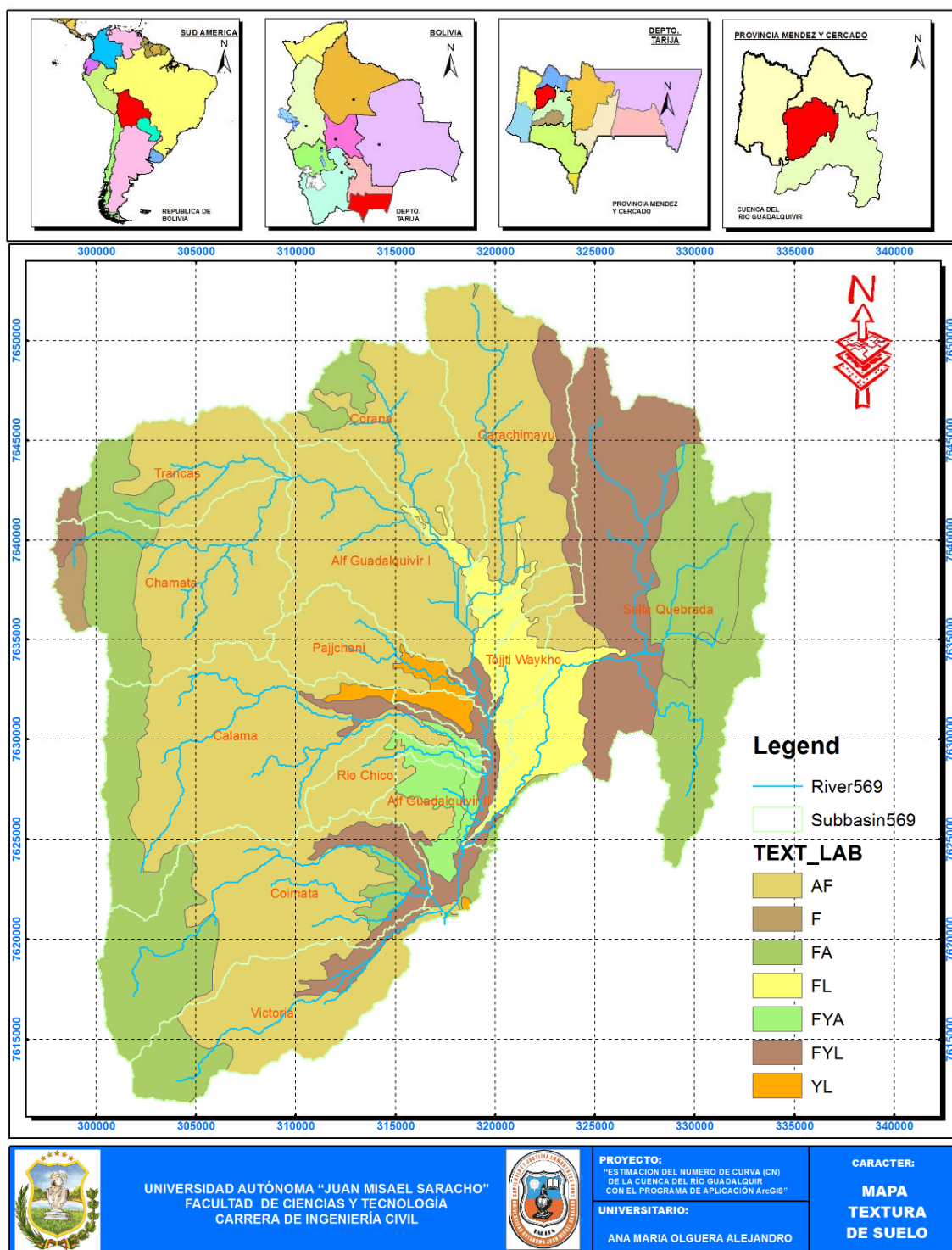
Cada clase de las variables pendientes, usos y tipos de suelo, se reclasificó con una tabla de números primos de acuerdo a la (*Tabla 3.4*), y se multiplicaron las tres capas (*Figura 4.8*). El mapa resultante se reclasificó según la correspondencia entre el producto de números primos y el valor del número de curva asociado, originando el mapa del número de curva que se muestra en la (*Figura 4.9*). La resolución espacial o tamaño de celda de este mapa es de 30 x 30m.

Figura 4.3: Mapa de tipo de suelo de la cuenca Guadalquivir



Fuente: Elaboracion propia en base a informacion ZONISIG

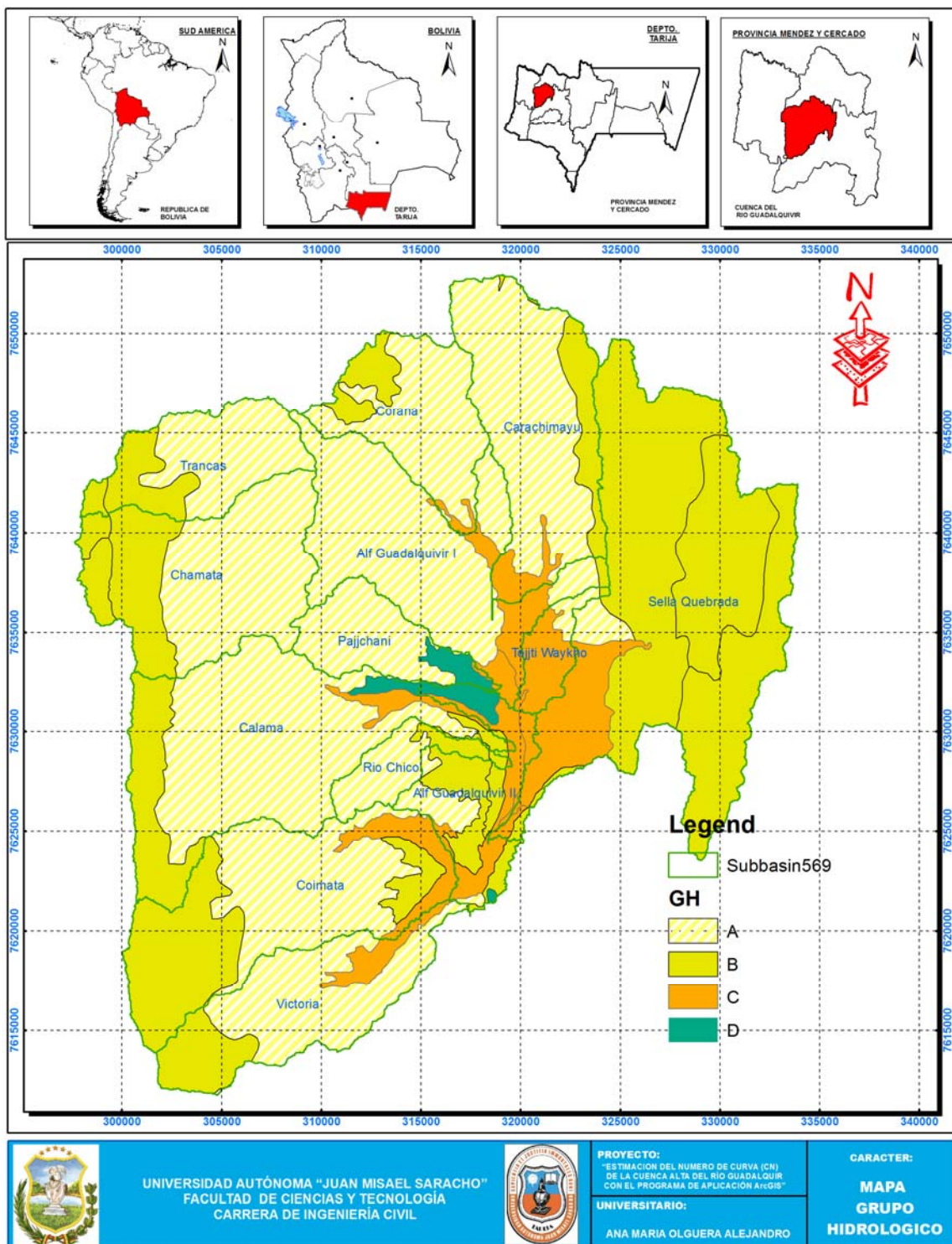
Figura 4.4: Mapa de textura de suelo de la cuenca Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia en base a información ZONISIG

Figura 4.5: Mapa de grupo de suelo en la Cuenca del Guadalquivir

Según la clasificación del SCS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

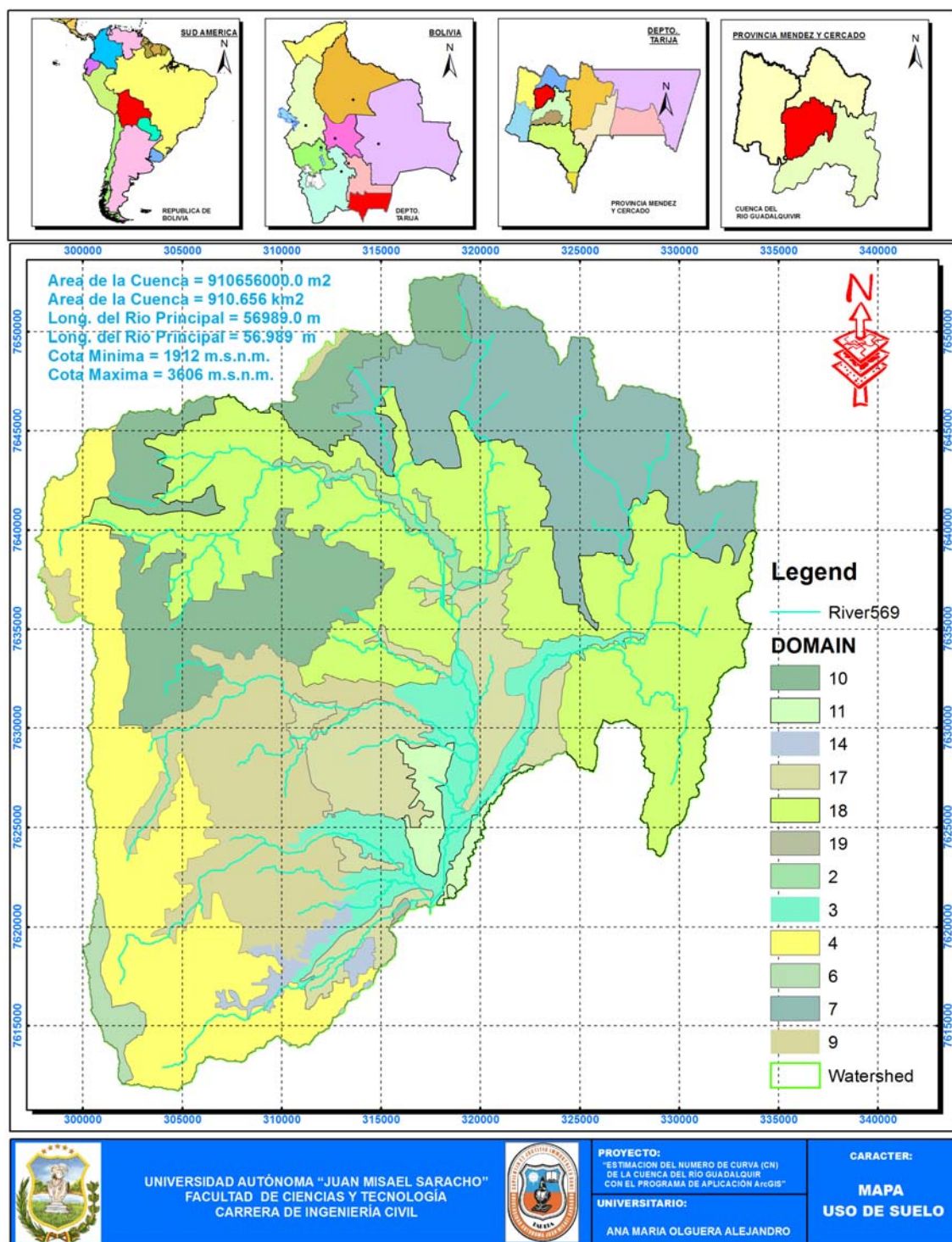


PROYECTO:
 "ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN)
 DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR
 CON EL PROGRAMA DE APLICACIÓN ArcGIS"
 UNIVERSITARIO:
 ANA MARIA OLGUERA ALEJANDRO

CARACTER:
**MAPA
 GRUPO
 HIDROLÓGICO**

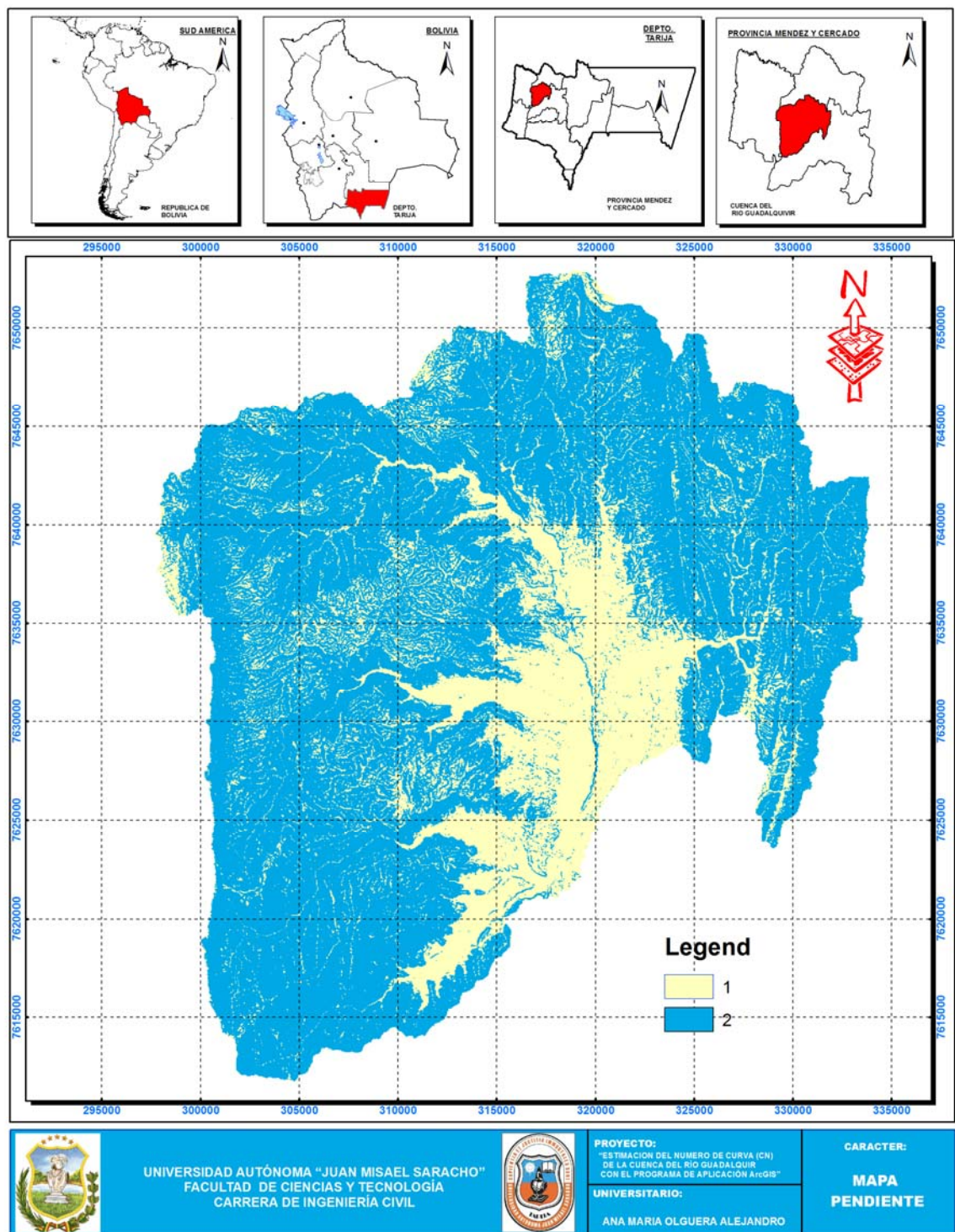
Fuente: Elaboración propia en base a información ZONISIG

Figura 4.6: Mapa de usos del suelo de la cuenca del Guadalquivir con leyenda del SCS



Fuente: Elaboración propia en base a la información ZONISIG

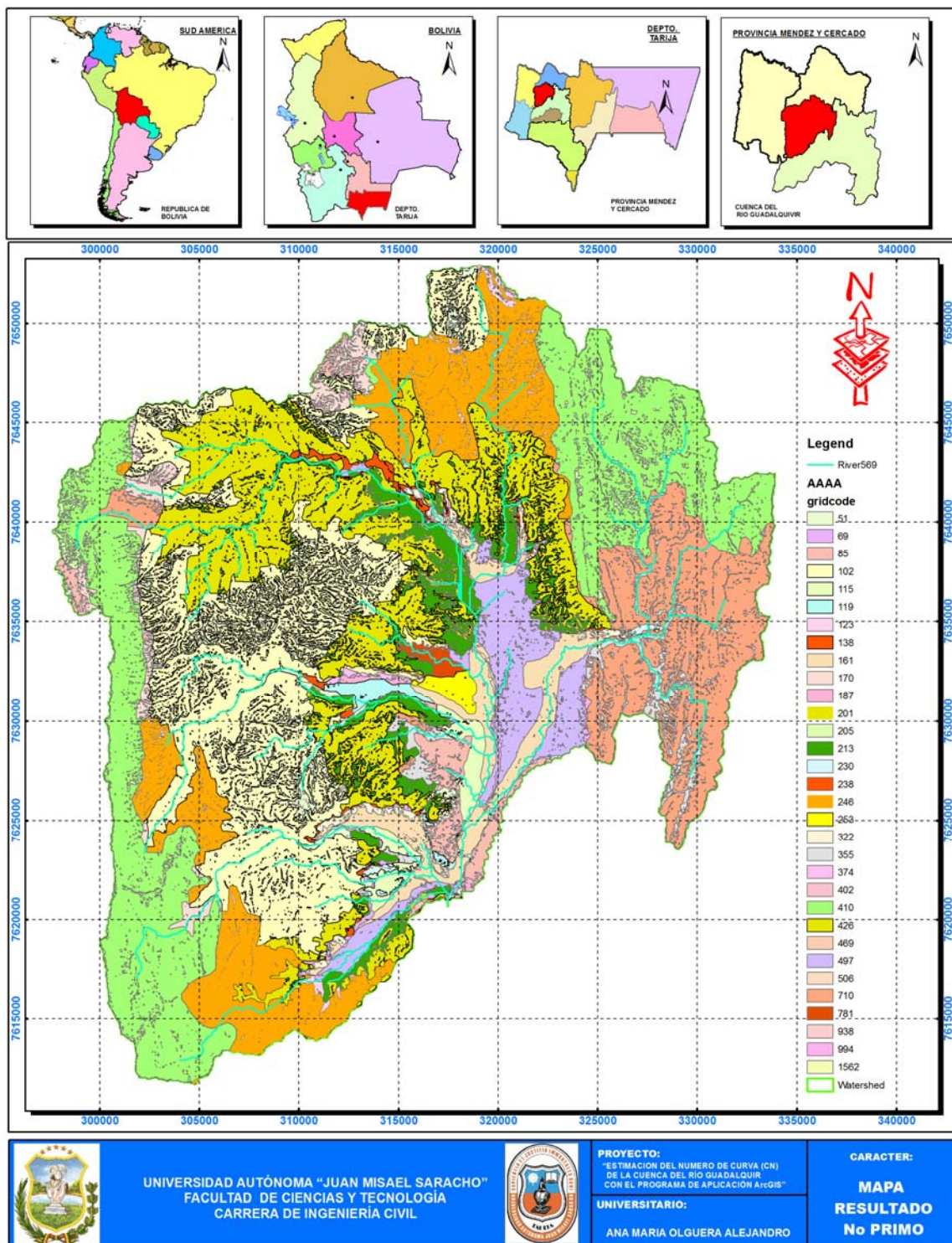
Figura 4.7: Mapa de pendiente del terreno en la Cuenca del río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia a partir de DEM

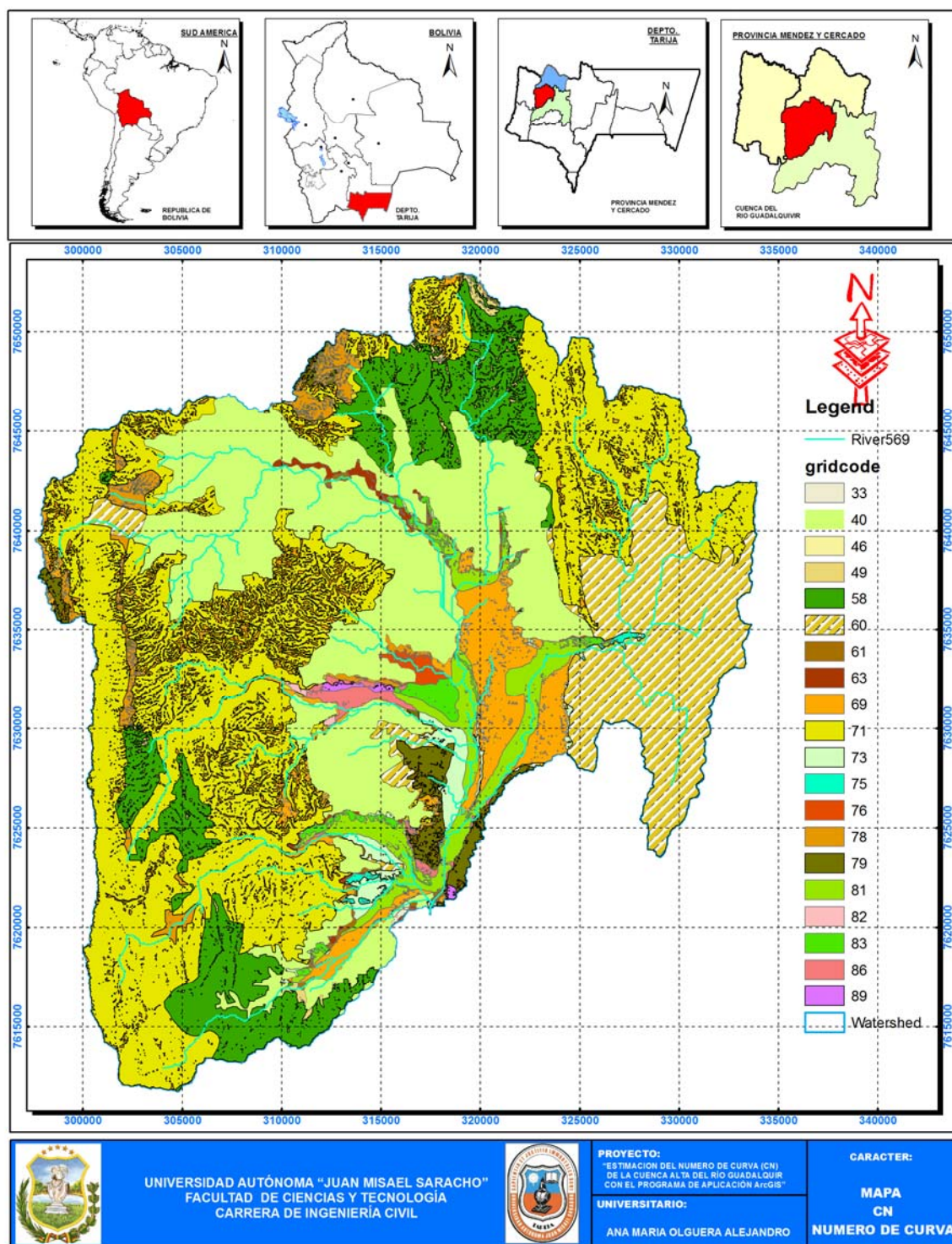
Figura 4.8: Mapa resultante del producto de los mapas de números primos

Correspondientes a los mapas de pendientes, de tipos y usos del suelo de la Cuenca del río Guadalquivir



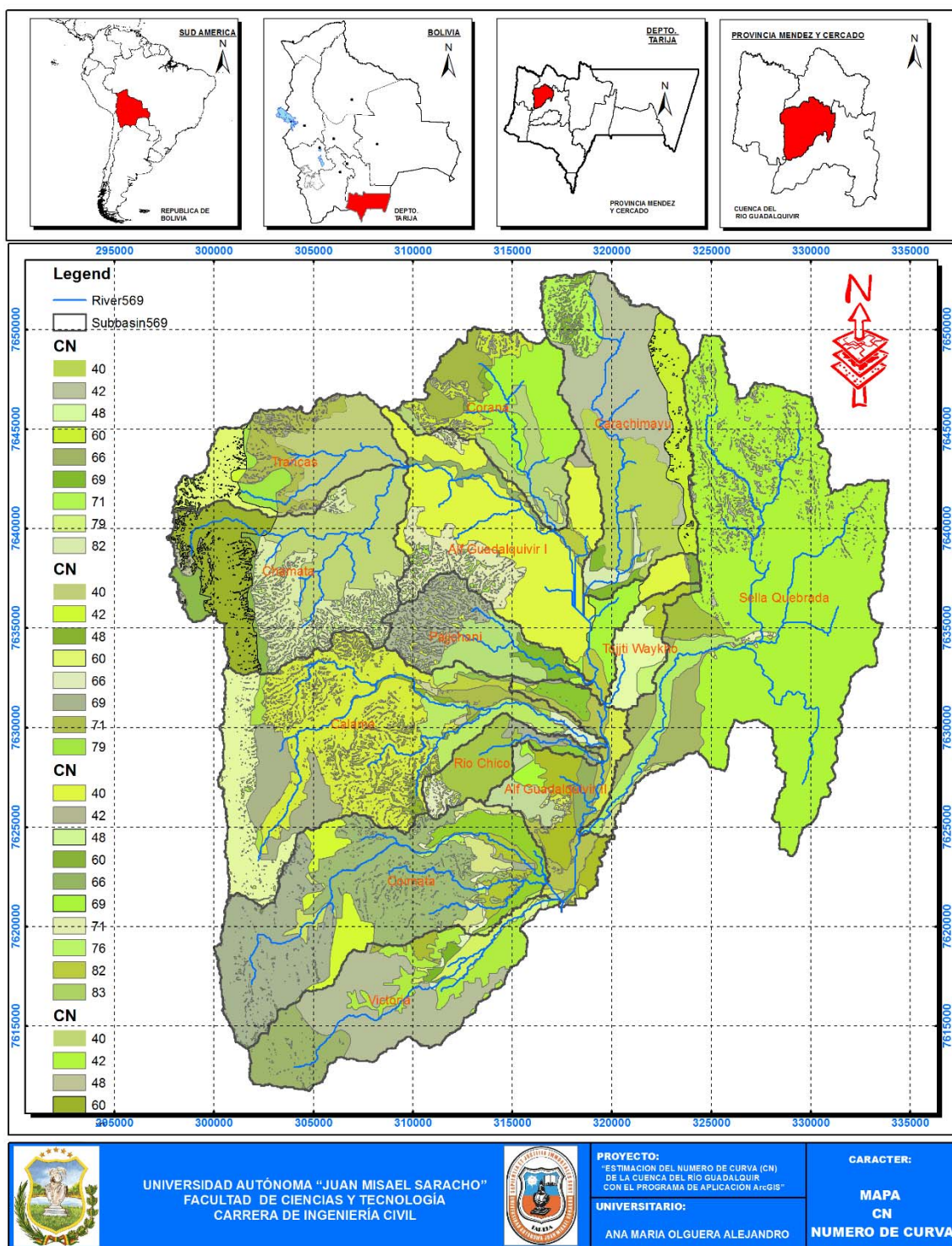
Fuente: Elaboración propia en base a la información ZONISIG

Figura 4.9: Mapa de CN de la cuenca del Río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia en base a la información ZONISIG

Figura 4.10: Mapa de CN de la cuenca del Río Guadalquivir por subcuencas



Fuente: Elaboración propia en base a la información ZONISIG

Finalmente se genera la tabla con los valores del número de curva de cada subcuenca para las tres condiciones de humedad antecedente:

Tabla 4.4: CN para cada subcuenca

NAME	NOMBRE	CN II	CN I	CN III
	SUBCUENCA	PONDERADA	PONDERADA	PONDERADA
W1250	CORANA	69	49	84
W1360	TRANCAS	61	40	78
W1580	CHAMATA	62	42	79
W1530	SELLA	49	30	69
W1720	CARACHIMAYU	62	41	79
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	68	48	83
W1890	PAJCHANI	69	49	84
W1900	TOJITI WAYKHO	56	36	75
W1980	CALAMA	65	45	81
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	76	58	88
W2030	RÍO CHICO	70	50	84
W2130	COIMATA	61	40	78
W2220	VICTORIA	53	33	72

Fuente: Elaboración propia

Para la cuenca global se calcula el valor ponderado del número de curva que para la zona de estudio se tiene los siguientes valores para las tres condiciones de humedad antecedente:

$$\mathbf{CNII = 61}$$

$$\mathbf{CNI = 41}$$

$$\mathbf{CNIII = 78}$$

4.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

4.3.1 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Para cuencas sin medición, el SCS sugiere que el tiempo de retardo del HU se debe relacionar con el tiempo de concentración, t_c , con la Ecuación:

$$t_{lag} = 0.6t_c \quad (4.1)$$

El tiempo de concentración es un parámetro cuasi-físico que se puede estimar con las Ecuaciones de:

» KIRPICH, Z. P. (Californiana):

$$T_c = \left(\frac{0,871 * L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (4.2)$$

» BASSO, E.:

$$T_c = 0,067 * \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77} \quad (4.3)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración en h.

L : longitud del cauce principal, más largo en km.

H : desnivel cauce principal (cabecera de cuenca y punto de control) en m.

S : pendiente media del cauce principal, más largo en m/m.

Tiempo de concentración de la cuenca y subcuencas del Río Guadalquivir se estimó con las fórmulas de KIRPICH, Z. P. (Californiana) y BASSO, E. son las fórmulas que ofrecen mejores resultados de la cuenca. El tiempo de concentración de toda la cuenca del Río Guadalquivir es de 5,7 h.

$$T_c = 5,7 \text{ h}$$

Los resultados de los tiempos de concentración para cada subcuenca se muestran en la *tabla 4.5*:

Tabla 4.5: Tc para cada subcuenca

NOMBRE	TC BASSO E.	TC KIRPRICH	TC PROMEDIO	T_{lag}
SUBCUENCA	h	h	h	h
CORANA	3,266	3,235	3,3	2,0
TRANCAS	3,898	3,861	3,9	2,3
CHAMATA	1,687	1,671	1,7	1,0
SELLA	1,492	1,478	1,5	0,9
CARACHIMAYU	3,006	2,977	3,0	1,8
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	1,143	1,132	1,1	0,7

NOMBRE	TC BASSO E.	TC KIRPRICH	TC PROMEDIO	T _{lag}
SUBCUENCA	h	h	h	h
PAJCHANI	2,132	2,111	2,1	1,3
TOJITI WAYKHO	1,750	1,733	1,7	1,0
CALAMA	3,232	3,202	3,2	1,9
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	1,589	1,574	1,6	0,9
RÍO CHICO	2,849	2,821	2,8	1,7
COIMATA	1,852	1,835	1,8	1,1
VICTORIA	2,328	2,305	2,3	1,4

Fuente: Elaboración propia

4.4 DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS (MÉTODO DEL SCS)

Para estimar caudales en cuencas de gran extensión se recomienda aplicar el método Numero de Curva (CN) del SCS, de esta manera la cuenca de aporte del río de Guadalquivir, se estudiará aplicando el método del SCS debido a que este método es más conceptual y considera la capacidad de intercepción y almacenaje de la cuenca.

Juntamente con el método del SCS y aplicando tormentas de diseño construidos en base a la teoría de los bloques alternativos, desarrollado en el capítulo 3, se estimarán los escurrimientos para distintos períodos de retorno.

4.4.1 MÉTODO DEL SCS

Este método ha sido desarrollado Soil Conservation Service de Estados Unidos, método conocido como procedimiento de la curva número. Esta metodología cuenta con dos etapas o pasos: calcular el volumen escurrido o lluvia efectiva y estimar el caudal máximo y la forma del hidrograma de la crecida. En el presente proyecto el hidrograma de crecida se ha construido en base a la teoría de bloques alternados como se mencionó anteriormente.

El volumen escurrido, expresado en unidades de altura de agua (mm), o lluvia efectiva (P_e), se calcula en función de la lluvia (P), del potencial máximo de retención de agua (S) y de las pérdidas iniciales (I_a), las cuales se estiman en un 20% del potencial máximo, por medio de la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (4.4)$$

La retención máxima, S, y las características de la cuenca se relacionan mediante parámetros intermedios, el número de curva (abreviado en inglés como CN interviene como en la Ecuación:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad \rightarrow \quad SI \quad (4.5)$$

El factor CN o curva número depende de del tipo de suelo, de la naturaleza y cobertura del suelo y las condiciones previas de humedad. El Soil Conservation Service ha publicado extensas y amplias investigaciones sobre este factor y presenta tablas para seleccionar el valor más representativo de cada situación. Para este estudio se ha estimado CN en función de *pendiente, el tipo de suelo y los usos de suelo* en la **Tabla 4.4** incluye el Número de Curva ponderado para cada subcuenca.

A partir del análisis de los resultados de muchas cuencas pequeñas, el SCS desarrollo relaciones empíricas de I_a y S que se según la Ecuación:

$$I_a = 0.2S \quad (4.6)$$

Donde:

P_e : Exceso de precipitación acumulada en el tiempo

P: Altura de lluvia acumulada en el tiempo

I_a : Abstracción inicial (perdida inicial)

S: Retención máxima potencial, una medida de la capacidad de la cuenca para abstraer y retener la precipitación de la tormenta. Hasta que la lluvia acumulada exceda a la abstracción inicial, el exceso de precipitación y en consecuencia el escurrimiento, serán nulos.

4.4.1.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS SUBCUENCAS PRINCIPALES

Para la modelación de las sub-cuencas del río Guadalquivir se utilizará el programa HEC-HMS, el cual es un modelo concentrado, conceptual y a nivel de eventos, permite la aplicación de métodos conceptuales como es el caso del SCS.

El programa contempla diferentes alternativas a la hora de cuantificar estas pérdidas. Probablemente el modelo más aplicado en HEC-HMS sea de Número de Curva desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS).

En este estudio se ha utilizado el concepto del número de curva (CN), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS).

» Volumen total disponible para esorrentía.

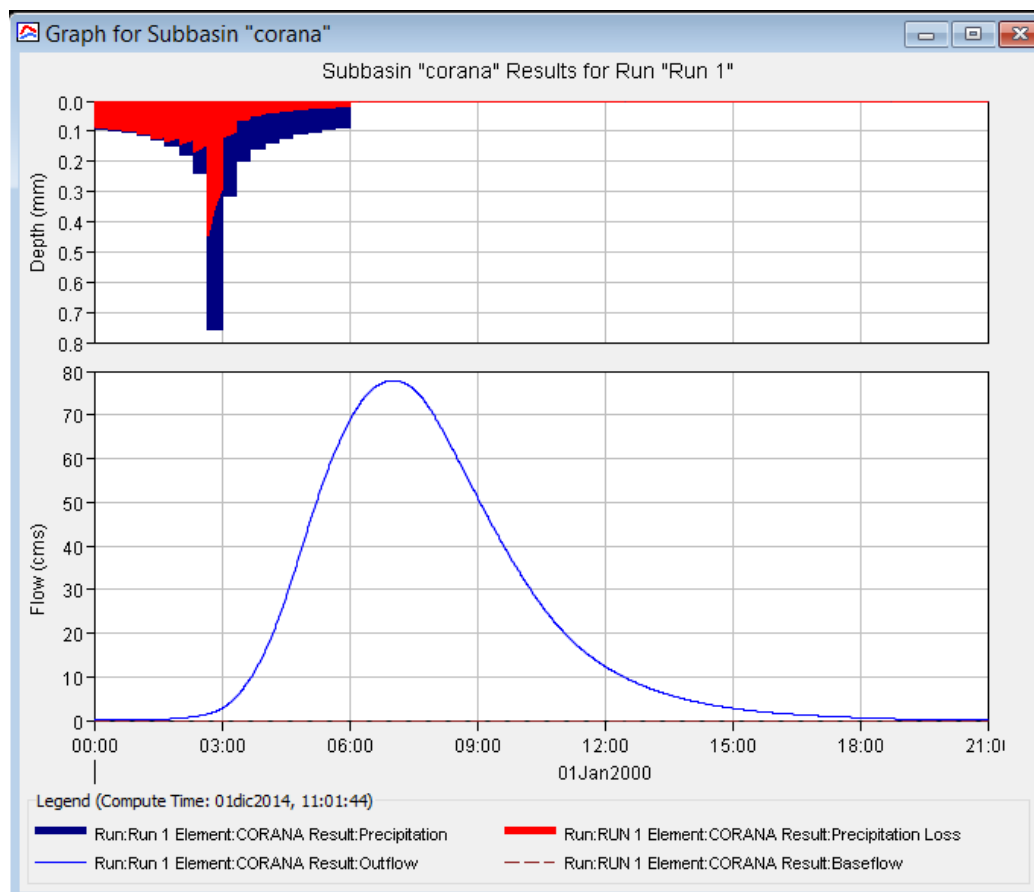
El volumen total de agua disponible para esorrentía superficial es el resultado de descontar de la precipitación total, el agua interceptada por la vegetación, infiltrada en el suelo, almacenada en la superficie del mismo, evaporada desde diferentes superficies o transpiradas a través de las plantas.

Los hietogramas de crecida han sido determinados para períodos de retorno de 50 y 100 años en las subcuencas utilizando el Hec-HMS y método del SCS. Como ejemplo se presenta el hidrograma de crecida para la subcuenca Corana se pueden observar el resultado en la *figura 4.11* y los hidrogramas de las demás subcuencas se muestran en el (ANEXO I).

Figura 4.11: Escorrentía y caudal pico del hidrograma obtenido de la subcuenca Corana

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
corana	48.73	77.8	01ene2000, 07:02	30.65

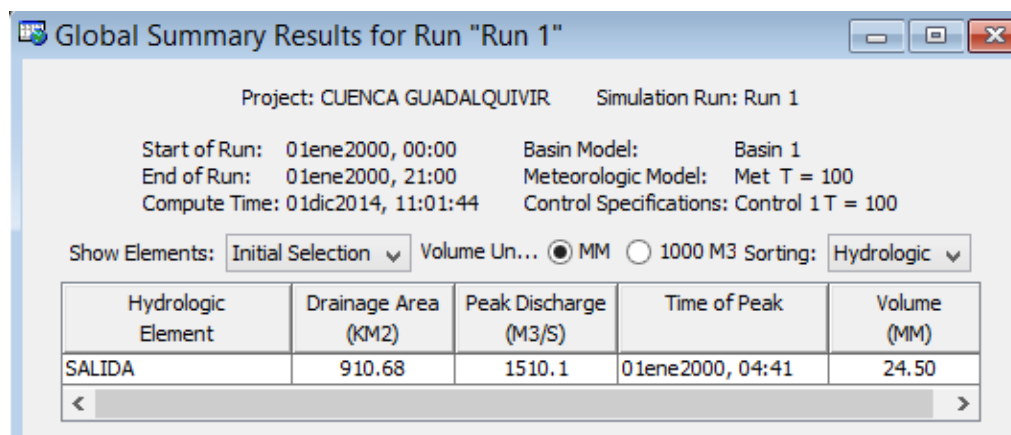
Figura 4.12: Hidrograma de escorrentía para T=100 años, metodo del SCS, subcuenca Corana

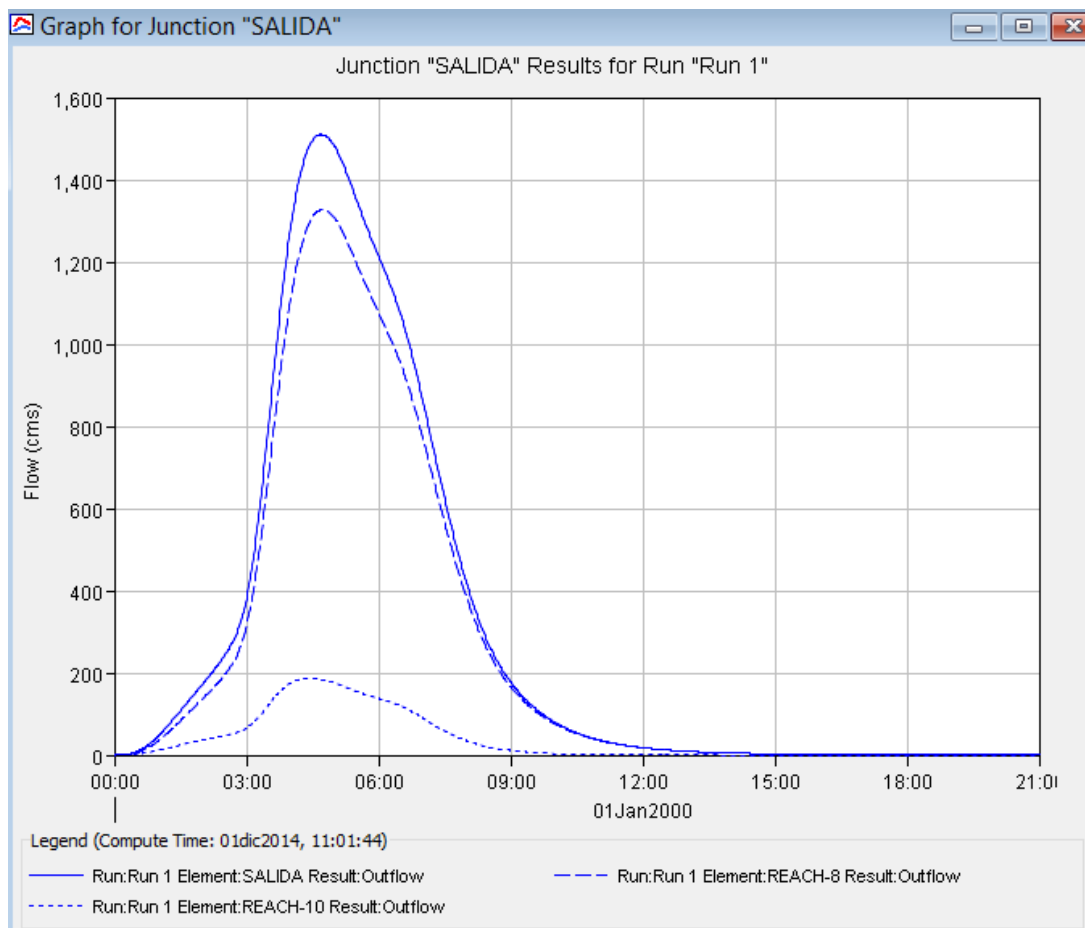


➔ Hidrograma de salida de la cuenca

Caudal máximo en el punto de control se tiene un valor de: $Q_p = 1510,10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 4.13: El caudal pico y su respectivo hidrogramas de salida de la cuenca Guadalquivir





4.4.1.2 RESUMEN DE CAUDALES MÁXIMOS Y ESCORRENTÍAS

Un resumen de los resultados de la modelación de los resultados obtenidos en el programa HEC-HMS se presentan a continuación, en ellos puede observarse que el caudal máximo y escorrentías que podría presentarse para un período de retorno de 50 y 100 años se muestra en la *tabla 4.6* y *tabla 4.7*.

**Tabla 4.6: Escorrentías y Caudales pico del hidrograma obtenido para cada subcuenca de Guadalquivir
TR=100 años(m³/s)**

NAME	NOMBRE	Área de la cuenca (Km ²)	Caudal Máximo (m ³ /s)	Volumen (mm)
	SUBCUENCAS			
W1250	CORANA	48.73	77.800	30.650
W1360	TRANCAS	44.02	65.000	21.340
W1580	CHAMATA	83.70	146.500	23.860

NAME	NOMBRE	Área de	Caudal Máximo	Volumen
		la cuena		
	SUBCUENCAS	(Km2)	(m3/s)	(mm)
W1690	SELLA	185.36	392.500	29.490
W1720	CARACHIMAYU	81.63	132.300	21.020
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87.24	249.700	31.770
W1890	PAJCHANI	28.99	64.500	34.190
W1900	TOJJTI WAYKHO	12.69	31.000	23.620
W1980	CALAMA	117.98	194.100	22.850
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38.89	102.100	24.400
W2030	RÍO CHICO	16.38	24.200	18.940
W2130	COIMATA	103.27	116.400	15.950
W2220	VICTORIA	61.80	88.700	16.730

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.7: Escorrentías y Caudales pico del hidrograma obtenido para cada subcuena de Guadalquivir

TR=50 años(m³/s)

NAME	NOMBRE	Área de	Caudal Máximo	Volumen
		la cuena		
	SUBCUENCAS	(Km2)	(m3/s)	(mm)
W1250	CORANA	48.73	66.70	26.280
W1360	TRANCAS	44.02	53.80	17.720
W1580	CHAMATA	83.70	122.40	20.070
W1690	SELLA	185.36	344.20	25.980
W1720	CARACHIMAYU	81.63	108.90	17.490
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87.24	213.80	27.410
W1890	PAJCHANI	28.99	55.80	29.680
W1900	TOJJTI WAYKHO	12.69	25.90	20.190
W1980	CALAMA	117.98	166.50	19.800
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38.89	91.60	22.040
W2030	RÍO CHICO	16.38	21.40	16.890
W2130	COIMATA	103.27	102.70	14.220
W2220	VICTORIA	61.80	80.00	15.150

Fuente: Elaboración Propia

4.5 DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS (MÉTODO RACIONAL)

4.5.1 MÉTODO RACIONAL

Es el método más sencillo, basado en las intensidades máximas de precipitación producida, para estimar el valor del caudal máximo del hidrograma (Caudal Pico). El método supone que el caudal máximo es proporcional a:

- 1) la intensidad máxima de la precipitación, de una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- 2) área de la cuenca.
- 3) un coeficiente de escurrentía (C), relación entre el volumen escurrido y el volumen precipitado.

Si bien es un método sencillo, es difícil seleccionar el coeficiente de escurrentía representativo de la cuenca, ya que este parámetro relaciona todas las características físicas de la cuenca (suelo, topografía, hidrografía, etc.).

Se debe tener en cuenta, que cuanto más grande es la cuenca, menor será la probabilidad de que se produzca la hipótesis de que la intensidad de la precipitación se mantiene constante durante la duración de la misma ($D = t_c$). Por ello es que este método es válido para cuencas con una superficie de hasta 1500-200 ha.

La fórmula que relaciona las variables involucradas es:

$$Q_p = \frac{C * i * A}{3,6} \quad (4.7)$$

Donde:

C: es el coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que escurre en forma de escurrentía directa

A: es el área de la cuenca en km^2

i: es la intensidad máxima en mm/h

Q_p : es el caudal máximo (m^3/s)

4.5.1.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO C

El coeficiente de escurrimiento C representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y toma valores entre cero y uno, y varía apreciablemente entre una cuenca y otra, y de una tormenta a otra, debido a las condiciones de humedad iniciales. Sin embargo, es común tomar valores de C representativos de acuerdo con ciertas características de las cuencas como la vegetación, pendientes del terreno y uso de suelos. [German Monsalve, 1999: p.179].

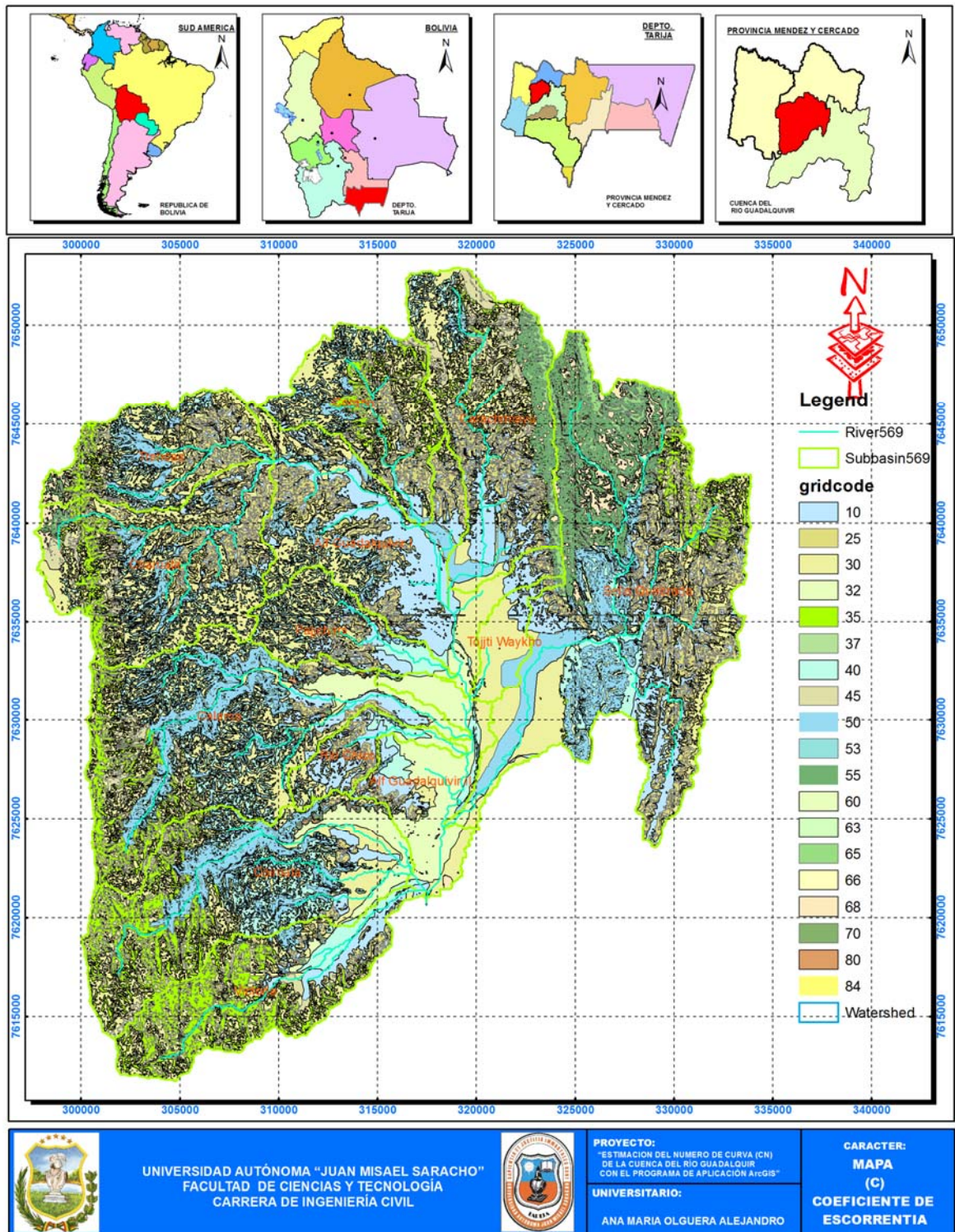
A continuación se presenta el cálculo representativo del Coeficiente de Escurrimiento de las subcuencas. El procedimiento realizado para la determinación de C , en gran parte, con la ayuda de un programa de computadora ArcGIS referente a Sistemas de Información Geográfica, la metodología se presenta en el *apartado 3.4*.

Tabla 4.8: Resumen de C ponderada para cada subcuenca

NAME	NOMBRE	C
	SUBCUENCA	Coef. Esc.
W1250	CORANA	0,31
W1360	TRANCAS	0,31
W1580	CHAMATA	0,36
W1690	SELLA	0,32
W1720	CARACHIMAYU	0,32
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	0,25
W1890	PAJCHANI	0,31
W1900	TOJITI WAYKHO	0,30
W1980	CALAMA	0,36
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	0,43
W2030	RÍO CHICO	0,25
W2130	COIMATA	0,37
W2220	VICTORIA	0,31
(C) PONDERADO PARA LA CUENCA GLOBAL		0,33

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.1: Mapa de C de la cuenca del Río Guadalquivir



Fuente: Elaboración Propia

4.5.1.2 CALCULO DE LA INTENSIDAD Y CAUDAL MÁXIMO

Estimar parámetros →

$$E_{dp} = \frac{E \cdot \frac{1}{N_1} + E \cdot \frac{1}{N_2} + E \cdot \frac{1}{N_3}}{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_3}}$$

$$K_{dp} = \frac{K \cdot \frac{1}{N_1} + K \cdot \frac{1}{N_2} + K \cdot \frac{1}{N_3}}{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_3}}$$

$$E_{dp} = 50,871 \text{ mm}$$

$$K_{dp} = 0,530 \text{ mm}$$

Cálculo de altura de lluvia para un tiempo de duración igual al tiempo de concentración

Ley de Gumbell modificada:

$$h_{tT} = E_{dp} \cdot \left(\frac{T_c}{\alpha} \right)^\beta \cdot \left[1 + K_{dp} \cdot \text{Log}(T) \right]$$

Cálculo de la intensidad de la lluvia

Cálculo por la expresión:

$$I_{MAX} = \frac{H_{MAX}}{T_c}$$

Donde:

h_{tT} = Altura de lluvias máximas horaria (mm)

E_{dp} = Moda ponderada

K_{dp} = Característica ponderada

T_c = Tiempo de duración de la lluvia menor a 24 hrs (hrs)

α = Equivalente de lluvia diaria igual a 12, para cuencas con área mayor a 10 km². y para cuencas con área menor a 10 km² es igual 2.

β = Coeficiente angular que varía entre 0.2 y 0.3

T = Período de retorno (años)

$$\alpha = 12,00$$

$$\beta = 0,20$$

Tabla 4.9: Resumen de los resultados de los caudales de la cuenca Global

Datos	Símbolo	Unidad	Comunidad Caracollo
			Magnitud
			(T=100 años)
Moda ponderada	E_{dp}	mm	50,87
Característica ponderada	K_{dp}	mm	0,53
Equivalente de lluvia diaria	α	mm.	12,00
Coefficiente angular	β	mm	0,20
Período de retorno	T	mm	100.00
Tiempo de concentración	T_c	h	5,700
Coefficiente de escorrentía	C	s/u	0,330
Área de la cuenca	A	km ²	910,656
Altura de lluvia máxima horaria	h_{icT}	mm	65,024
Intensidad de lluvias	I_{MAX}	mm/hr	11,408
Caudal Máximo	Q_{MAX}	m ³ /s	952,278

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla se deduce por ejemplo para la cuenca del río Guadalquivir la probabilidad que se presente una crecida de al 952,278 m³/s por el método racional, para un período de retorno de 100 años, el cual se utilizará en el diseño de obras hidráulicas del proyecto.

Tabla 4.10: Caudal pico para la cuenca completa Guadalquivir (m³/s)

T [años]	m ³ /s
50	868,270
100	952,278

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.11: Caudales pico para las subcuencas de Guadalquivir T=100 años(m³/s)

Subcuencas	Área de	Coefficiente de	Período de	Tiempo de	Altura de	Intensidad	Caudal Máximo
	la cuenca	escorrentía	retorno	concentración	lluvia máx. horaria	de lluvias	
	(Km ²)	(s/u)	(años)	h	(mm)	(mm/h)	
CORANA	48,73	0,31	100	3,30	58,291	17,664	74,118
TRANCAS	44,02	0,31	100	3,90	60,271	15,454	58,577
CHAMATA	83,70	0,36	100	1,70	51,049	30,029	216,438
SELLA	185,36	0,32	100	1,50	49,787	33,191	427,235
CARACHIMAYU	81,63	0,32	100	3,00	57,190	19,063	138,329
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	0,25	100	1,10	46,793	42,539	257,707
PAJCHANI	28,99	0,31	100	2,10	53,253	25,358	63,294

Subcuencas	Área de	Coefficiente de	Período de	Tiempo de	Altura de	Intensidad	Caudal
	la cuenca	escorrentía	retorno	concentración	lluvia máx. horaria	de lluvias	Máximo
	(Km ²)	(s/u)	(años)	h	(mm)	(mm/h)	(m ³ /s)
TOJITI WAYKHO	12,69	0,30	100	1,70	51,049	30,029	31,749
CALAMA	117,98	0,36	100	3,20	57,933	18,104	213,590
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	0,43	100	1,60	50,434	31,521	112,357
RÍO CHICO	16,38	0,25	100	2,80	56,407	20,145	22,916
COIMATA	103,27	0,37	100	1,80	52,736	26,368	189,098
VICTORIA	61,80	0,31	100	2,30	54,230	23,578	121,421

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.12: Caudales pico para las subcuencas de Guadalquivir T=50 años(m³/s)

Cuenca	Área de	Coefficiente de	Período de	Tiempo de	Altura de	Intensidad	Caudal
	la cuenca	escorrentía	retorno	concentración	lluvia máx. horaria	d de lluvias	Máximo
	(Km ²)	(s/u)	(años)	h	(mm)	(mm/h)	(m ³ /s)
CORANA	48,73	0,31	50	3,30	53,149	16,106	67,579
TRANCAS	44,02	0,31	50	3,90	53,149	14,091	53,410
CHAMATA	83,70	0,36	50	1,70	46,546	27,380	197,344
SELLA	185,36	0,32	50	1,50	45,395	30,263	389,545
CARACHIMAYU	81,63	0,32	50	3,00	52,145	17,382	126,126
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	0,25	50	1,10	42,665	38,786	234,973
PAJCHANI	28,99	0,31	50	2,10	48,555	23,121	57,710
TOJITI WAYKHO	12,69	0,30	50	1,70	46,546	27,380	28,948
CALAMA	117,98	0,36	50	3,20	52,822	16,507	194,747
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	0,43	50	1,60	45,985	28,740	102,445
RÍO CHICO	16,38	0,25	50	2,80	51,430	18,368	20,895
COIMATA	103,27	0,37	50	1,80	48,083	24,042	172,416
VICTORIA	61,80	0,31	50	2,30	49,446	21,498	110,709

Fuente: Elaboración Propia

Los caudales obtenidos con el modelo desagregado en subcuencas método Racional para un período de retorno de 100 y 50 años, es de **1.926,828 m³/s** y **1.756,847 m³/s**, respetivamente.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos para el estudio de la estimación de la producción hídrica en la cuenca del río Guadalquivir (cuenca completa y desagregada) mediante la aplicación de los programas siguientes: ArcGIS, HEC-GEOHMS y HEC-HMS.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE NÚMERO DE CURVA CN

A continuación se presenta el análisis de los cálculos del número de curvas para cada subcuenca en estudio; se realizó un análisis de los valores obtenidos de Número de Curva.

El Número de curva de escorrentía es un parámetro adimensional, cuyos valores oscilan teóricamente entre 1 y 100

CN=1 significa una capacidad de retención máxima en la cuenca (Q=0)

CN=100 significa una capacidad de retención nula (Q=P)

Estos valores fueron tabulados en función de valores de cobertura, tipo de suelo, pendiente y uso de suelo.

El valor de CN promedio y CN ponderado será distinto, puesto que la cuenca del río Guadalquivir está formada por varios tipos de suelo y usos de la tierra, por tanto es recomendable obtener un CN ponderado el cual se calcula mediante la Ecuación:

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i} \quad (2.7)$$

Donde:

CN ponderado: Número de Curva ponderado para calcular el volumen de escurrimiento.

I: Índice de subdivisiones de la cuenca para tipo de suelo y uso de la tierra.

CN_i: Número de Curva para la subdivisión i.

A_i: Área de drenaje de la subdivisión i.

El CN ponderada para la cuenca Guadalquivir para condición normal CN II es de:

$$\mathbf{CNII = 61}$$

Valores de CN para las condiciones I y III se estiman mediante las Ecuaciones:

$$CNI = \frac{CNII}{2.3 - 0.0013CNII} \quad (2.5)$$

$$CNIII = \frac{CNII}{0.43 - 0.0057CNII} \quad (2.6)$$

Donde:

CN I: Condición de humedad antecedente seca.

CN II: Condición de humedad antecedente normal.

CN III: Condición de humedad antecedente humedad.

Por tanto se tiene:

$$\mathbf{CNI = 41}$$

$$\mathbf{CNIII = 78}$$

Para estimar los caudales máximos generalmente se utilizan los CN II y CIII ya que las crecidas se dan en una época donde el suelo está completamente saturado y la infiltración es muy baja.

Asimismo se tiene un valor de CN ponderado para cada subcuenca para las tres condiciones de humedad antecedentes:

Tabla 5.1: CN para cada subcuenca para las tres condiciones

NOMBRE	CN II	CN I	CN III
SUBCUENCA	PONDERADA	PONDERADA	PONDERADA
CORANA	69	49	84
TRANCAS	61	40	78
CHAMATA	62	42	79
SELLA	49	30	69
CARACHIMAYU	62	41	79
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	68	48	83
PAJCHANI	69	49	84
TOJTI WAYKHO	56	36	75

NOMBRE	CN II	CN I	CN III
SUBCUENCA	PONDERADA	PONDERADA	PONDERADA
CALAMA	65	45	81
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	76	58	88
RÍO CHICO	70	50	84
COIMATA	61	40	78
VICTORIA	53	33	72

Fuente: Elaboración propia

El número de curva para la cuenca del río Guadalquivir varía entre **69-88** para condición III, donde los valores CN altos representan escorrentías altas y viceversa.

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CAUDALES MÁXIMOS

A continuación como método de contraste se ha utilizado el programa HEC-HMS de modelización hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Si se aplica el modelo a la cuenca completa (uso incorrecto del modelo), los resultados obtenidos para períodos de retorno de 100 y 50 años para CN III se muestran en la **tabla5.2**:

Tabla 5.2: Caudal pico para la cuenca completa (método SCS) (m³/s)

T [años]	Área de la cuenca (km ²)	Caudal (m ³ /s)	Volumen (mm)
50	910,656	857,80	19,98
100	910,656	1025,50	22,66

Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, se muestra una tabla resumen en la que aparecen los caudales máximos por el método racional para un período de retorno de 50 y 100 años. Si se aplica este método a la cuenca completa (uso incorrecto del modelo), los resultados obtenidos para períodos de retorno de 100 y 50 años para $C = 0,33$ se muestran en la siguiente **tabla5.3**:

Tabla 5.3: Caudal pico para la cuenca completa (método racional) (m³/s)

T [años]	Área de la cuenca (km ²)	Caudal (m ³ /s)
50	910,656	868,279
100	910,656	952,279

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se ha aplicado el método racional a una cuenca desagregada, en cada una de las subcuencas (uso correcto del modelo), como si fueran unidades

independientes. Para este caso se han obtenidos los resultados. A continuación se muestran los caudales pico de cada subcuenca.

Tabla 5.4: Caudal pico para la cuenca desagregada (método racional) (m³/s)

Subcuenca	Área de	Caudal Máximo	Caudal Máximo
	la cuenca	T=100 años	T=50 años
	(Km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
CORANA	48,73	74,118	67,579
TRANCAS	44,02	58,577	53,410
CHAMATA	83,70	216,438	197,344
SELLA	185,36	427,235	389,545
CARACHIMAYU	81,63	138,329	126,126
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	257,707	234,973
PAJCHANI	28,99	63,294	57,710
TOJJTI WAYKHO	12,69	31,749	28,948
CALAMA	117,98	213,590	194,747
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	112,357	102,445
RÍO CHICO	16,38	22,916	20,895
COIMATA	103,27	189,098	172,416
VICTORIA	61,80	121,421	110,709

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se ha utilizado el programa HEC-HMS de modelización hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos por el método Número de Curva del SCS.

Se ha aplicado el modelo como base de comparación de los anteriores resultados con la desagregación de la cuenca en subcuencas (forma correcta de aplicación del modelo).

Los resultados para este estudio en los períodos de retorno de 100 y 50 para CNIII se muestran en las siguientes tablas (tabla 5.5 y tabla 5.6):

Tabla 5.5: Escorrentía y Caudales pico del hidrograma obtenido para cada subcuenca de Guadalquivir T=100 años(m³/s)

NAME	NOMBRE	Área de	Caudal	Volumen
		la	Máximo	
	SUBCUENCAS	cuenca	método SCS	
		(Km ²)	(m ³ /s)	(mm)
W1250	CORANA	48,73	77,800	30,650
W1360	TRANCAS	44,02	65,000	21,340

NAME	NOMBRE	Área de la cuena	Caudal Máximo método SCS	Volumen
	SUBCUENCAS	(Km2)	(m3/s)	(mm)
W1580	CHAMATA	83,70	146,500	23,860
W1690	SELLA	185,36	392,500	29,490
W1720	CARACHIMAYU	81,63	132,300	21,020
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	249,700	31,770
W1890	PAJCHANI	28,99	64,500	34,190
W1900	TOJITI WAYKHO	12,69	31,000	23,620
W1980	CALAMA	117,98	194,100	22,850
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	102,100	24,400
W2030	RÍO CHICO	16,38	24,200	18,940
W2130	COIMATA	103,27	116,400	15,950
W2220	VICTORIA	61,80	88,700	16,730

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 5.6: Escurremientos y Caudales pico del hidrograma obtenido para cada subcuena de Guadalquivir
T=50 años(m³/s)**

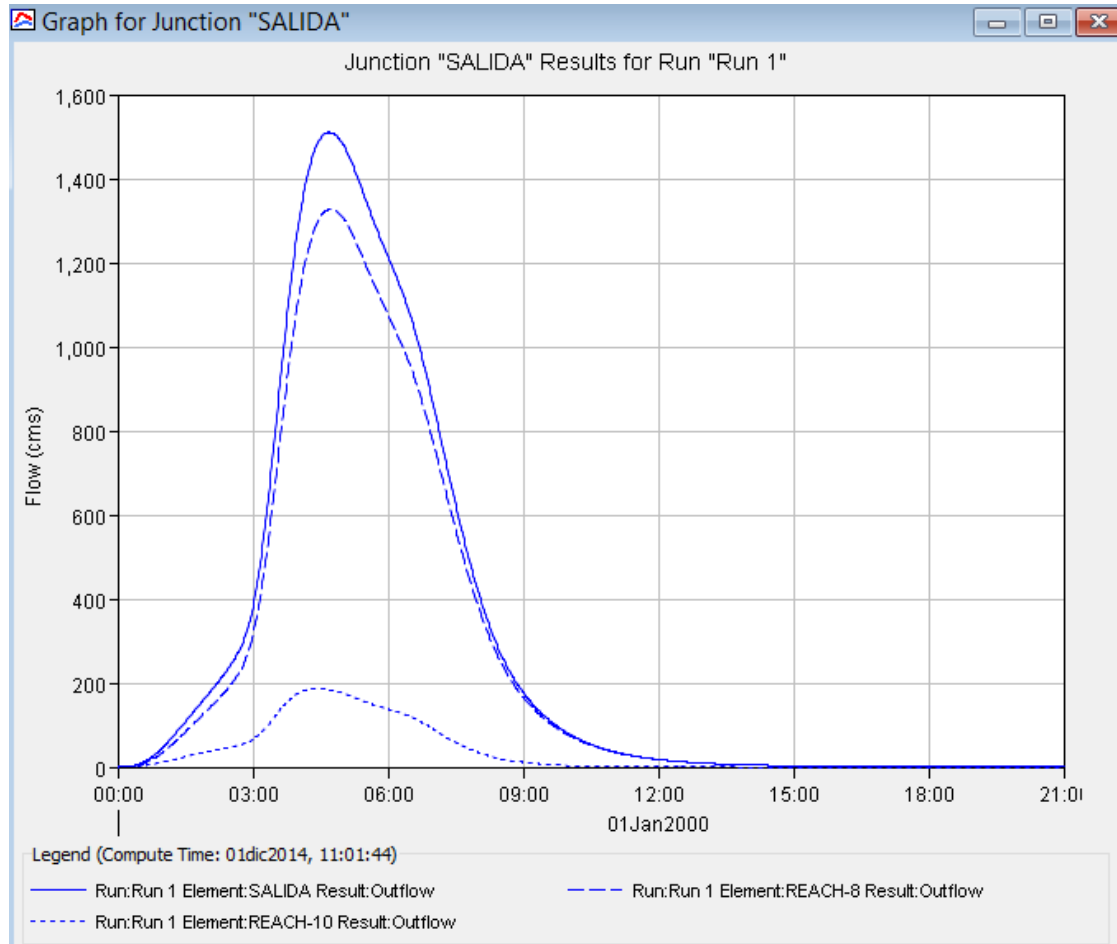
NAME	NOMBRE	Área de la cuena	Caudal Máximo	Volumen
	SUBCUENCAS	(Km2)	(m3/s)	(mm)
W1250	CORANA	48,73	66,70	26,280
W1360	TRANCAS	44,02	53,80	17,720
W1580	CHAMATA	83,70	122,40	20,070
W1690	SELLA	185,36	344,20	25,980
W1720	CARACHIMAYU	81,63	108,90	17,490
W1800	AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	213,80	27,410
W1890	PAJCHANI	28,99	55,80	29,680
W1900	TOJITI WAYKHO	12,69	25,90	20,190
W1980	CALAMA	117,98	166,50	19,800
W2020	AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	91,60	22,040
W2030	RÍO CHICO	16,38	21,40	16,890
W2130	COIMATA	103,27	102,70	14,220
W2220	VICTORIA	61,80	80,00	15,150

Fuente: Elaboración Propia

También se tiene el Hidrograma de salida de la cuenca con la desagregación de la cuenca en subcuencas modelo Hec-HMS método Número de Curva del SCS.

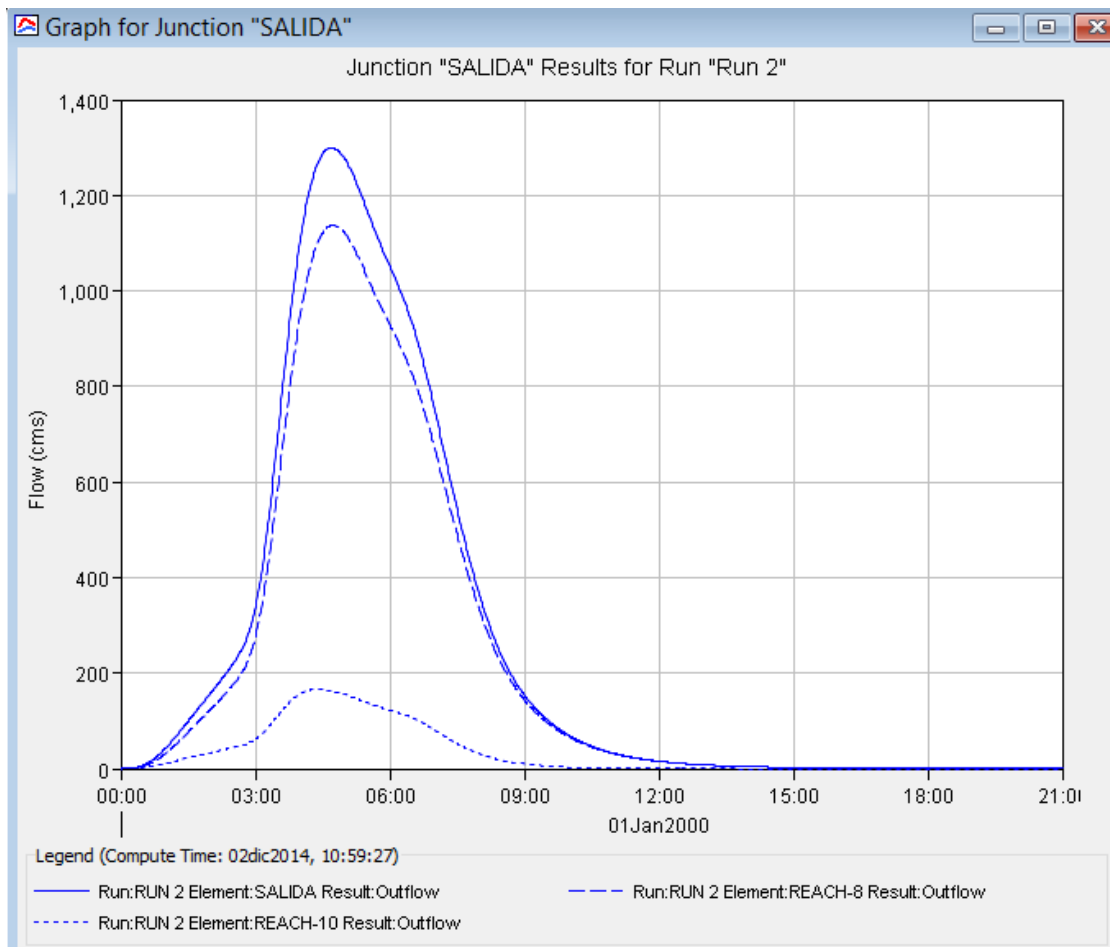
Caudal máximo en el punto de control se tiene un valor de: $Q_p = 1.510,10 \text{ m}^3/\text{s}$ para un período de 100 años.

Figura 4.1: Hidrogramas de salida de la cuenca Guadalquivir



Caudal máximo en el punto de control se tiene un valor de: $Q_p = 1.299,10 \text{ m}^3/\text{s}$ para un periodo de 50 años, a continuación se tiene el hidrograma de salida en la salida de la cuenca del río Guadalquivir.

Figura 4.1: Hidrogramas de salida de la cuenca Guadalquivir



Como se observa, los caudales de salida para una desagregación de la cuenca por el método Número de Curva con Hec-HMS son valores inferiores a los obtenidos para la cuenca desagregada por el método de la Formula Racional, por lo que se concluye que se estaría sobrestimando los caudales por el método Racional.

Al determinar los distintos valores de *CN* para cada una de las cuencas en estudio y realizar el análisis de los resultados, nos damos cuenta que la mayor parte de las áreas que forman parte de estas cuencas poseen coberturas y suelos variadas habiendo dentro de la cuenca un tipo por ejemplo el tipo A que representa los perfiles más permeables

como un suelo arenoso y el D los de menor capacidad de infiltración con una textura arcillosa.

Asimismo, a modo de hacer comparaciones de los valores de caudales para condiciones CNII y CNIII, en la *tabla 5.7* se muestra los resultados para la condición CII, de manera que los valores de caudales para condición CNIII *tabla 5.5 y 5.6* son superiores a los caudales para CNII:

Tabla 5.7: Esc-Caudal pico para cada subcuenca 50 y 100 años(m³/s) para CII

NOMBRE	Área de la cuenca	T = 50 años		T =100 años	
		Caudal Máximo	Volumen	Caudal Máximo	Volumen
SUBCUENCAS	(Km2)	(m3/s)	(mm)	(m3/s)	(mm)
CORANA	48,73	32,90	13,530	40,00	16,330
TRANCAS	44,02	23,30	9,110	29,10	11,090
CHAMATA	83,70	49,00	9,560	61,10	11,630
SELLA	185,36	304,50	21,840	334,80	24,120
CARACHIMAYU	81,63	41,70	8,220	52,40	10,070
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	121,00	17,950	143,70	20,970
PAJCHANI	28,99	32,10	18,540	37,90	21,650
TOJTI WAYKHO	12,69	18,70	14,400	20,60	16,380
CALAMA	117,98	106,00	13,600	120,70	15,530
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	53,70	14,920	60,60	16,620
RÍO CHICO	16,38	11,90	10,680	13,50	11,960
COIMATA	103,27	79,10	10,700	84,90	11,690
VICTORIA	61,80	60,40	10,350	64,70	11,080

Fuente: Elaboración propia

Con lo que se puede colegir que el método del servicio de conservación de suelos es muy sensible a los valores de número curva, por lo cual se debe tener mucho cuidado y precisión para determinar dichos valores, además de estimar las condiciones de humedad para un determinado suceso estudiado, ya que el valor de Curva Número también varía según las condiciones de humedad antecedente.

5.4 VALIDACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN)

El caudal de cálculo se obtiene de dos formas; una es mediante *Modelo Estadístico* con la variable caudal donde se requiere una serie hidrológica representativa y

suplementariamente por **Modelamiento Hidrológico** de transformación **lluvia en escorrentía**, **HEC-HMS** es una herramienta muy práctica para este segundo escenario, donde se requiere una serie de variables como datos de entrada, entre ellos el CN Número de curva. En el presente trabajo se propone una metodología para estimar la variable hidrológica Número de Curva.

5.4.1 VALIDACIÓN

La validación es el acto documentado de probar si cualquier procedimiento, proceso, equipo, material, actividad o sistema, conlleva realmente al resultado esperado o definido (Bedient y Huber, 2002).

Por su parte Kelton y Law (1991), dicen que la validación se refiere a determinar si el modelo conceptual de simulación (en comparación con el programa de computadora), es una representación exacta del sistema que está bajo estudio.

5.4.1.1 VALIDACIÓN CON BASE EN LA COMPARACIÓN DE CAUDALES

En este punto se hará las comparaciones y análisis de los resultados de caudales obtenidos por diferentes métodos.

5.4.1.1.1 COMPARACIÓN MÉTODO NÚMERO DE CURVA SCS Y RACIONAL

Con base en los resultados mostrados de los caudales estimados anteriormente por el método SCS y racional, se procede a tabular los caudales para luego validar los resultados con base en la comparación entre los dos métodos obtenidos.

Tabla 5.8: Caudales pico método Número de Curva SCS y Racional (m³/s)

Subcuenca	Área de la cuenca	T = 100 años		T = 50 años	
		Caudal Máximo METODO RACIONAL	Caudal Máximo METODO SCS	Caudal Máximo METODO RACIONAL	Caudal Máximo METODO SCS
	(Km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
CORANA	48,73	74,118	77,800	67,579	66,700
TRANCAS	44,02	58,577	65,000	53,410	53,800
CHAMATA	83,70	216,438	146,500	197,344	122,400
SELLA	185,36	427,235	392,500	389,545	344,200
CARACHIMAYU	81,63	138,329	132,300	126,126	108,900
AFL. DIR GUADALQUIVIR I	87,24	257,707	249,700	234,973	213,800

Subcuenca	Área de la cuenca	T = 100 años		T = 50 años	
		Caudal Máximo METODO RACIONAL	Caudal Máximo METODO SCS	Caudal Máximo METODO RACIONAL	Caudal Máximo METODO SCS
	(Km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
PAJCHANI	28,99	63,294	64,500	57,710	55,800
TOJITI WAYKHO	12,69	31,749	31,000	28,948	25,900
CALAMA	117,98	213,590	194,100	194,747	166,500
AFL. DIR GUADALQUIVIR II	38,89	112,357	102,100	102,445	91,600
RÍO CHICO	16,38	22,916	24,200	20,895	21,400
COIMATA	103,27	189,098	116,400	172,416	102,700
VICTORIA	61,80	121,421	88,700	110,709	80,000

Fuente: Elaboración propia

En la *tabla 5.8* se observa, los caudales para una desagregación de la cuenca por el método Número de Curva del SCS con Hec-HMS y método Racional, los valores de los caudales son similares en algunas subcuencas y en alguna existe mucha variación, sobretodo en cuencas grandes como es el caso de Sella Quebrada, por lo que se puede afirmar que el método Racional se aplica a cuencas pequeñas.

Se observa que los valores de caudales de la *tabla 5.8* método Número de Curva del SCS nos ofrece mejores resultados, *por lo que se toma, como válido la metodología utilizada para la estimación de Número de Curva (CN) basada en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el programa de aplicación ArcGIS.*

Y además se concluye que el factor Coeficiente de Escorrentía (C) y el Número de Curva (CN) en gran parte es determinante al momento de la estimación de caudales máximos.

5.4.1.1.1 COMPARACIÓN MÉTODO NÚMERO DE CURVA DEL SCS Y FÓRMULA EMPÍRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR

Por otro lado, para su validación del Número de Curva (CN) con los caudales simulados método Número de Curva SCS para CNIII, se compara los resultados obtenidos con caudales de otros estudios que se realizaron dentro de la cuenca.

Para lo cual, se encontrará una relación entre el área de las cuencas y el caudal específico de crecidas (válida para períodos de retorno entre 50 y 100 años) para las cuencas que fluyen dentro de la cuenca del Río Guadalquivir, de la relación se obtiene una ecuación para la obtención de los caudales específicos en función al área de aporte de la cuenca.

Se tiene la información de nueve estudios hidrológicos correspondientes a la cuenca en estudio, de los cuales algunas son descartadas por no tener correlación con los demás resultados:

Tabla 5.9: Información estudios hidrológicos de la cuenca del río Guadalquivir

No	ESTUDIOS HIDROLÓGICOS DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR	FUENTE	OBSERVACION
1	Proyecto Construcción Puente río Guadalquivir y San Blas	INTEGRA S.R.L. Ing. Boris A. Zubieta Guevara	✓
2	Tránsito y Almacenamiento de Avenidas en Cauces Naturales	Tesis: Ing. José Luis Urquidi Barea	✓
3	Proyecto Construcción puente río Guadalquivir (Puente Bicentenario)	-----	✓
4	Estudio Integral TESA: Construcción Sistemas de Riego Provincia Cercado Fase I	Asociación Accidental Tarija	✓
5	TRANCAS “Plan de manejo Integral de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Guadalquivir” (MIRNA-GRIG)	Mario Nina Ignacio Consultor del PEA	✓
6	SELLA “Plan de manejo Integral de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Guadalquivir” (MIRNA-GRIG)	Mario Nina Ignacio Consultor del PEA	✓
7	CANASMORO “Plan de manejo Integral de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Guadalquivir” (MIRNA-GRIG)	Mario Nina Ignacio Consultor del PEA	✓
8	<i>E.D.F Puente Vehicular sobre el Río Guadalquivir comunidad de Obrajes</i>	Asociación Accidental <i>ALGARROBAL</i>	✗
9	<i>“Diagnóstico y Plan de Acción de Gestión Integral de Recursos Hídricos Valle Central de Tarija”</i>	-----	✗

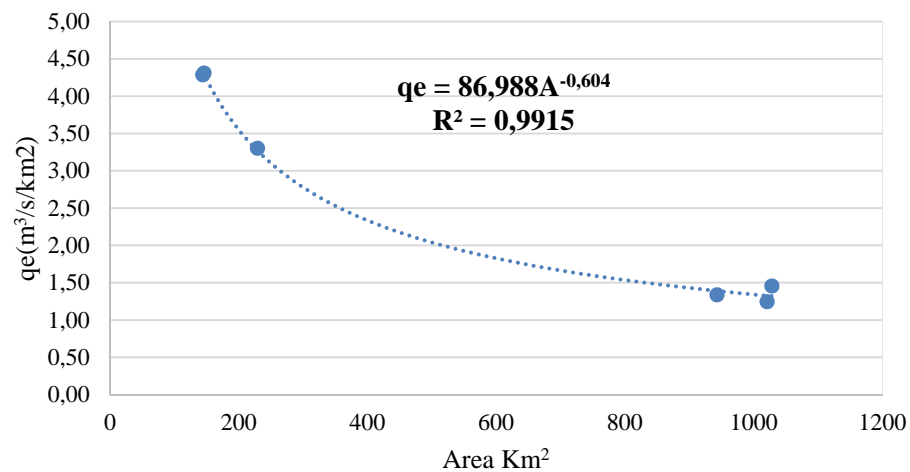
Fuente: Estudios Hidrológicos dentro de la cuenca del río Guadalquivir

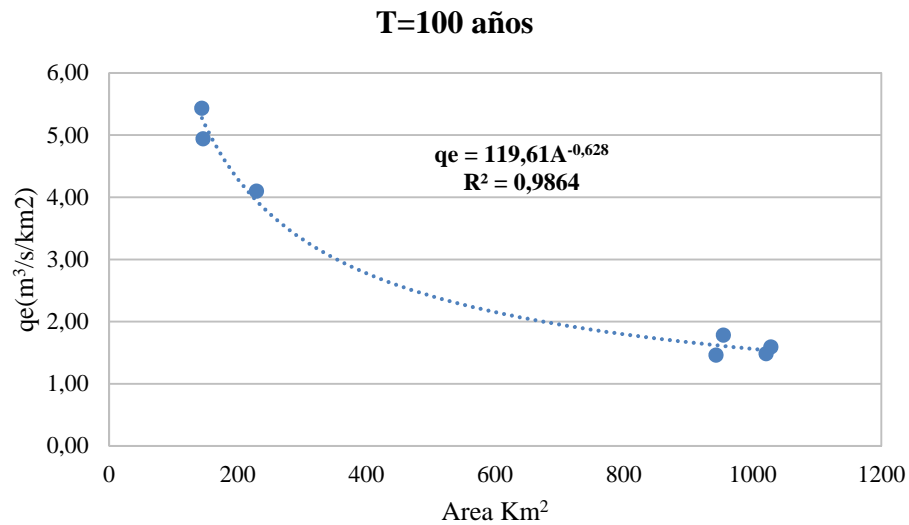
Tabla 5.10: Relación entre el Área km² de las cuencas y q_e

No	T=50 Años		T=100 Años		Área km ²
	Qmax	q _e	Qmax	q _e	
1	1.496,98	1.46	1.635,88	1,59	1.028,51
2	1.271,06	1.24	1.511,86	1,48	1.021,038
3	-	-	1.698,62	1,78	954,53
4	1.261,05	1.34	1.375.39	1,46	943,21
5	617	4.28	782	5,43	144,00
6	629	4.31	721	4,94	146,00
7	756	3.30	938	4,10	229,00
8	-	-	931,48	0,76	1.228,89
9	3.166,2	2,97	3.629,4	3,41	1.065,00

Fuente: Información obtenida de estudios dentro de la cuenca

T=50 años





De la gráfica se obtiene las ecuaciones para los caudales específicos de período de retorno de 100 y 50 años.

$$q = 86.988 * A^{-0.604} \quad \rightarrow \text{Para TR}=50 \text{ años}$$

$$q = 119.61 * A^{-0.628} \quad \rightarrow \text{Para TR}=100 \text{ años}$$

Donde:

q = Caudal específico en $\text{m}^3/\text{s}/\text{Km}^2$

A = Área de la cuenca en Km^2

Remplazando el área de la cuenca en estudio del río Guadalquivir de $910,66 \text{ Km}^2$

Se tiene:

$$q = 1,66 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2 \quad \rightarrow \text{Para TR}=50 \text{ años}$$

$$q = 1,66 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2 \quad \rightarrow \text{Para TR}=100 \text{ años}$$

Por lo tanto:

$$Q_{\text{máx}} = 1508,86 \text{ m}^3/\text{s} \quad \rightarrow \text{Para TR}=100 \text{ años}$$

$$Q_{\text{máx}} = 1292,30 \text{ m}^3/\text{s} \quad \rightarrow \text{Para TR}=50 \text{ años}$$

→ **COMPARACIÓN:**

Tabla 5.11: Caudales pico método Número de Curva SCS y Formula Empírica (m³/s)

Modelamiento Hidrológico Lluvia-Escorrentía	Modelo Metodo Indirecto Ac Vs q
Q _{máx} = 1.299,10 m ³ /s → Para TR=50 años	Q _{máx} = 1.292,30 m ³ /s → Para TR=50 años
Q _{máx} = 1.510,10m ³ /s → Para TR=100 años	Q _{máx} = 1.508,86 m ³ /s → Para TR=100 años

Fuente: Elaboración propia

Observamos en la *tabla 5.11* caudales por el método Número de Curva SCS modelo Hec-HMS y la formula empírica que se halló establecida en función de los estudios realizados dentro de la cuenca (válidas para períodos de retorno de 100 y 50 años). Se compara los resultados de los caudales, los cuales tienen bastante similitud, por lo que se vuelve a mencionar que el método Número de Curva SCS para estimar caudales máximos nos dan resultados satisfactorios y por ende la metodología aplicada para la estimación de CN se puede aplicar en nuestra cuenca de estudio “Cuenca del río Guadalquivir”.

5.4.1.1.2 TIRANTE MÁXIMO

Como complemento del trabajo, para la determinación del tirante se utilizó el paquete Flow Master con los datos de caudales encontrados en el modelamiento con HEC-HMS, método Número de Curva SCS, además para hallar la pendiente se utilizó la topografía de la sección del río del estudio del puente Obrajes y un caudal estimado para CNIII.

El cálculo hidráulico se lo realizará en función a la fórmula de Manning, la cual es de uso popular.

Los datos para el cálculo para la determinación del tirante máximo de agua en la sección de estudio y según la fórmula de Manning se requieren los siguientes datos.

- » Perfil longitudinal de la sección del río del punto de control.

Para su aplicación del método se requiere solamente contar con topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua durante el paso de la avenida, para

hacer una comparación entre el tirante máximo calculado y tirante máximo observado (Figura 5.1 y 5.2).

Para el proyecto “EDF Puente Vehicular sobre el Río Guadalquivir comunidad de Obrajes” se tiene el levantamiento topográfico de 150 m aguas arriba y 150 m aguas abajo aproximadamente.

» Caudal máximo

Este caudal se tomó del cálculo modelamiento hidrológico realizado mediante datos de lluvias máximas con el modelo Hec-HMS para la condición de humedad antecedente CNIII. El caudal máximo es de **1.299,10 m³/seg** y **1.510,10 m³/seg** para un período de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning, este dato fue asumido entre (0,025-0,033) para ríos, de la tabla dados por Horton, para ser usados en las fórmulas de kutter y de Manning, tomados por Trueba Coronel, Samuel (Máximo Villón B. “Hidráulica de canales”).

S =Pendiente de la línea de energía específica, se calcula de la topografía realizada, en el proyecto “EDF Puente Vehicular sobre el Río Guadalquivir comunidad de Obrajes” el levantamiento topográfico se extiende sobre el río de 150 m aguas arriba y 150 m aguas abajo aproximadamente.

» Análisis de resultados

Viendo los resultados se puede observar que

- » El tirante de cálculo obtenido mediante el programa antes descrito tiene un valor de **4,10 m** y **4,33 m**. para un periodo de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

Se puede decir que el tirante demostrado por observación y la encuesta de los comunarios no está alejado de la realidad.

Se obtuvieron los siguientes resultados sin considerar la pila del puente:

Tabla 5.12: Resultado tirante máximo para período de 100 y 50 años

DESCRIPCION	T = 50 años	T = 100 años	Unidades
Caudal	1.299,10	1.510,10	m ³ /s
Cota	1954,54	1954,84	m
Área mojada	243,90	269,27	m ²
Ancho del espejo de agua	106,74	115,34	m
Tirante máximo	4,10	4,33	m
Pendiente	0.00876	0.00876	m/m
Velocidad	5,33	5,61	m/s
Tipo de Flujo	Supercrítico	Supercrítico	

Fuente: Elaboración propia en base a la información de EDF Puente Vehicular sobre el Río Guadalquivir comunidad de Obrajes

De acuerdo a los resultados se obtiene la siguiente gráfica.

Figura 5.1: Tirante máximo calculado del río

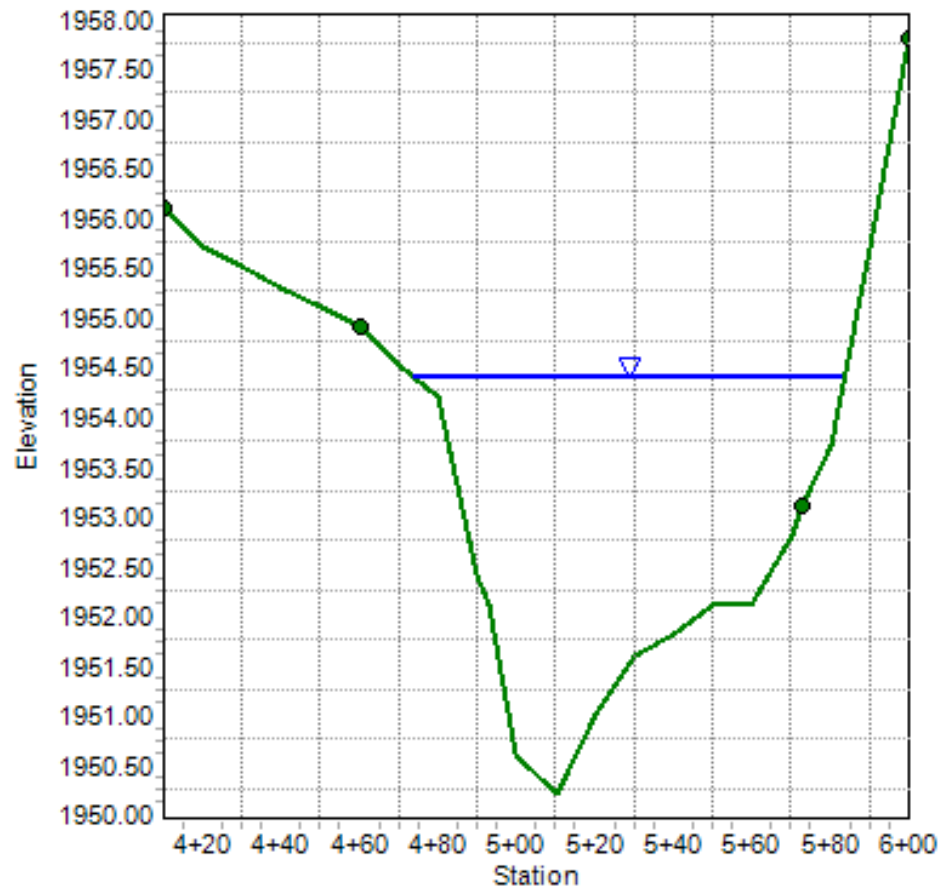


Figura 5.2: Tirante máximo observado del río



En la visita al campo se midió las marcas o huellas dejadas por las aguas de máximas avenidas, en la foto se puede observar la marca, el cual mide 3,95 m. y si comparamos el tirante máximo calculado con el caudal obtenido para períodos de retorno de 50 y 100 años se tiene un tirante de 4,10 m y 4.33m respectivamente.

Asimismo, se hizo la encuesta a dos personas que viven cerca del lugar los cuales afirman que los tirantes de las crecidas más fuertes superan a medio pilar, y que sólo una vez en la historia se dio una fuerte crecida que llegó hasta los terrenos que se encuentran en el lugar el cual se dio lugar en 1954 aproximadamente. Por lo cual se recurrió a los datos de SENAMHI estación Aeropuerto para hacer un análisis, la lluvia máxima diaria en 1954 fue registrada de 125 mm., con lo cual podemos concluir que para un período de retorno de 100 años es muy probable ocurra este tipo de fenómeno superando el tirante máximo observado.

5.4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA METODOLOGÍA

5.4.2.1 VENTAJAS

- » La metodología no requiere grandes experiencias en el manejo de GIS.
- » Se puede actualizar la información de manera muy rápida e incluso se puede generar si no se dispone fuente de información.
- » Se puede intercambiar información fácilmente entre Microsoft Excel, Microsoft Access y ArcHydro geodatabase.
- » Los SIG nos ofrecen herramientas mucho más precisas y rápidas con las cuales se obtiene las variables hidrológicas de forma automática.
- » Una de las ventajas que ha demostrado el SIG es que permite manejar diferentes mapas a diferentes escalas, además de manejar la información contenida en su base de datos mucho más rápido y se evita un problema común que suele ocurrir con los mapas tradicionales como es la pérdida de archivos, confusión de mapas e información.

5.4.2.2 DESVENTAJAS

- » Al momento de introducir o generar la información se debe tener mucho cuidado, con respecto a las unidades y deben estar georreferenciados.
- » Como todos los programas el HEC-HMS y ArcGIS son muy sensibles por tanto se debe tener mucho criterio al momento de determinar parámetros hidrológicos o datos de entrada como ser mapas y tablas externas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se extraen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES:

Los SIG ofrecen herramientas mucho más precisas y rápidas con las cuales se estiman variables hidrológicas de forma automática, ArcHydro y GeoHMS son herramientas que permite estimar todas las variables morfológicas como es el área de aporte, longitud del curso principal, pendientes, etc. aumentando la efectividad y la precisión del estudio.

El valor estimado del CN medio ponderado de la cuenca del Río Guadalquivir estimado es **CNII=61** Y **CNIII=78** correspondiente a la cuenca, el número de curva para las subcuencas varía entre **69-88** para condición III, donde los valores de CN altos representan escorrentías altas y viceversa.

Los caudales obtenidos con el modelo desagregado en subcuencas del HEC-HMS método SCS para **CN III** y un período de retorno de 100 y 50 años, es de **1.510,10 m³/s** y **1.299,10 m³/s**, respetivamente.

El valor estimado del C medio ponderado de la cuenca del Río Guadalquivir estimado es **C=0,33** correspondiente a la cuenca, el coeficiente de escorrentía para las subcuencas varía entre **0,25-0,43** (*método Prevert*), donde los valores de C altos representan caudales altas y viceversa. Su valor depende de las características concretas del terreno que determinan la infiltración del agua en el suelo.

La suma de los caudales obtenidos con el modelo desagregado en subcuencas método Racional para un período de retorno de 100 y 50 años, es de **1.926,828 m³/s** y **1.756,847 m³/s**, respetivamente.

Se pudo apreciar que aplicar el modelo a la cuenca completa ya sea por el método SCS o racional, los resultados obtenidos de los caudales son subestimados, por lo que se

concluye que es incorrecto aplicar el modelo a cuencas completas, sobre todo cuando se trata de cuencas grandes, como es el caso de la cuenca en estudio.

Los caudales para una desagregación de la cuenca por el método Número de Curva SCS con Hec-HMS y racional nos brindan resultados aceptables, habiendo algunos valores sobreestimados por el método racional, por lo que se colige que el método SCS es el método que ofrece mejores resultados.

Respecto a las metodologías para la obtención de los números de curva, con la metodología utilizada para la estimación de Número de Curva (CN) basada en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el programa de aplicación ArcGIS se obtienen resultados adecuados en función de tipo o grupo de suelo, su uso de suelo y pendiente, y además, su aplicación es más sencilla, con el consecuente ahorro de tiempo de trabajo y la ventaja de este método no requiere grandes conocimientos en SIG.

El ArcGIS ha demostrado ser una herramienta efectiva para el desarrollo de este trabajo, además de haber demostrado ser una vía efectiva para actualizar, analizar y mostrar toda la información.

En el caso de trabajar con HEC-GeoHMS no se requieren grandes conocimientos en SIG, ya que es un programa muy sencillo y el proceso de trabajo es secuencial. Por el contrario si se trabaja con un programa de sistemas de información geográfica si es necesario cierta experiencia en SIG para la obtención de los números de curva (CN), coeficiente de escorrentía (C) y para la generación del MDE, aunque ya hay empresas que suministran el modelo en formato raster el cual fue utilizado para realizar este trabajo.

Por otro lado podemos decir que la cuenca en estudio sufre el mismo problema que sufren las demás cuencas en Bolivia, que es la falta de estaciones medidores de caudales para hacer investigaciones y asimismo no cuenta con suficientes estaciones meteorológicas, tal como se ha podido mostrar en los resultados que solo se trabajaron con cuatro estaciones pluviométricas.

RECOMENDACIONES:

Se recomienda que cuando se trata de cuencas de grandes extensiones se trabaje con cuencas desagregadas para su respectivo análisis, los GIS nos ofrecen herramientas, con los cuales se estima de manera rápida y más precisa todas las variables hidrológicas, de modo que los resultados serán lo más cercano a la realidad.

Asimismo cabe destacar que se tenga mucho cuidado al momento de trabajar con cualquier software puesto que cualquier programa es muy sensible a la hora de introducir datos, es por ello se debe tener cuidado en cuanto a las unidades y datos reales de la cuenca que requiere el modelo.

También sería muy conveniente que las leyendas de las bases de datos geológicas y de usos de suelo estuvieran clasificadas en base a los grupos hidrológicos del suelo y a los usos de las tablas de los números de curva, como ya ocurre en Estados Unidos con los datos del USGS¹.

Si se dispusiera de una serie hidrológica de caudales se podría calibrar el modelo de cuenca y el modelo meteorológico, y así se vería que patrón de distribución de precipitación es más adecuado o que grupo hidrológico se debería asignar con mayor seguridad a la hora de realizar estudios hidrológicos para cualquier obra civil que se tenga en la cuenca.

Por lo expuesto anteriormente se recomienda realizar una campaña para una instalación de una Estación Limnográfica para un registro de las variaciones del nivel del agua en la sección de control de manera continua, el cual sería muy útil para realizar estudios de investigación.

¹ *Servicio Geológico de los Estados Unidos*