



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

“MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON BASE EN SOFTWARE HEC ®”

TESINA

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

JAVIER ÁLVAREZ MAYA

SIMÓN RAMÍREZ HERNÁNDEZ

DIRIGIDO POR

M. en C. JOSÉ ANTONIO QUEVEDO TIZNADO

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO.

MARZO, 2014

DEDICATORIAS

Javier Álvarez Maya:

A mis padres
Ma Jesús Maya Olvera
Tranquilino Álvarez Silva

Por apoyarme en esta etapa de crecimiento y formación profesional. Una recompensa más a su esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos
Ing. Alejandro Tranquilino Álvarez Maya
Ing. Luis Álvarez Maya

Por apoyarme para la realización de este trabajo y con ello alcanzar el grado de Ingeniero Civil.

Simón Ramírez Hernández:

A mis padres
Elvira Hernández Franco
Simón Ramírez Emilia

Por creer siempre en mí y sacarme adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

Javier Álvarez Maya, Simón Ramírez Hernández:

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) que a través del Centro de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería, permitió la realización de este trabajo como resultado de la impartición del Diplomado en Vías Terrestres.

A nuestro director de la tesina el M. en C. José Antonio Quevedo Tizado por los consejos, sugerencias y su disponibilidad al dirigir esta tesina.

Al Centro de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería que a través de su coordinador el M. en I. Rubén Ramírez Jiménez y a M. Concepción Perales Rangel por la organización e implementación del Diplomado en Vías Terrestres.

A la Dra. Hilda Romero Zepeda por sus comentarios y sugerencias que permitieron mejorar este trabajo, en redacción y formato.

Al Dr. Omar Chávez Alegría que como coordinador de la Licenciatura en Ingeniería Civil nos apoyó en todo momento durante la estancia en esta institución.

Javier Álvarez Maya:

Al Ing. Leopoldo García Pacheco Director de Desarrollo Urbano y Ecología del Municipio de Pedro Escobedo, por el apoyo brindado y los consejos para mejorar la tesina.

Simón Ramírez Hernández:

Mis más sinceros agradecimientos al Ing. Javier Cajiga Rodríguez, por su valioso apoyo en esta etapa de formación profesional y por la confianza que me brindo.

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz, por el apoyo y oportunidad brindada que impulso un pequeño logro, en mi vida.

RESUMEN

La modelación hidrológica es una de las manifestaciones de la revolución científico-técnica contemporánea ampliamente generalizada en los países desarrollados. En la actualidad los modelos matemáticos hidrológicos son muy usados en la práctica internacional ya que han evolucionado las metodologías de investigación hidrológica, posibilitan solucionar los problemas de inundaciones cada vez más frecuentes relacionadas con el cambio climático, realizar pronósticos y modelar escenarios futuros.

El HEC-HMS es uno de los programas que ha alcanzado mayor popularidad en dicha práctica, el mismo permite estimar los hidrógrafos de salida en una o varias subcuencas a partir de condiciones extremas de lluvia. En México en los últimos años se han dado pasos en la aplicación de este software para obtener hidrogramas de avenidas en algunas zonas del país, pero aún no existe suficiente experiencia en su aplicación.

En este sentido la presente investigación realiza recomendaciones y proporciona un manual detallado para la modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas que no cuenten con una base de datos amplia, a partir de su aplicación en la cuenca “del río Mixcoac en el Distrito Federal”, obteniendo experiencias en los métodos de cálculo de mejor aplicación y los valores que alcanzan sus parámetros considerando las particularidades físico-geográficas y climáticas de este tipo de cuencas y sobre todo, el estado de la información hidrometeorológica en las mismas, para su posterior generalización.

Para elegir el evento para su modelación, se elige un lugar con información hidrológica para poder formular y procesar la información con un grado bajo de errores; se modela la cuenca del Río Mixcoac, misma que se describe en este trabajo. Se expone una serie de métodos para la formulación de hidrogramas, tales como los propuestos por: Clark, Muskingum y el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Las simulaciones del proceso de lluvia-escorrentía se procesan con el programa HEC-HMS, este programa posee una interfaz para el procesamiento de información climatológica, hidrométrica y fisiográfica que es el HEC-GeoHMS. Cabe mencionar que el uso del programa HEC-GeoHMS, requiere de una ruta de programación específica, ya que si se introducen parámetros erróneos, al finalizar el procesamiento mostrará ausencia de valores y por lo tanto no es posible su uso en el programa HEC-HMS.

En este trabajo de tesina se propone un procedimiento detallado para la modelación hidrológica usando el software HEC®, el cual requiere de insumos como lo es: el proyecto de una cuenca, mismo fue obtenido mediante el procesamiento del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) con la aplicación del software ArcGIS®, se describió el proceso mediante una serie de comandos sugeridos para que el proyectista le sea de utilidad como guía.

Palabras Clave: HEC-GeoHMS, hidrogramas, lluvia – escurrimiento, SIG.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RELACIÓN DE VARIABLES	11
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. JUSTIFICACIÓN	15
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3. CONTRIBUCIÓN ESPERADA	16
II. REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	17
2.2. GENERALIDADES DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	20
2.3. GENERALIDADES DEL SOFTWARE HEC®	21
2.3.1 MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL	22
III. MARCO TEÓRICO	28
3.1 MÉTODO DEL SCS	29
3.2 MÉTODO DE CLARK	31
3.3 MÉTODO DE CLARK MODIFICADO (MODCLARK)	33
3.4 HIDROGRAMA UNITARIO DEL SCS	34
3.5 MÉTODO DE MUSKINGUM	35
IV. METODOLOGÍA	40
4.1 INFORMACIÓN REQUERIDA	40
4.1.1 TOPOGRAFÍA	40

4.2	ZONA DE ESTUDIO	42
4.2.1	CUENCA DEL RÍO MIXCOAC	42
4.3	PROYECTO DE CUENCA	44
4.4	CÁLCULO DE HIDROGRAMAS CON EL PROGRAMA HEC-HMS 3.5	76
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	82
VI.	CONCLUSIONES	84
VII.	REFERENCIAS	86
A.	ANEXOS	89
A.1	ZONAS UTM PARA MÉXICO Y RESTO DEL MUNDO	89
A.2	CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS TIPOS DE SUELO SEGÚN SU PERMEABILIDAD	91
A.3	NÚMERO DE CURVA SEGÚN LA COBERTURA DE SUELO	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Métodos hidrológicos que incluye el modelo HEC-HMS.	25
2.2 Elementos hidrológicos de un modelo de cuenca en HEC-HMS.	25
2.3 Elementos meteorológicos de un modelo de cuenca en HEC-HMS.	27
2.4 Componentes de los datos de entrada de un modelo de cuenca en HEC-HMS.	27
4.1 Características MDE CEM 3.0.	41
4.2 Puntos del polígono en estudio.	50
4.3 Evento 1 (E1), 28 de julio de 1998, en la cuenca del río Mixcoac.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Fases definidas para esquematizar el proceso lluvia-escorrentamiento en el modelo HEC-HMS (Sánchez, 2011).	23
2.2 Esquema de conexión entre ArcGIS, HEC-GeoHMS y HEC-HMS.	23
3.1 Hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos. (a) adimensional y (b) unitario triangular.	35
3.2 Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de canal.	36
3.3 Cambio de almacenamiento durante un periodo de tránsito Δt .	38
4.1 Modelo digital de elevaciones MDE.	40
4.2 Localización de la cuenca del río Mixcoac.	43
4.3 Descarga del MDE del sitio web INEGI, (CEM 3.0)	45
4.4 Base de datos MDE en directorio C.	45
4.5 Anclaje de base de datos al programa ArcMap 10.	46
4.6 Apertura de base de datos del MDE.	46
4.7 Mensaje del programa al abrir el MDE.	47
4.8 Representación del MDE con el programa ArcMap 10.	47
4.9 Obtención del polígono de estudio Google Earth ©.	48
4.10 Programa TMCALC.	49
4.11 Zonas UTM de México.	49
4.12 Conversión de coordenadas, programa TMCALC.	50
4.13 Localización de herramienta “ArcToolbox Window”.	50
4.14 Localización de herramienta “Raster Processing / Clip”.	51
4.15 Localización de herramienta “Raster Processing / Clip”.	51
4.16 Visualización del layer “riomx”.	52
4.17 “Zoom to Layer riomx”.	52
4.18 Visualización del layer “riomx”.	53
4.19 Herramienta para cambio de coordenadas.	53
4.20 Herramienta para proyección de coordenadas.	54
4.21 Cuadro de diálogo para proyección de coordenadas.	55
4.22 Proyección de coordenadas UTM.	55
4.23 Condiciones para Geoprocessing.	56
4.24 Polígono de estudio para procesamiento.	56

4.25	Submenú para procesamiento de MDE.	57
4.26	Submenú <i>Preprocessing / Fill Sinks</i> .	57
4.27	Submenú <i>Preprocessing / Fill Sinks</i> .	58
4.28	Submenú <i>Preprocessing / Flow Direction</i> .	58
4.29	Submenú <i>Preprocessing / Flow Accumulation</i> .	59
4.30	Submenú <i>Preprocessing / Stream Definition</i> .	59
4.31	Submenú <i>Preprocessing / Stream Segmentation</i> .	60
4.32	Submenú <i>Preprocessing / Catchment Grid Delineation</i> .	60
4.33	Submenú <i>Preprocessing / Catchment Polygon Processing</i> .	61
4.34	Submenú <i>Preprocessing / Drainage Line Processing</i> .	61
4.35	Submenú <i>Preprocessing / Adjoint Catchment Processing</i> .	62
4.36	Definición de proyecto de estudio.	62
4.37	Ubicación del punto de salida.	63
4.38	Generación de proyecto.	63
4.39	Generación de proyecto nuevo.	64
4.40	Obtención de la pendiente de la cuenca.	65
4.41	Pendiente de la cuenca.	66
4.42	Características obtenidas de la cuenca.	66
4.43	Características de la cuenca.	67
4.44	Recorte del uso de suelo y vegetación.	68
4.45	Unión de (a) usosuelo y edafológico = (b) ncurva de la cuenca.	68
4.46	Usos de suelo en la cuenca.	69
4.47	Edición de nuevas columnas.	70
4.48	Tabla con la clasificación de cada uso de suelo.	70
4.49	Creación de tabla <i>CNLookUp</i> .	72
4.50	Creación de <i>CNgrid</i> .	72
4.51	Selección de los métodos de cálculo.	73
4.52	Generación de parámetros.	73
4.53	Mensaje del programa donde muestra que no hubo errores y se puede exportar exitosamente.	74
4.54	<i>Schematic process</i> .	74
4.55	<i>HMS Legend</i> .	75
4.56	Modelo de cuenca creado satisfactoriamente.	75
4.57	Cuenca y ríos en el programa HEC.	76
4.58	Muestra la creación del <i>Meteorologic Model Manager</i> .	77

4.59	Apreciación ilustrativa de la pestaña “ <i>Met 1</i> ”.	77
4.60	Hietograma de tormenta del Evento 1.	78
4.61	Ruta para introducir datos al programa.	79
4.62	Proceso para dar de alta al <i>Gage 1</i> .	80
4.63	Muestra algunas especificaciones para el control de la simulación.	80
4.64	Resultados de la simulación.	81
5.1	Hidrograma de salida.	82
5.2	Sumario de precipitación.	82

RELACIÓN DE VARIABLES

Δh	Variación de la lámina de almacenamiento.
Δt	Variación del intervalo de tiempo.
ℓ	Distancia desde el punto más alejado de la cuenca a la salida de la misma.
dS/dt	Variación del volumen de almacenamiento con respecto al tiempo.
A	Área total de la cuenca.
A_t	Área que contribuye al escurrimiento en el tiempo t .
C_T	Coficiente de tránsito en vasos de almacenamiento.
CN	Número adimensional de curva según el método del SCS.
$CN_{I,III}$	Valores corregidos de CN para condiciones antecedentes de humedad secas y humedad.
d	Duración del pulso de precipitación efectiva o total.
D_T	Duración total de lluvia.
Fa	Retención parcial.
i	Entrada al sistema hidrológico.
la	Abstracción inicial.
$I_{t,m}$	Intensidad de lluvia en el intervalo de tiempo t o m .
K	Coficiente de proporcionalidad en el método de Muskingum.
M	Número de impulsos de precipitación efectiva.
P_t	Precipitación en el intervalo de tiempo t .
P_T	Precipitación total.
Pe	Precipitación efectiva.
q	Escurrimiento directo por unidad de área.

q_u	Gasto unitario.
q_p	Gasto pico o máximo del hidrograma unitario.
Q_p	Gasto pico o máximo del hidrograma de salida.
Q_{Ent}^t	Gasto de entrada en el tiempo t .
Q_{Sal}^t	Gasto de salida en el tiempo t .
\bar{Q}_{Sal}^t	Gasto promedio de salida en el tiempo t .
R	Coefficiente de almacenamiento.
S	Retención potencial.
t_b	Tiempo base de la respuesta unitaria.
t_{cell}	Tiempo de viaje de la celda.
t_L	Tiempo de retraso de la respuesta unitaria.
t_p	Tiempo pico de la respuesta unitaria.
T_b	Tiempo base o duración total del hidrograma de salida.
T_c	Tiempo de concentración.
u_{n-m+1}	Función impulso respuesta.
X	Factor de ponderación en el método de Muskingum.

I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil y la ciencia en general, se basan en modelos para su desarrollo y solución de problemas, la mayoría de ellos son elaborados mediante el uso de programas computarizados. Este tipo de herramientas ha generado un nuevo paso en el camino de una verdadera industrialización y hacia la producción, principalmente en el ramo de la ingeniería. Tras el éxito de la tecnología orientada a objetos, el uso sistemático de modelos se presenta ahora como la forma apropiada para programar con un nivel más alto de abstracción y de aumentar el nivel de automatización.

El propósito fundamental que persigue el presente texto es orientar e introducir tanto a ingenieros civiles, ingenieros hidrólogos como a profesionales de las ciencias naturales, en el conocimiento de los fundamentos, principios y aplicaciones de la hidrología de superficie por medio de la tecnología que está ahora disponible, en este caso el software HEC®.

El software HEC® tiene como finalidad la simulación hidrológica de eventos, lineal y semidistribuido, para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en esorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y por extensión en nuestro país.

Para desarrollar el trabajo de investigación denominado *Modelación Hidrológica con Base en Software HEC®* se ha estructurado en cinco capítulos donde se incluyen en forma clara y sencilla los fundamentos, principios y aplicaciones de la modelación hidrológica realizada en software HEC®.

En el primer Capítulo denominado **Introducción** se muestra al lector una breve descripción en la que se incluyen los aspectos de mayor relevancia así como la justificación, objetivos y la contribución esperada de este trabajo.

Posteriormente en el Capítulo II se aborda una explicación detallada de los conceptos básicos de la modelación hidrológica y los antecedentes de la misma en los últimos años, esto como parte de la revisión de literatura.

El tercer Capítulo consta de un marco teórico en donde se describen algunos métodos hidrológicos que incluye el modelo HEC-HMS, para pérdidas (*SCS Unit Hydrograph*), para transformación de precipitación efectiva en escurrimiento directo (*Clark Unit Hydrograph*) y tránsito de avenidas (*Muskingum*).

En seguida el Capítulo IV **Metodología**, incluye la topografía y una descripción completa de la zona de estudios (cuenca del río Mixcoac). El contenido comienza con una explicación de los aspectos de mayor relevancia tales como: localización, clasificación hidrológica, el uso de suelo, parteaguas, área, corrientes principales, corrientes tributarias, ancho y orientación de la cuenca.

A continuación se aborda el tema, modelo HEC HMS en el que define a un modelo hidrológico conceptual como, la simulación de una cuenca hidrográfica como sistemas, considerando su funcionamiento y la distribución espacio temporal de sus características físicas y demás variables. En este apartado también se desarrolla el proyecto de la cuenca, haciendo el vaciado de datos con el programa ArcGis© y enseguida con el programa HEC-GeoHMS©. El HEC® es un programa flexible que permite al usuario seleccionar diferentes métodos para calcular: pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación (o tránsito de avenidas) en cauces; y permite simular los procesos hidrológicos por eventos o en forma continua (Estrada *et al.*, 2012).

Posteriormente en el Capítulo V denominado **Resultados y Discusión** se muestran los resultados de forma sencilla pues se incluye una breve explicación de cada uno de ellos. Adicionalmente se presenta la discusión de resultados, ya que en este último capítulo se termina la modelación hidrológica a base del software HEC® de la cuenca del río Mixcoac en el Distrito Federal.

A lo largo de este trabajo se combinarán las bases teóricas, el rigor científico con práctica, proporcionando una panorámica actual y completa sobre la modelación hidrológica basada en software.

1.1. Justificación

En México como en otros países, las herramientas computarizadas están directamente ligadas al desarrollo y la investigación del país, es decir sin ellas no habría avances científicos y principalmente optimización de tiempo en trabajos y tareas realizadas por la humanidad, es por ello que la modelación hidrológica con base en software HEC® es sumamente importante y contar con un manual simple y al mismo tiempo muy completo, será de gran relevancia como apoyo para alumnos de ingeniería así como para profesionistas en este ramo.

Un modelo adecuado de la relación lluvia-escorrentamiento permite hacer una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca y puede ser utilizado en el diseño de obras para controlar inundaciones o para pronosticarlas oportunamente. Con base en él se pueden operar, además, obras ya construidas o emitir alarmas para movilizar a la población de una zona en riesgo, cuando sea necesario (Domínguez *et al.*, 2008).

Con la formulación del modelo hidrológico se conocerán los aportes en cantidad de agua de la cuenca del río Mixcoac, y con esto contar con datos confiables, para la toma de decisiones en las diferentes instituciones y/o entidades de la zona (D.F. y Estado de México).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Contar con un manual actualizado para el correcto uso del software HEC®, puesto que este programa tiene la ventaja de manejar y procesar una gran cantidad de datos de forma rápida facilitando la obtención de parámetros hidrológicos, de esta manera contribuir a la innovación de herramientas tecnológicas para la modelación hidrológica dentro de la práctica profesional.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Ofrecer una visión global de la modelación hidrológica y presentar tanto conceptos, como modelos en los que se profundizará la aplicación del software HEC®.
- Simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático (software HEC®), que resulte confiable, por la eficiencia y calidad de resultados.
- Llevar a cabo la Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río Mixcoac apoyándose en el software HEC®.
- Validar los resultados del Modelo Hidrológico en el software HEC® y de los calculados tradicionalmente, comparándolos en cuanto a tiempo de realización, costos y resultados obtenidos.

1.3. Contribución esperada

Contar con un manual de modelación hidrológica con base en software HEC®, para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. En el que se muestre la forma de generar un Modelo Hidrológico de la cuenca del río Mixcoac y de cualquier cuenca que no cuente con una amplia base de datos, específicamente tener un texto de apoyo para la estimación de los hidrogramas de salida en la cuenca del río Mixcoac (caudales máximos y tiempos pico, duración del escurrimiento) a partir de un evento de lluvia medido utilizando diferentes métodos de cálculo los cuales vienen integrados en el software.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes históricos de la modelación hidrológica

A menudo los proyectos de planificación y de manejo ambiental de cuencas hidrográficas requieren la generación de información por medio de la cual se puedan tomar decisiones acertadas que permitan lograr una verdadera sostenibilidad de las mismas (Pizarro *et al.*, 2005).

Dentro de la información por generar se encuentran los caudales de las fuentes principales y sus afluentes, bien sean máximos medios o mínimos y para diferentes intervalos de tiempo (mensual, anual, etc.), los cuales pueden ser obtenidos si se utiliza la información proporcionada por instrumentos de medición, como limnógrafos y limnímetros; sin embargo, en numerosas ocasiones se presenta la ausencia de éstos y, por consiguiente, falta de información.

Los primeros modelos matemáticos en Hidrología se originaron en la segunda parte del siglo XIX como una primera respuesta a problemas básicos tales como: los diseños de redes de alcantarillado, sistema de evacuación y alivio de obras de retención o de obras de protección hidráulica (González *et al.*, 2000). En todos ellos el interés se centraba fundamentalmente en la determinación de los caudales máximos. La mayor parte de los ingenieros utilizaban fórmulas empíricas derivadas para casos particulares y aplicados en situaciones similares, como por ejemplo la fórmula racional citada por Pacheco (2012) y propuesta por Mulvany en 1850, que puede ser considerada como el primer método para estimar caudales de punta a partir de las lluvias. Muñoz (1998) plantea que los modelos hidrológicos pretenden reproducir matemáticamente el fenómeno de transformación lluvia-caudal.

Los desarrollos de sistemas para simulación hidrológica continua se remontan desde mediados del siglo XX hasta hoy; se han propuesto diferentes sistemas que van desde muy simples hasta los complejos que manejan numerosas variables. Adicionalmente, los desarrollos en los sistemas de información geográfica (SIG) han facilitado la incorporación de datos topográficos, geográficos y morfológicos, conociendo la distribución espacial de éstos en la cuenca. Esto es particularmente significativo para el caso de ciertas zonas en las cuales las condiciones de cobertura presente una dinámica considerable.

La evolución de estos métodos indirectos de evaluación de los recursos hídricos, sumado a los avances computacionales y a la masificación de los sistemas de información geográfica (SIG), han permitido el análisis de los procesos hidrológicos, considerando intervalos de tiempo más cortos y con un mayor detalle espacial en la cuenca.

Numerosos estudios en países como Australia, Estados Unidos, Sudáfrica y otros, cuyo objetivo era determinar los caudales que presenta una determinada fuente, han utilizado el software HEC-HMS para la modelación continua de la escorrentía; entre estos estudios se puede citar el realizado por el departamento de ciencias geológicas de la Universidad de Texas, en el cual, mediante el uso de HEC-HMS, modelaron los caudales máximos medios y mínimos que presentaba el río San Antonio que presenta un área de captación de aproximadamente 10,000 km², para posteriormente regionalizar las relaciones lluvia-escorrentía en esta cuenca. Para esto utilizaron información geográfica, topográfica y morfológica analizada por medio de un SIG, así como la información de lluvias de estaciones con influencia en la cuenca del río San Antonio. La calibración de los resultados se realizó por medio de información de caudales de una estación limnigráfica ubicada dentro del área de la cuenca del río en estudio. Los resultados mostraron una calibración aceptable con respecto a los valores observados.

Por tal motivo la modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sean en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Dueñas, 1997).

Tienen la ventaja de poder simular aceptablemente el proceso hidrológico de generación de avenidas si se estiman satisfactoriamente los parámetros necesarios. Su principal limitación es precisamente la elección adecuada de los parámetros, errores en ésta inducen a obtener resultados

que no corresponden a la realidad. Estos modelos son aplicados básicamente en el cálculo de crecidas, particularmente en los casos en los que el flujo superficial es el principal proveedor de caudal en la formación de avenidas.

Todo modelo está sujeto a ventajas y desventajas por lo que es necesario, a la hora de realizar una simulación, elegir entre las opciones reales (Martín *et al.*, 2003). La selección del tipo de modelo estará en función de varios factores, por ejemplo en un valle de inundación abrupto un modelo unidimensional será el adecuado, en cambio en llanuras de inundación se debe recurrir a modelos casi bidimensionales o bidimensionales; el primer caso requiere habilidad y experiencia en este tipo de situaciones y el segundo una base de datos muy detallada y costosa.

Son varios los modelos hidrológicos que existen, siendo el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC-HMS por sus siglas en Inglés), el aplicado en la presente investigación, ya que es un programa computacional gratuito y de amplia utilización internacional en el estudio de avenidas, el cual provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y tránsito de caudales (Feldman, 2000). Este modelo utiliza métodos de precipitación-esorrentía para estimar los hidrogramas de esorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca o región durante un período especificado.

Es un programa muy flexible que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, cálculo de hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación. La simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de éstos eventos.

Por otra parte, el desarrollo de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) permite la integración de los resultados de la modelación hidrológica y las diferentes características físico-geográficas de las cuencas en un sistema de prevención hidrológica que posibilite el pronóstico de inundaciones y la correspondiente toma de decisiones. Los SIG constituyen un instrumento adecuado para responder a cuestiones relacionadas con la distribución espacial y las series

temporales de la escorrentía. Estos sistemas facilitan el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados (NCGIA, 1990).

Con ayuda de los SIG la modelación hidrológica acelera su desarrollo y aplicación pudiendo actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos, a la vez que sus resultados pueden ser incorporados al proceso de toma de decisiones y en la ordenación del territorio.

Los investigadores en Hidrología encuentran cada vez más efectivo el uso de los SIG debido a su gran capacidad para gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real. Actualmente las aplicaciones hidrológicas están prestando una mayor atención a los modelos que contemplan la componente espacial y temporal de los datos, desarrollando a su vez métodos de programación orientada a objetos. Más recientemente la aparición del módulo de interfaz geoespacial HEC-Geo-HMS (*Geospatial Hydrologic Modelling System Extension*), desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU (Doan, 2003), permite generar la información que caracteriza a la cuenca y los parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS.

Incluye las siguientes funciones: pre-procesamiento de elementos del terreno, construcción de temas hidrológicos, estructuras hidráulicas y puntos de control, procesamiento de cuencas (fusión y/o separación de cuencas, fusión y separación de tramos de cursos, generación de perfiles, delineación de subcuencas), extracción de características de cursos y cuencas (longitudes y pendientes de ríos, centroides de subcuencas, direcciones de flujo).

2.2. Generalidades de los modelos hidrológicos

La modelación hidrológica es una de las manifestaciones de la revolución científico-técnica-contemporánea ampliamente generalizada en países desarrollados. El desarrollo científico-técnico actual permite el empleo de tecnologías de avanzadas entre las que dicha modelación ocupa un lugar destacado como herramienta para el análisis y operación de los recursos hídricos.

En la actualidad los modelos matemáticos son los más difundidos y utilizados en la práctica hidrológica internacional ya que permiten el funcionamiento de un sistema en situaciones que no se han producido y mejora la visión de estas, (González *et al.*, 2000).

En la década de 1960, en el campo de la Hidrología al igual que en otras ramas de la ciencia y la técnica, se experimentó un auge muy importante en la modelación matemática debido fundamentalmente a la potencia y rapidez de las computadoras y a los avances de las investigaciones matemáticas. La aplicación de las tecnologías relacionadas con la modelación matemática de las cuencas contribuye a mejorar el conocimiento de las disponibilidades de los recursos hídricos y a desarrollar políticas racionales de administración de los recursos hidráulicos que garanticen el desarrollo sustentable.

Muñoz (1998) plantea que un modelo hidrológico comprende un conjunto de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular numéricamente los procesos identificados en el estudio. Los resultados de la modelación son muy útiles en el apoyo, planificación y diseño de obras hidráulicas, como también para tener un mejor conocimiento de los procesos que intervienen en la transformación de lluvia-escorrentía (Montenegro *et al.*, 1998).

2.3. Generalidades del software HEC®

Este es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y por extensión en nuestro país.

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos.

El programa HEC-HMS (desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos), simula el proceso lluvia-escorrentamiento al separar el ciclo hidrológico en partes y representar cada una de ellas como un modelo matemático. Las partes son conectadas según la cuenca de interés. Cada parte del ciclo hidrológico tiene varios métodos de estimación; su elección correcta requiere el conocimiento de la cuenca, los objetivos del estudio hidrológico, los datos disponibles y el criterio del ingeniero (USACE, 2000).

2.3.1 Modelo hidrológico conceptual

A la simulación de una cuenca hidrográfica como sistemas, considerando su funcionamiento y la distribución espacio temporal de sus características físicas y demás variables, se le denomina modelo hidrológico conceptual (MHC) (Quevedo, 2013).

Para crear el MHC, se realiza el proceso de obtener el *proyecto de cuenca*; y después se realiza el cálculo de características fisiográficas propias de los elementos que la conforman. Por último, se obtienen parámetros hidrológicos característicos de las formulaciones que se aplicaran, como métodos de cálculo de pérdida de lluvia o de transformación del escorrentamiento.

Por lo tanto se trata de un programa flexible que permite al usuario seleccionar diferentes métodos para calcular: pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación (o tránsito de avenidas) en cauces; y permite simular los procesos hidrológicos por eventos o en forma continua (Estrada *et al.*, 2012). Las diversas fases de trabajo del programa se esquematizan en la Figura 2.1.

La aparición de la interfaz denominada HEC-GeoHMS (de *Geospatial Hydrologic Modelling System Extension*), desarrollada como una extensión del sistema ArcGIS© por el mismo Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada Norteamericana (ver Figura 2.2), permite generar la información necesaria para caracterizar a la cuenca de estudio y definir los parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS (USACE, 2010).

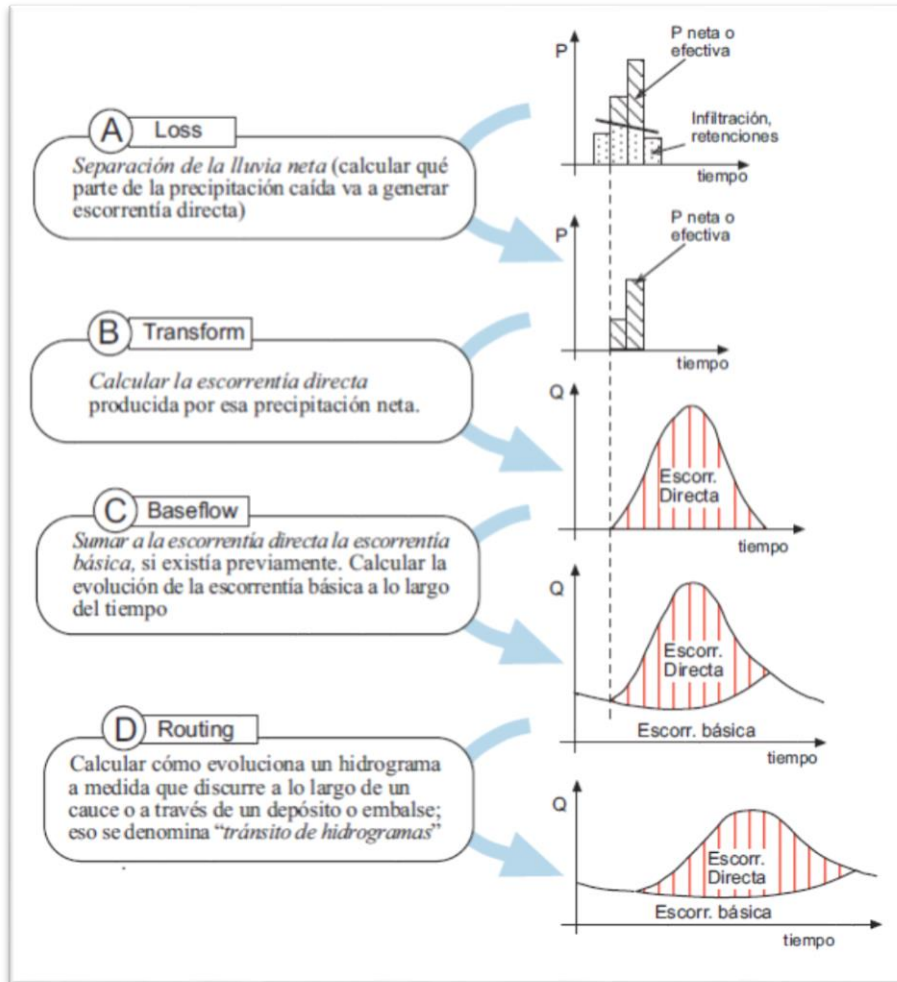


Figura 2.1 Fases definidas para esquematizar el proceso lluvia-escurrimiento en el modelo HEC-HMS (Sánchez, 2011).

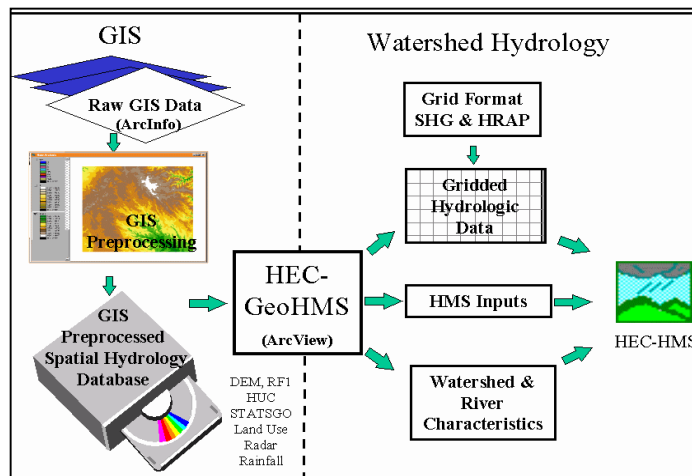


Figura 2.2 Esquema de conexión entre ArcGIS, HEC-GeoHMS y HEC-HMS.



Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, HEC-HMS usa cuatro componentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal con el modelo de cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico; en tanto que las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realiza la simulación. Los componentes de los datos de entrada, tales como series temporales, tablas y datos por celdas (del MDE) son requeridos como parámetros o condiciones de frontera tanto en el modelo de cuenca como en el meteorológico (Nanía, 2007).

- **Componentes del modelo de cuenca:** El modelo se refiere a la cuenca física; el usuario lo desarrolla al incluir y conectar elementos hidrológicos de la misma. Tales elementos usan modelos matemáticos para simular los procesos físicos que ahí se producen. En la
- , Tabla 2.2 Elementos hidrológicos de un modelo de cuenca en HEC-HMS. se describen cada uno de los métodos hidrológicos y elementos hidrológicos de un modelo de cuenca que incluye el modelo HEC-HMS respectivamente.
- **Componentes del modelo meteorológico:** Este modelo calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. Puede usar precipitación puntual o por celdas y puede modelar precipitación sólida y líquida junto con la evapotranspiración. Un método de evapotranspiración se requiere únicamente cuando se desee una respuesta de la cuenca continua o a largo plazo. En la tabla 2.3 se describen los elementos del modelo meteorológico.
- **Componentes de especificaciones de control:** Se refiere al tiempo que dura la simulación hidrológica (incluyendo fecha y hora, tanto inicial como final) así como el paso de tiempo (intervalo de cálculo). Cada uno está formulado mediante ecuaciones que normalmente dependen de parámetros hidrológicos, tales como: forma del hidrograma, tipo de suelo, características del cauce, etc. (Para información acerca de los fundamentos técnicos de estos métodos, se recomienda consultar USACE, 2000).
- **Componentes de la entrada de datos:** Datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de la cuenca y meteorológicos. En la tabla 2.4 se presenta una lista de los datos de entrada.

Tabla 2.1 Métodos hidrológicos que incluye el modelo HEC-HMS.

Pérdidas (<i>Loss</i>)	Transformación (<i>Transform</i>)	Flujo Base (<i>Baseflow</i>)	Tránsito (<i>Routing</i>)
<i>Deficit and constant</i>	Clark Unit Hydrograph	Bounded Recession	Kinematic Wave
<i>Exponential</i>	Kinematic Wave	Constant Monthly	Lag
<i>Green and Ampt</i>	ModClark	Linear Reservoir	Modified Puls
<i>Initial and constant</i>	SCS Unit Hydrograph	Nonlinear Boussinesq	Muskingum
<i>SCS Curve Number</i>	SnyderUnit Hydrograph	Recession	Muskingum-Cunge
<i>Smith Parlange</i>	S-Graph		Straddle-Stager
<i>Soil Moisture Accounting</i>	Unit Hydrograph		

Tabla 2.2 Elementos hidrológicos de un modelo de cuenca en HEC-HMS.

Elemento Hidrológico	Descripción
Subcuenca (<i>Subbasin</i>) 	Se usa para representar la cuenca física. Dada cierta precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula: restando las pérdidas a la precipitación; transformando el excedente en caudal en el punto de salida de la subcuenca; y sumando finalmente el gasto base.
Tramo (<i>Reach</i>) 	Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia otro, ubicado aguas abajo, definidos ambos mediante el llamado <i>modelo de cuenca</i> . La respuesta de tal transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (<i>Junction</i>)	Se aplica para representar confluencias y acumular flujo de agua que proviene desde elementos hidrológicos situados aguas arriba. La






	<p>respuesta corresponde a la suma de hidrogramas generados desde todos los elementos que se conectan a dicha unión.</p>
<p>Fuente (Source)</p> 	<p>Se emplea para introducir agua al <i>modelo de cuenca</i>. Este elemento no puede recibir entradas y su salida queda definida por el usuario.</p>
<p>Sumidero (Sink)</p> 	<p>Se utiliza para representar un punto de salida, como el propio de la cuenca. Su(s) entrada(s) puede(n) provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero y, como es natural, no cuenta con salida alguna.</p>
<p>Depósito (Reservoir)</p> 	<p>Sirve para modelar la retención y atenuación de algún hidrograma proveniente desde un embalse o depósito de retención (entrada). La salida, que define el usuario, se puede calcular de dos maneras: con una relación entre capacidad (elevación-capacidad o elevación-área) y descarga; o con una relación elevación-capacidad (o elevación-área) y ecuaciones que modelan la operación de una o más estructuras.</p>
<p>Derivación (Diversion)</p> 	<p>Modela el flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La entrada proviene de uno o varios elementos ubicados aguas arriba; en tanto que la salida consiste en cierto caudal que se deriva, según lo defina el usuario, y otro que prosigue por el mismo cauce. Los flujos que son derivados, de hecho, se pueden conectar abajo con otros elementos.</p>

Tabla 2.3 Elementos meteorológicos de un modelo de cuenca en HEC-HMS.

Métodos de Precipitación	Descripción
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.
Pluviómetros con pesos	Este método aplica a pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee.
Precipitación por celdas	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
Inversa de la distancia	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicando una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta del SCS	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
Tormenta de proyecto estándar	Este método aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación (este índice se extrae de un Manual del <i>Corps of Engineers</i> y es válido sólo para Estados Unidos. Está actualmente en desuso).

Tabla 2.4 Componentes de los datos de entrada de un modelo de cuenca en HEC-HMS.

Series temporales de datos	Pares de datos	Datos por celdas
Pluviómetros	Funciones de almacenamiento-caudal	Precipitación
Medidores de caudal		Temperatura
Linnímetros	Funciones de cota-almacenamiento	Radiación solar
Termómetros		Coefficiente de cultivo
Medidores de radiación solar	Funciones cota-área	Capacidad de almacenamiento
	Funciones cota-caudal	Tasa de percolación
Medidores de coeficientes de cultivo	Funciones caudal-derivación	Coefficientes de almacenamiento
	Secciones transversales	Déficit de humedad
	Hidrogramas unitarios	Área impermeable
	Curvas de porcentaje	Número de curva CN SCS
	Funciones de fusión de nieve	Cotas
	Patrones de tasa de fusión de nieve	Equivalente de agua nieve
		Contenido de agua
		Tasa fusión de nieve

III. MARCO TEÓRICO

En México es común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento directo y tránsito de avenidas en el sitio de interés, para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación.

Las características de la cuenca se conocen por medios de planos topográficos y de uso de suelo, la precipitación a través de mediciones directas en el caso de avenidas frecuentes. Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

- 1) Área de la cuenca.
- 2) Altura total de precipitación.
- 3) Características geomorfológicas de la cuenca (forma, pendiente, longitud del cauce, etc.).
- 4) Distribución de la lluvia en el tiempo.
- 5) Distribución en el espacio de la precipitación.

Debido a que, por un lado, la cantidad y calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro y no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escurrimiento. La complejidad de los métodos aumenta a medida que se toma en cuenta más de los parámetros citados anteriormente. En este sentido también aumenta su precisión, pero los datos que se requieren son más y de mejor calidad.

A continuación se exponen los métodos que se utilizarán en este proyecto, mismos que ayudan a calcular cada uno de los volúmenes de lluvia que corresponden a cada etapa y son algunos que utiliza el software HEC-HMS.

3.1 Método del SCS

Se refiere a un planteamiento semi-empírico, propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972, 1980) para estimar la precipitación en exceso que produce la escorrentía. Se trata de una técnica que determina la cantidad total de agua que escurre, después de restar “las pérdidas”, pero sin evaluar su variabilidad temporal. Se le conoce también como: método de la curva CN, método SCS o método de las abstracciones.

Considerando que una tormenta dada genera una altura de precipitación. Al contacto con el suelo, una parte Ia será retenida inicialmente (abstracción inicial antes del encharcamiento), de modo que la escorrentía potencial se limita a la cantidad $P_T - Ia$. Así mismo suponga también que la cuenca tiene una capacidad máxima de retención, o retención potencial S . En realidad, durante el fenómeno, se tendrá una escorrentía menor o precipitación excedente Pe y una retención parcial o menor, Fa . La hipótesis básica del método establece que la relación entre las cantidades de escorrentía real y potencial es similar al cociente entre retención real y potencial (Chow *et al*, 1994):

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia} \quad (3.1)$$

Del principio de continuidad, se cumple que:

$$P_T = Pe + Ia + Fa \quad (3.2)$$

Al estudiar los resultados de muchas cuencas experimentales pequeñas, se encuentra la siguiente relación empírica para:

$$Ia = 0.20 \cdot S \quad (3.3)$$

Entonces, combinando las tres ecuaciones y resolviendo para Pe , se llega a la ecuación fundamental buscada:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3.4)$$

Para estandarizar el método, se define el número adimensional CN , tal que $0 \leq CN \leq 100$, siendo máximo para superficies impermeables y menor para terrenos naturales. Este número y la retención potencial S , en mm, se relacionan por:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.5)$$

El SCS ha propuesto valores de CN tabulados en función del tipo y uso del suelo, de modo que para cuencas heterogéneas se puede calcular un valor compuesto (ponderado). Además de lo anterior, el método contempla una corrección de CN , según las condiciones antecedentes de humedad (CAH). Se tendrán así CAH secas (I), normales (II) o saturadas (III). Los valores de las tablas se asocian a las condiciones normales y, para las otras, se tienen las relaciones siguientes:

$$CN_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (3.6)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (3.7)$$

siendo CN_I y CN_{III} los valores corregidos para CAH secas y saturadas.

Aunque el método no calcula directamente el hidrograma de escurrimiento directo, éste se puede inferir mediante derivación de las expresiones anteriores para establecer así una ley de variación temporal (Mobayed, 2001), tal que

$$q(t) = I(t) \left(1 - \frac{S^2}{[P(t) + 0.8S]^2} \right) \quad (3.8)$$

donde $q(t) = dPe / dt$ es la esorrentía, $I(t)$ es la intensidad de lluvia en el intervalo de tiempo t y $P(t)$ es la precipitación acumulada hasta el tiempo de referencia. De acuerdo con la forma habitual para medir la lluvia, la intensidad puede estar expresada mediante pulsos de precipitación por intervalo de tiempo, Δt .

3.2 Método de Clark

Este método, expuesto por Clark (1945), hace énfasis en 2 procesos críticos durante la transformación de la precipitación excedente en escurrimiento:

- Traslación o movimiento del exceso de precipitación desde el área de drenaje donde se genera hasta la salida de la cuenca;
- Atenuación o reducción en la magnitud del gasto o caudal debido al efecto de almacenamiento en la cuenca.

El almacenamiento de agua en la cuenca, sea en el suelo, la superficie o los cauces del sistema de drenaje, juega un papel importante en la transformación de la precipitación en exceso a escurrimiento. Un modelo lineal de embalse es utilizado para representar el almacenamiento a la salida de la cuenca, como un afecto agregado de todas las formas de almacenaje dentro del área tributaria.

Este modelo comienza con la ecuación de continuidad siguiente:

$$\frac{dS}{dt} = Q_{Ent}^t - Q_{Sal}^t \quad (3.9)$$

donde dS/dt es la tasa de cambio del volumen de almacenamiento; Q_{Ent}^t es el gasto de entrada promedio en el tiempo t y Q_{Sal}^t es el gasto de salida. En un modelo lineal de vaso, el almacenamiento está dado por:

$$S^t = RQ_{Sal}^t \quad (3.10)$$

En este caso, R es una constante de proporcionalidad también llamada coeficiente de almacenamiento. Combinando las ecuaciones (3.9) y (3.10) y resolviendo para Q_{Sal}^t , en un esquema aproximado de diferencias finitas se obtiene:

$$Q_{Sal}^t = \frac{Q_{Ent}^t - Q_{Ent}^{t-1}}{2} C_T - Q_{Sal}^{t-1} (1 - C_T) \quad (3.11)$$

siendo C_T un coeficiente de tránsito, cuyo valor está dado por la ecuación

$$C_T = \frac{2 \cdot \Delta t}{2R + \Delta t} \quad (3.12)$$

El gasto de salida promedio estaría dado por:

$$\bar{Q}_{Sal} = \frac{Q_{Sal}^t - Q_{Sal}^{t-1}}{2} \quad (3.13)$$

Además del modelo agregado de almacenamiento, el método de Clark toma en cuenta el tiempo que el agua requiere para llegar a la salida de la cuenca. Esto lo hace con un modelo lineal de tránsito, donde el agua se traslada desde puntos remotos hasta el vaso de almacenamiento supuesto a la salida de la cuenca, con retardo pero sin atenuación. El retraso es representado implícitamente con el llamado histograma de tiempo-área, el cual especifica el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en función del tiempo. Si la superficie es multiplicada por una lámina unitaria y dividida por el incremento de tiempo Δt , el resultado es justamente el gasto de ingreso Q_{Ent}^t al vaso de almacenamiento.

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (USACE, 2000) propone la siguiente relación para obtener el histograma de tiempo–área referido:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{T_c} \right)^{1.5} & \text{cuando } t < \frac{T_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(\frac{t}{T_c} \right)^{1.5} & \text{cuando } t \geq \frac{T_c}{2} \end{cases} \quad (3.14)$$

donde A es el área total de la cuenca; A_t , el área que contribuye al escurrimiento en el tiempo t ; y T_c , el tiempo de concentración.

El coeficiente de almacenamiento R puede ser calculado como un porcentaje del tiempo de concentración o, en caso de contar con hidrogramas medidos, se calcula como el volumen acumulado en el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma, dividido entre el gasto instantáneo en ese intervalo de tiempo.

3.3 Método de Clark modificado (Modclark)

Se han propuesto modificaciones al método de Clark (Peters y Easton, 1996; y Kull y Feldman, 1998), consistentes en calcular la variación de los tiempos de traslado en toda la región de la cuenca mediante la superposición de una malla de celdas con valores de tiempos de traslado, que se aprovecha bien con sistemas de información geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación (MDE), hoy en día imprescindibles en el campo de la hidrología (Usul y Yilmaz, 2002).

Para cada celda de la malla se especifica la distancia al punto de salida de la cuenca; y el tiempo de traslación hasta dicho punto se calcula mediante:

$$t_{\text{celda}} = T_c \frac{d_{\text{celda}}}{\ell} \quad (3.15)$$

donde t_{celda} es el tiempo de traslado del agua desde la celda, T_c es el tiempo de concentración de la cuenca, d_{celda} es la distancia de la celda a la salida de la cuenca y ℓ se refiere a la distancia máxima desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la misma.

3.4 Hidrograma unitario del SCS

El hidrograma unitario (HU) es la función respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal. Propuesto por Sherman (1932), el hidrograma unitario se define como la escorrentía directa que resulta por 1 cm de exceso de lluvia generado uniformemente sobre un área de drenaje y a tasa constante, a lo largo de su duración efectiva. El HU basado en datos de lluvia y caudal se aplica solamente para una cuenca de interés y en la corriente donde se hizo la medición de caudal.

La conocida gráfica adimensional del *Soil Conservation Service* de los Estados Unidos (SCS) es un hidrograma unitario sintético donde caudal y tiempo se expresan respectivamente como fracciones del gasto máximo q_p y el tiempo pico de la avenida, t_p . La Fuente: (SCS, 1972, 1986)

Figura 3.1a muestra este gráfico comparado con el hidrograma unitario triangular, que representa la respuesta de la cuenca debida a un pulso de precipitación del hietograma de tormenta efectivo (SCS, 1972, 1986).

Con base en la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios, el SCS ha sugerido que el tiempo de recesión se aproxime a $1.67 \cdot t_p$. Dado que el área del hidrograma unitario triangular ($q_p(2.67 \cdot t_p)/2$) es igual a la escorrentía directa que genera cierto pulso Pe_t de precipitación efectiva en el tiempo t , sobre un área de cuenca A , al despejar el valor del gasto máximo asociado se tiene que:

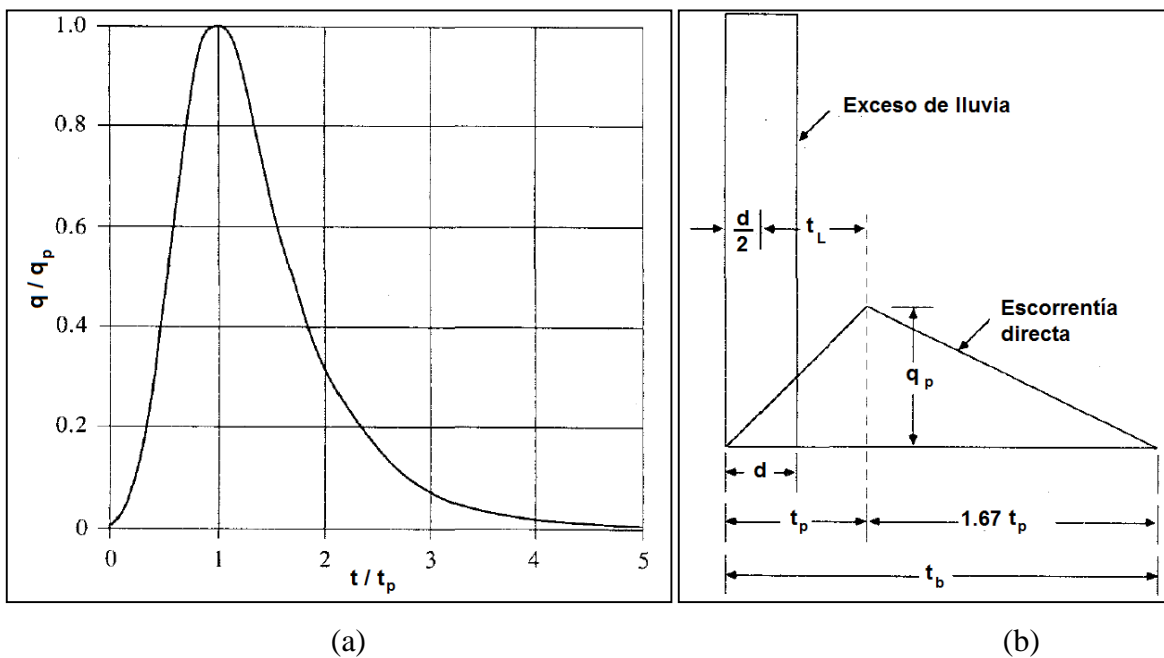
$$q_p = 2.08 \frac{Pe_t A}{t_p} \quad (3.16)$$

donde el área está expresada en km^2 , el tiempo pico en horas y el pulso de precipitación en cm. También se ha propuesto que el tiempo de retraso, t_L , sea $0.6T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. De esta forma y de acuerdo con la Fuente: (SCS, 1972, 1986)

Figura 3.1b, el tiempo de ocurrencia del gasto pico t_p está dado por:

$$t_p = \frac{d}{2} + t_L \quad (3.17)$$

donde d es la duración del pulso de precipitación.



Fuente: (SCS, 1972, 1986)

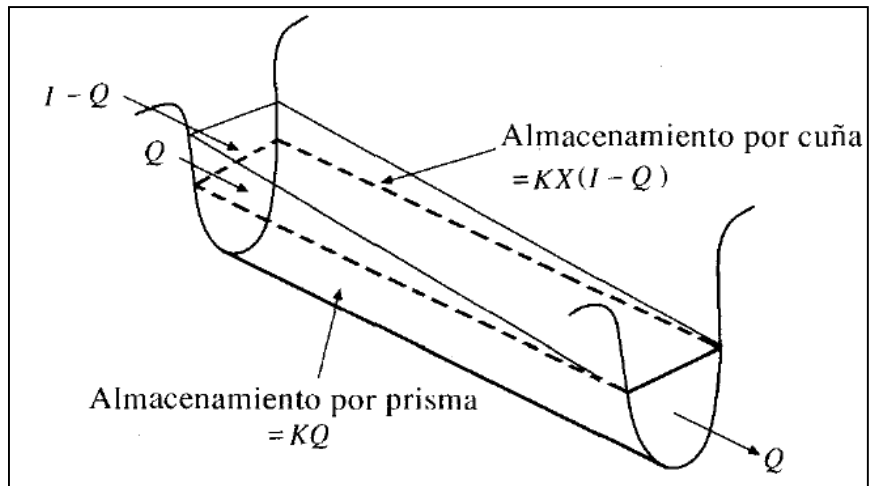
Figura 3.1 Hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos. (a) adimensional y (b) unitario triangular.

3.5 Método de Muskingum

El método de Muskingum es un procedimiento de tránsito hidrológico que se emplea para manejar relaciones variables de caudal-almacenamiento. Este método modela la regulación volumétrica de una creciente en un tramo de río mediante la geometría de una cuña y un prisma. Durante el avance de la onda creciente, el caudal de entrada es mayor que el de salida y corresponde a un almacenamiento de cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor al de

entrada, a manera de cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento definido por el tramo de río, supuesto canal prismático, de longitud y sección transversal constante con respecto a la distancia (ver detalles en la Fuente: (Quevedo, 2013)

Figura 3.2).



Fuente: (Quevedo, 2013)

Figura 3.2 Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de canal.

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento “por prisma” es igual a KQ donde K es un coeficiente de proporcionalidad; en tanto que el volumen “por cuña” es igual a $KX(1-Q)$, siendo X un factor de ponderación. El almacenamiento total es por tanto la suma de sus dos componentes:

$$S = KQ + KX(I - Q) \tag{3.18}$$

la cual puede reordenarse como:

$$S = K[X \cdot I + (1 - X)Q] \tag{3.19}$$

que representa un modelo lineal para el tránsito de avenidas.

El valor de X esta en función de la forma de almacenamiento, y varía desde 0 para uno de tipo embalse hasta 0.5 para una cuña completamente desarrollada en un cauce (Chow *et al.*, 1994). Cuando $X = 0$, no existe cuña y por tanto no se forma curva de remanso. En corrientes naturales, X se encuentra entre 0 y 0.3 con un valor medio cercano a 0.2. El parámetro K es el tiempo de tránsito de una onda de creciente a través del tramo de cauce. Para el tránsito hidrológico, de hecho, los valores de X y K se definen de antemano y suponen constantes durante todo el escurrimiento.

Los valores de almacenamiento en los tiempos $j \cdot \Delta t$ y $(j + 1) \cdot \Delta t$, para determinado intervalo de tiempo Δt , se pueden escribir como:

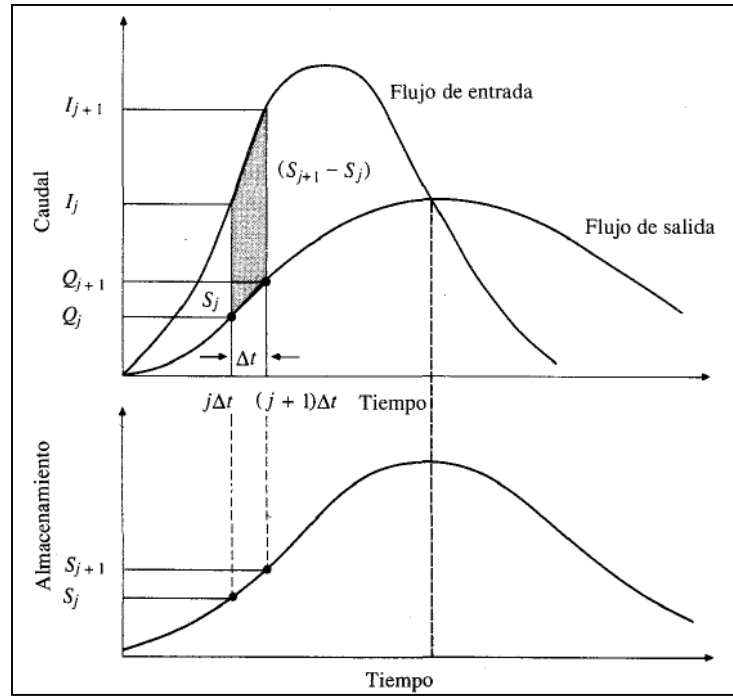
$$S_j = K [X I_j + (1 - X) Q_j] \quad (3.20)$$

$$S_{j+1} = K [X I_{j+1} + (1 - X) Q_{j+1}] \quad (3.21)$$

De acuerdo con tales ecuaciones, el cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo señalado resulta:

$$S_{j+1} - S_j = K \{ [X I_{j+1} + (1 - X) Q_{j+1}] - [X I_j + (1 - X) Q_j] \} \quad (3.22)$$

Si la variación entre caudales de entrada y de salida durante el intervalo es aproximadamente lineal, el cambio de almacenamiento puede escribirse como:



Fuente: (Quevedo, 2013)

Figura 3.3 Cambio de almacenamiento durante un periodo de tránsito Δt .

$$S_{j+1} - S_j = \frac{I_j + I_{j+1}}{2} \Delta t - \frac{Q_j + Q_{j+1}}{2} \Delta t \quad (3.23)$$

Al combinar las ecuaciones (3.22) y (3.23) y simplificar, se obtiene:

$$Q_{j+1} = C_{M1} I_{j+1} + C_{M2} I_j + C_{M3} Q_j \quad (3.24)$$

que es la ecuación de tránsito para el método de Muskingum, donde:

$$C_{M1} = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (3.25)$$

$$C_{M2} = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (3.26)$$

$$C_{M3} = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (3.27)$$

Nótese, por cierto, que $C_{M1} + C_{M2} + C_{M3} = 1$.

Si se cuenta con hidrogramas de entrada y salida observados en un tramo de río, se pueden determinar los valores de K y X . Suponiendo varios valores de X , por ejemplo, y utilizando datos conocidos de caudal de entrada y salida, se pueden calcular valores sucesivos del segundo parámetro mediante la siguiente expresión, deducida de las ecuaciones anteriores:

$$K = \frac{0.5\Delta t \left[(I_{j+1} + I_j) - (Q_{j+1} + Q_j) \right]}{X(I_{j+1} + I_j) + (1 - X)(Q_{j+1} + Q_j)} \quad (3.28)$$

Un procedimiento conocido consiste en dibujar los valores del denominador en el eje horizontal y numerador en el eje vertical, obtenidos durante el cálculo de la ecuación (3.28) para cada intervalo de tiempo. Esto usualmente produce una gráfica en forma de bucle. El valor más adecuado de X es el que produce el bucle más estrecho, próximo a una sola línea; mientras el valor de K , conforme a (3.28), corresponde a la pendiente de esa línea. Como K se refiere al tiempo que le toma recorrer el río a la onda de creciente, su valor también se puede definir como la diferencia entre el tiempo de ocurrencia del gasto máximo observado a la salida y el tiempo de ocurrencia del pico a la entrada del cauce.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Información requerida

4.1.1 Topografía

Para iniciar con la zona de estudio, es de vital importancia contar con la información topográfica del lugar en cuestión. La configuración del terreno en tres dimensiones mediante los modelos digitales de elevación (MDE) constituye una herramienta importante para la simulación física de los escurrimientos en cuencas naturales y urbanas (Aranda, 2002), pues son ampliamente utilizados en la caracterización hidrológica. En Estados Unidos, por ejemplo, el *U.S. Geological Survey* y el *National Cartographic Information Center* disponen de una gran base de datos topográficos en formato *Raster*. En México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) cuenta también con una amplia información cartográfica en formato digital, generada a partir de planos en escala 1:250 000, 1:50 000 y recientemente, mediante cartografía LIDAR, en escala 1:10 000.

a) MDE del continuo de elevaciones mexicano (CEM 3.0)

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular, (<http://www.inegi.org.mx>). Ver Figura 4.1.

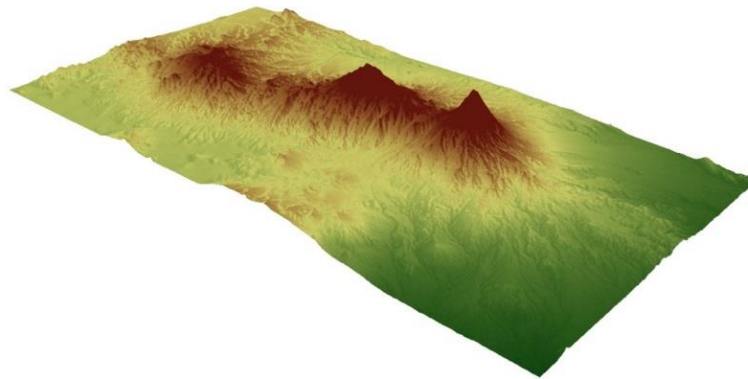


Figura 4.1 Modelo digital de elevaciones MDE.

Su objetivo es proporcionar un producto con representación continua que permita aportar datos consistentes y actualizados del relieve continental mexicano al Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente.

b) Características de MDE del continuo de elevaciones mexicano (CEM 3.0)

En la Tabla 4.1 se muestran las características del Modelo Digital de Elevaciones Continuo de Elevaciones Mexicano (MDE CEM 3.0).

Tabla 4.1 Características MDE CEM 3.0.

Características	Descripción
Año de publicación	2013
Resolución	15 m x 15 m
Valores de Z	Enteros positivos y negativos
Unidades de Z	Metros
Datos de referencia geodésica	El datum corresponde a ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80, coordenadas geográficas.
Cobertura geográfica	Territorio continental de los Estados Unidos Mexicanos
Error medio cuadrático	4.9 m
Medio de distribución	Principalmente por internet mediante el portal del INEGI. Considera diversas opciones.
Formato de distribución	BIL (Banda entrelazada por línea). Forma Raster.
Software utilizado para su generación	ArcGis 10.1

Para el proyecto de la tesina, se obtuvo un MDE de las zonas de estudio en el “sitio web” del INEGI, con una resolución de 15 m en el mallado reticular. El MDE representa un insumo topográfico necesario para determinar, entre otros: la delimitación de la cuenca en estudio, pendientes de terreno, red de drenaje, etc.

4.2 Zona de estudio

La elección de la zona de estudio, estuvo siempre relacionada a factores como la disponibilidad en cuanto a información pluviográfica e hidrométrica, además de otros aspectos como el problema de escala. En general se eligió una microcuenca con registro de precipitación y medición simultánea de escurrimiento en su cauce de salida.

4.2.1 Cuenca del río Mixcoac

La cuenca del río Mixcoac se localiza al suroeste de la cuenca del Valle de México de la que forma parte (Figura 4.2); tiene por coordenadas extremas los 99° 19' 56" y los 99° 14' 02" de longitud oeste y los 19° 15' 36" y los 19° 21' 02" de latitud norte; es decir, se encuentra comprendida dentro de los límites del Distrito Federal (Méndez *et al.*, 2011).

La línea de parteaguas que limita el área en cuestión, es común para las cuencas de los ríos: Tacubaya y Barranca Becerra, al norte; Magdalena, al sur; al este la divisoria es compartida con las barrancas de los Frailes y del Muerto y, por último, al oeste, con la del Río Hondo.

La magnitud y forma de la cuenca se manifiestan en la captación del volumen de agua durante la precipitación; por lo que corresponde a la pendiente, ésta puede favorecer o no la infiltración del agua llovida.

El río Mixcoac drena parte de la vertiente original de la Sierra de las Cruces, uno de los elementos que forman el sistema montañoso de la Sierra Volcánica Transversal. La Sierra de las Cruces se localiza al sur-oeste del Valle de México y presenta una orientación sureste-noroeste; los principales materiales geológicos que la constituyen son rocas de origen volcánico, tales como andesitas y traquitas que se presentan en forma de tobas con grandes fracturas y oquedades de diversos tamaños. En sus laderas existe material de acarreo que ha constituido depósitos de arenas y gravas sobre las cuales se acumularon cenizas que al consolidarse formaron brechas pomosas o tepetates.

La cuenca tiene una superficie de 31.5 km², y sus elevaciones van de los 3600 a los 2500 m de altitud (en su punto de salida) (Méndez *et al.*, 2011). En la Figura 4.2 se muestra la localización de la cuenca en estudio.

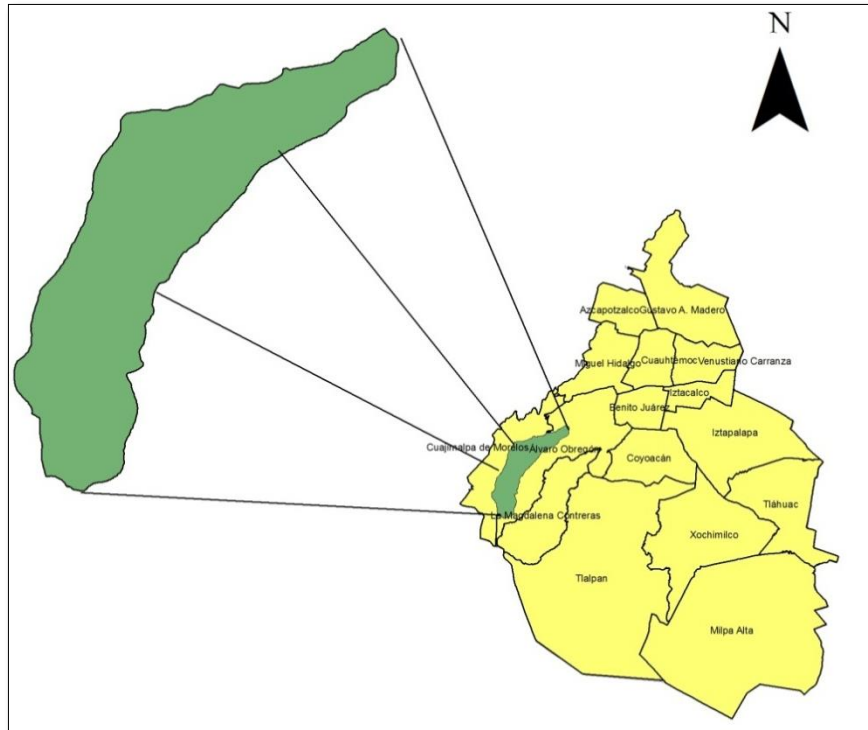


Figura 4.2 Localización de la cuenca del río Mixcoac.

El aspecto climático tiene gran significado, principalmente en cuanto a temperatura, ya que sus valores extremos afectan el proceso de evaporación, que es parte del ciclo hidrológico. En la cuenca predomina un clima semifrío, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 5 y 12 °C (Méndez *et al.*, 2011).

Con respecto al tipo de suelo, en la zona de estudio predomina el *feozem* (H), de permeabilidad media, conformado por arenas muy finas, limos y bastante arcilla; así como los *andosoles* (T), de alta permeabilidad, constituido por arenas con poco limo y arcilla. La cubierta vegetal, en su mayoría, es vegetación densa propia del bosque de oyamel, a excepción de la porción NE en donde el uso de suelo es urbano, pero con áreas importantes de agricultura de temporal.

El régimen pluviométrico anual varía entre 800 y 1500 mm. La distribución temporal de la lluvia destaca por un periodo húmedo que inicia en marzo, alcanza un máximo en julio y termina en noviembre. En cuanto a la distribución espacial, se aprecia una mayor cobertura para el rango de 800 a 1200 mm anuales (Méndez *et al.*, 2011).

4.3 Proyecto de cuenca

Un *proyecto de cuenca* se define al momento de elegir la zona de estudio. El primer paso consiste en obtener el modelo digital de elevación (MDE) del área y procesar los datos con la finalidad de obtener los llamados patrones de drenaje de la cuenca, esto mediante: el relleno o dragado de celdas bajas sin drenaje, la determinación de direcciones de flujo y acumulación celdas para el reconocimiento de cauces (dado cierto umbral de área mínima), delimitación de microcuencas asociadas a cada cauce y, finalmente, la obtención del parteaguas general y todas las áreas tributarias hasta la salida (o salidas) de la zona de estudio, (Quevedo, 2013).

Para el proyecto de tesina se hizo el vaciado de datos con el programa ArcGis© y enseguida con el programa HEC-GeoHMS©. A continuación se detalla el proceso de obtención del modelo de cuenca con ayuda del programa ArcGIS©:

El primer paso fue realizar la descarga del modelo digital de elevaciones con una resolución de 15m en el portal web de INEGI 2014. CEM 3.0, el cual se ilustra en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Descarga del MDE del sitio web INEGI, (CEM 3.0)

Una vez que se ha descargado el archivo del MDE se procedió a colocarlo en el directorio C:/riomixcoac y se extrae el contenido como se muestra en la Figura 4.4.

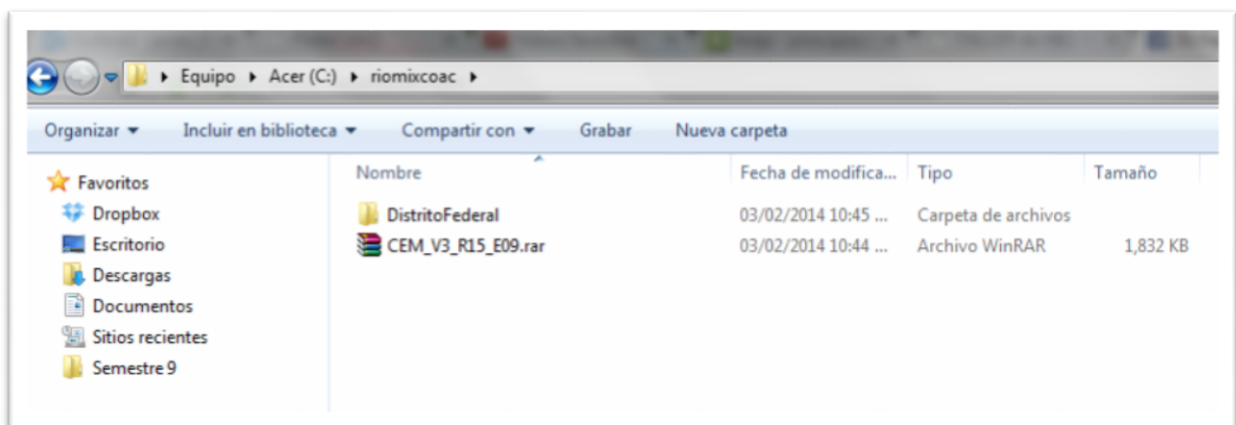




Figura 4.4 Base de datos MDE en directorio C.

Ahora se procede a abrir el archivo MDE con el programa ArcMap 10 para procesar la base de datos del Distrito Federal y obtener la cuenca en estudio, para ello se da de alta la carpeta que se creó "riomixcoac" para esto hacemos "click" en el ícono "Add Data",  que se encuentra en la barra de herramientas. Inmediatamente aparece un cuadro de diálogo, en el que se dio click en el ícono "Connect to folder" , para después seleccionar la carpeta C:\riomixcoac: como se observa en la Figura 4.5.

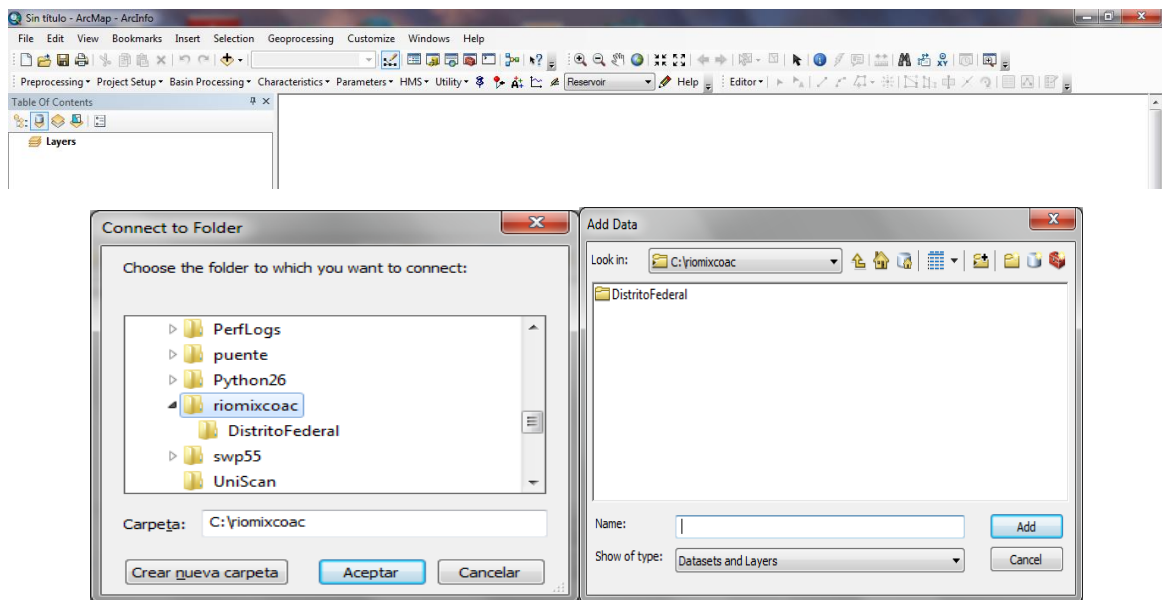


Figura 4.5 Anclaje de base de datos al programa ArcMap 10.

Una vez que se agregó la carpeta, se selecciona de la lista de carpetas, y dentro de ella se busca el archivo de nombre "DistritoFederal30_R15m.bil" y se abre, como se muestra en la Figura 4.6.

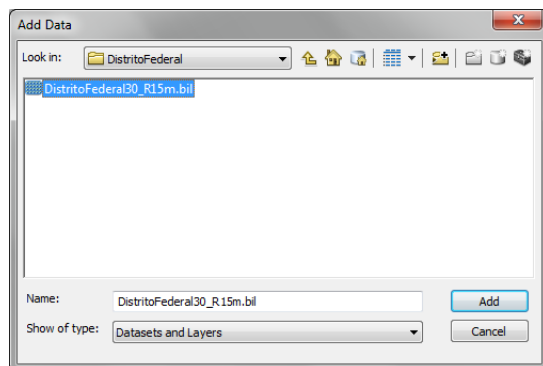


Figura 4.6 Apertura de base de datos del MDE.

Se generó un mensaje al que se hace “click” en “Yes”. Como se muestra en la Figura 4.7.

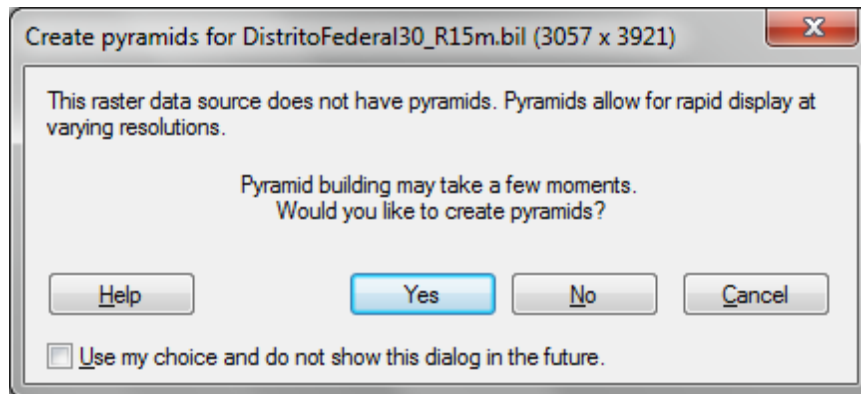


Figura 4.7 Mensaje del programa al abrir el MDE.

Realizado lo anterior se obtuvo en pantalla el MDE del Distrito Federal, se puede observar en la Figura 4.8.

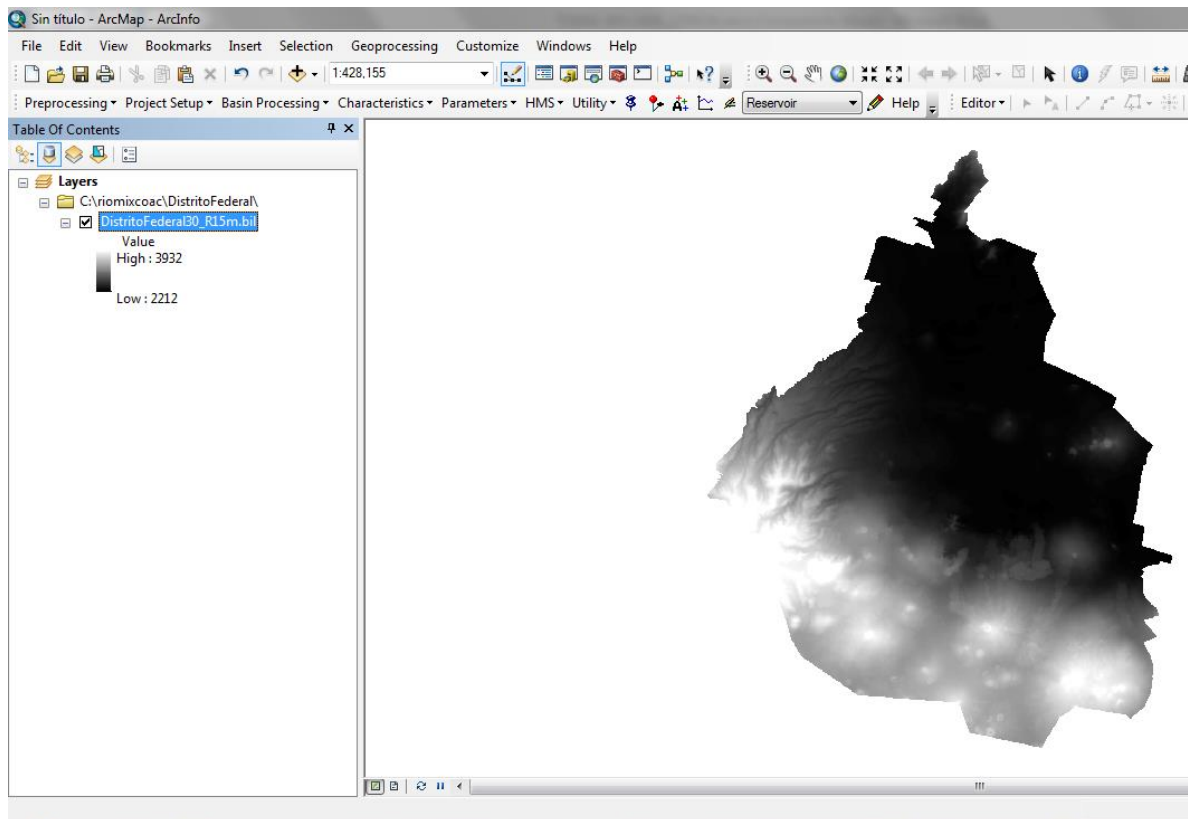


Figura 4.8 Representación del MDE con el programa ArcMap 10.

Una vez obtenido el MDE con el programa ArcMap ®, el siguiente paso que se hizo fue delimitar el polígono de estudio, es decir, en donde se encuentra la cuenca del Río Mixcoac; se procedió de la siguiente forma.

Utilizando el programa Google Earth ©, se obtuvieron las coordenadas aproximadas del polígono en el cual se encuentra la cuenca, como se muestra en la Figura 4.9. Estas coordenadas se encuentran en formato UTM.

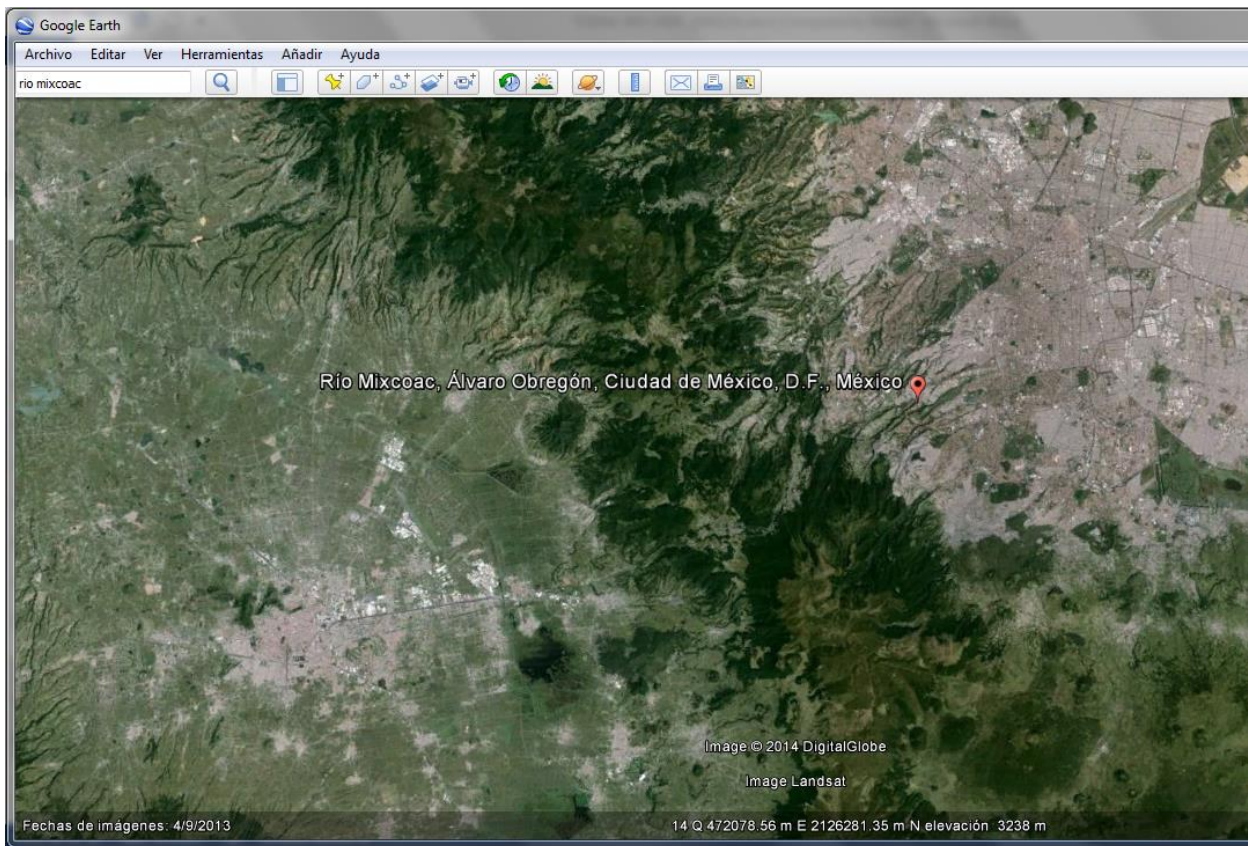


Figura 4.9 Obtención del polígono de estudio Google Earth ©.

Una vez que se tienen los puntos del polígono se procedió a transformar las coordenadas de UTM a geodésicas, utilizando el programa *tmcalc* proporcionado por el INEGI. Además de la zona geográfica UTM correspondiente al Distrito Federal (Ver Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12).



Figura 4.10 Programa TMCALC.

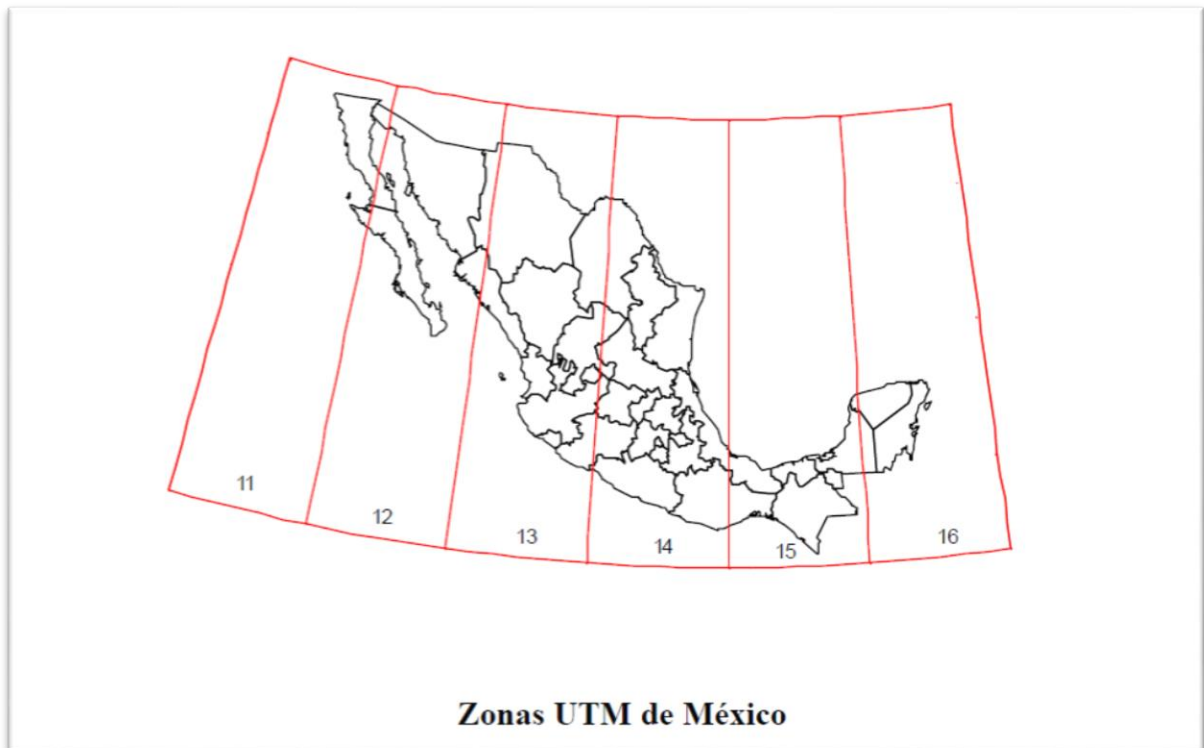


Figura 4.11 Zonas UTM de México (Zonas UTM para México y resto del mundo .

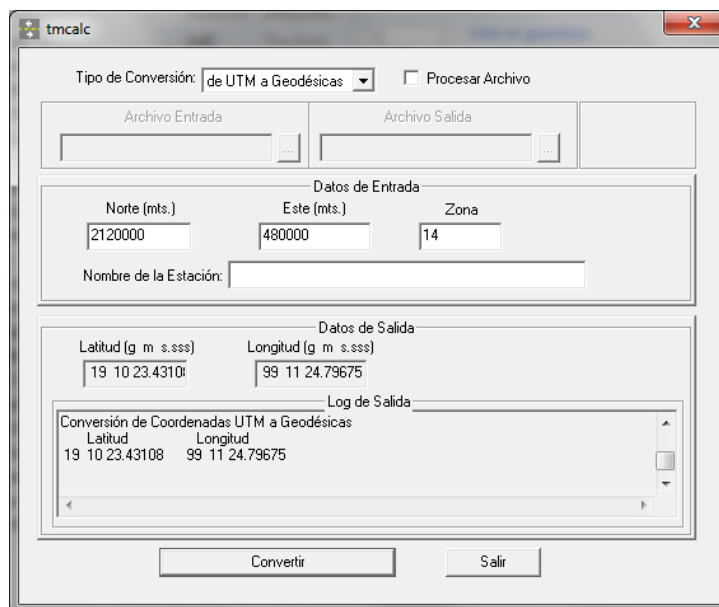


Figura 4.12 Conversión de coordenadas, programa TMCALC.

A continuación se muestra en la Tabla 4.2 los puntos del polígono en estudio.

Tabla 4.2 Puntos del polígono en estudio.

Punto	Este (X)	Norte (Y)	Longitud (λ)	Latitud (ϕ)
1	460000	2150000	99°22'51.8440"	19°26'38.3825"
2	480000	2150000	99°11'25.9262"	19°26'39.4629"
3	460000	2120000	99°22'49.5851"	19°10'22.3668"
4	480000	2120000	99°11'24.7967"	19°10'23.4310"

El paso siguiente consiste en recortar del MDE del Distrito Federal un cuadro que contenga el área de estudio (polígono en estudio); para ello se abre el “*ArcToolbox Window*”, como se muestra en la Figura 4.13.

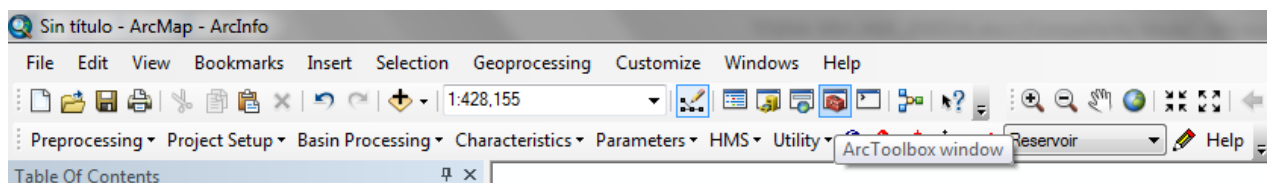


Figura 4.13 Localización de herramienta “*ArcToolbox Window*”.

En el “ArcToolbox window” se seleccionó *Data Management Tools/Raster/Raster Processing/Clip*, como se muestra en la Figura 4.14.

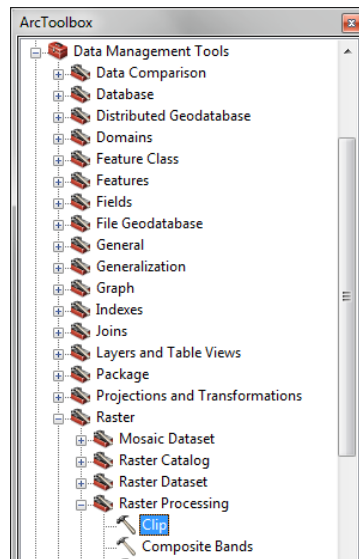


Figura 4.14 Localización de herramienta “*Raster Processing / Clip*”.

Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo, en el cual se introducen las coordenadas previamente transformadas en la Tabla 4.2, la entrada “input”, se elige el archivo MDE del Distrito federal, en las opciones para formar el rectángulo se introducen las coordenadas de cada extremo, y en la opción “*Output Raster Dataset*” se elige un nombre con el cual identificamos al polígono de estudio, en este caso se eligió *riomx*, ver Figura 4.15.

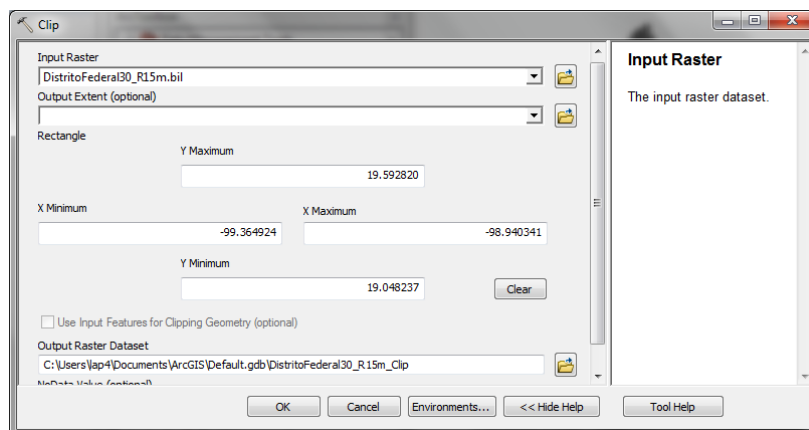


Figura 4.15 Localización de herramienta “*Raster Processing / Clip*”.

Una vez hecho el proceso del recorte del MDE, se obtienen dos *layers* en el cual uno corresponde al modelo del Distrito Federal, el otro corresponde al recorte del polígono en estudio, se visualiza en el panel izquierdo de la interfaz del programa, ver Figura 4.16.

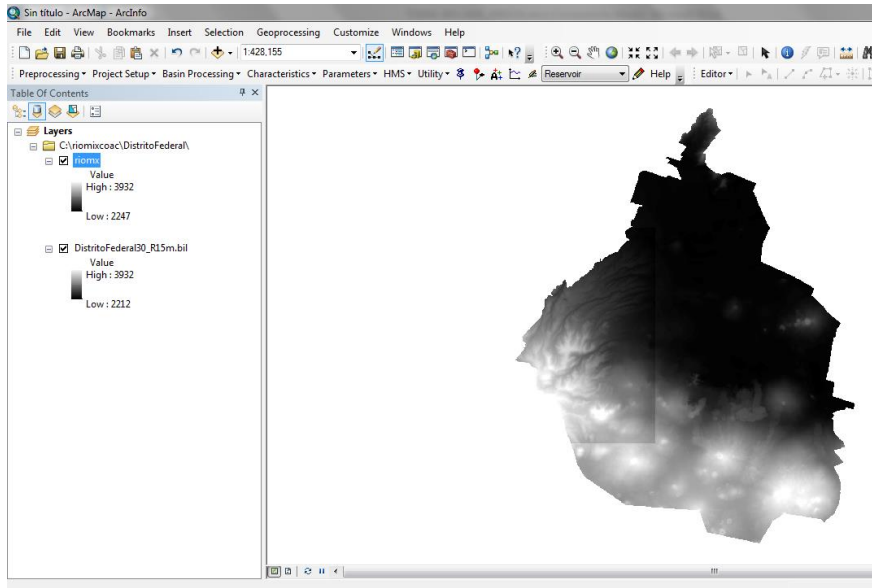


Figura 4.16 Visualización del *layer* “*riomx*”.

Ahora para visualizar se “apagó” la capa de nombre “*DistritoFederal30_R15m.bil*” dando un “*click*” en el cuadro que contiene una “*palomita*”, posteriormente se dio “*click*” derecho en la capa de “*riomx*” y se seleccionó la opción “*Zoom to Layer*”, como se observa en la Figura 4.17.

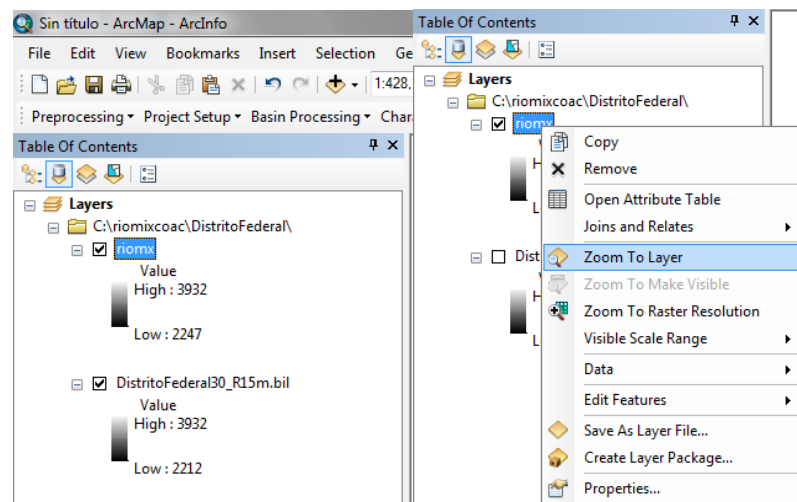


Figura 4.17 “*Zoom to Layer riomx*”.

Con lo anterior se obtiene la siguiente vista, ver Figura 4.18:

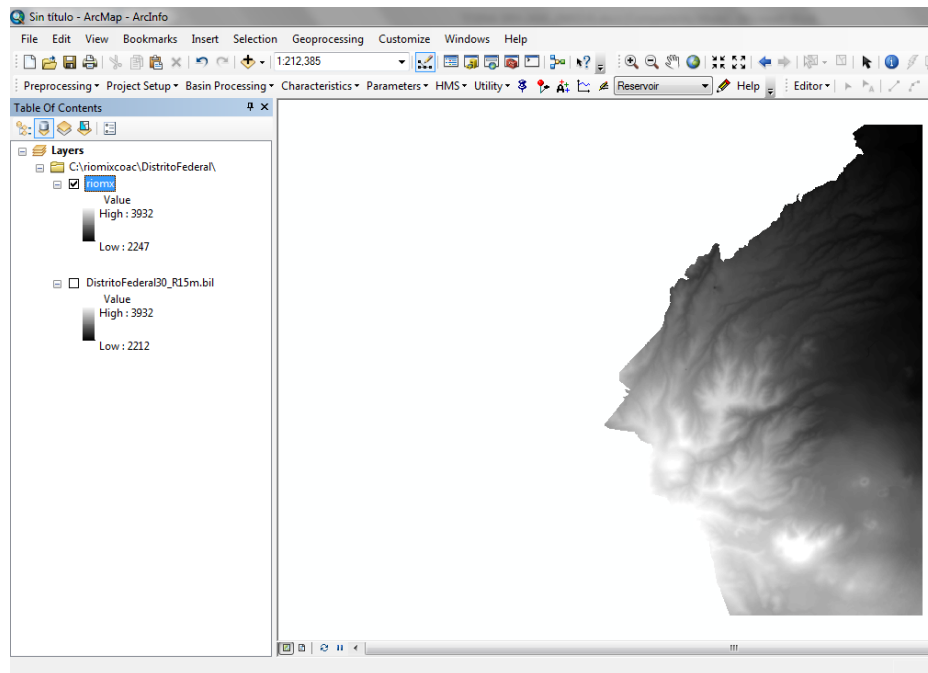


Figura 4.18 Visualización del layer “riomx”.

El paso siguiente fue cambiar el MDE de coordenadas geográficas a UTM (“*Universal Transversa de Mercator*”), en el “*ArcToolbox Window*” seleccionamos la opción de *Data Management Tools / Projections and Transformations / Raster / Project Raster*, como se observa en la Figura 4.19.

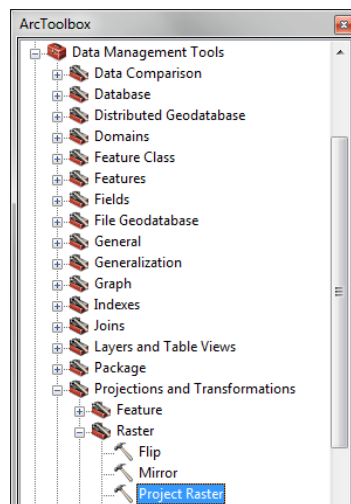


Figura 4.19 Herramienta para cambio de coordenadas.

A continuación se muestra el cuadro de dialogo, procediendo de esta forma:

Input Raster: Se selecciona el archivo de nombre *riomx*.

Output Raster Dataset: Se busca la carpeta de C:\riomixcoac\DistritoFederal y se introduce el nombre de *riomxUTM* en el campo “Name”.

Output Coordinate System: Para seleccionar el sistema de coordenadas se hace “click” en el ícono y nos aparece la siguiente ventana (Figura 4.20).

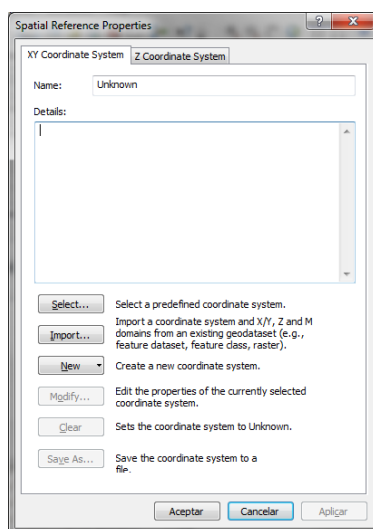


Figura 4.20 Herramienta para proyección de coordenadas.

Se hace “click” en “Select...” y seguimos la siguiente ruta:

Projected Coordinate Systems / UTM / WGS 1984 / Northern Hemisphere / WGS 1984 UTM Zone 14N.prj. Se hace “Add” y después “OK” (Figura 4.21).

Volviendo al cuadro de diálogo:

Geographic Transformation (optional): Seleccionamos primero ITRF_1992_ToITRF_2000_1 y después ITRF_2000_To_WGS_1984.

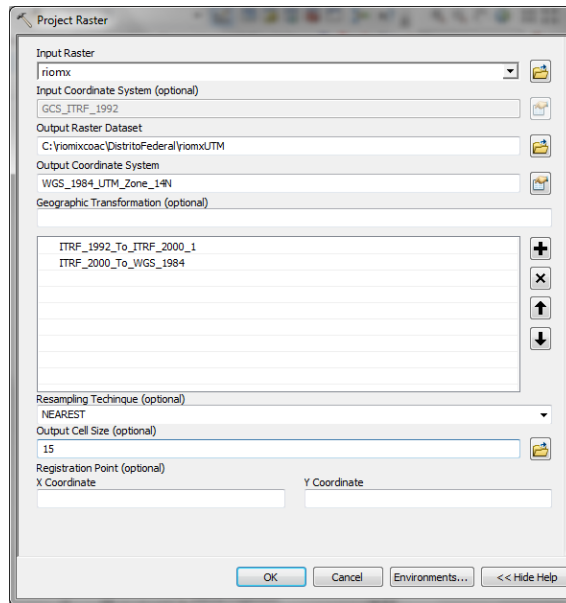


Figura 4.21 Cuadro de diálogo para proyección de coordenadas.

Se hace “click” en “OK” y con ello se obtuvo la proyección en coordenadas UTM de la zona de estudio, ver Figura 4.22.

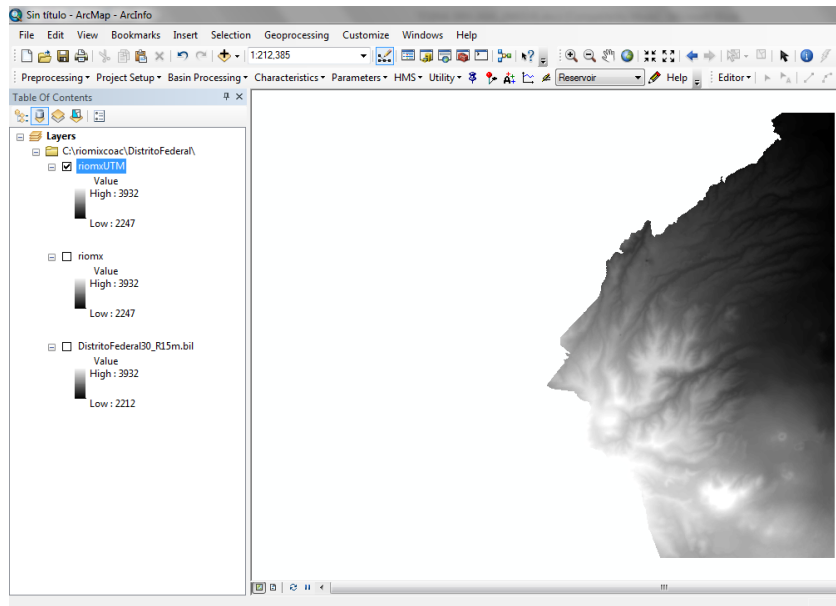


Figura 4.22 Proyección de coordenadas UTM.

El siguiente paso fue iniciar con el menú del programa “Geoprocessing” siguiendo la ruta *Geoprocessing options / enable / OK*, como se observa en la Figura 4.23.

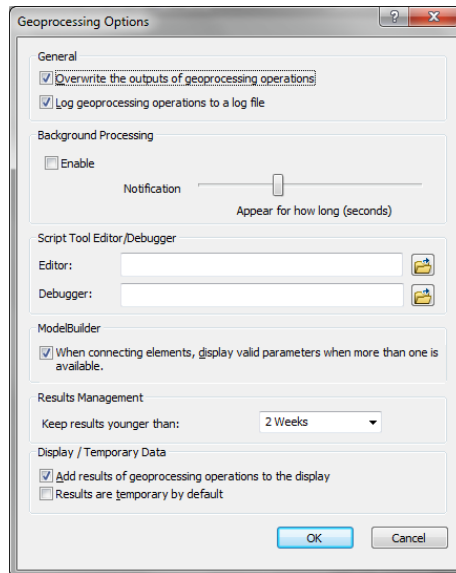


Figura 4.23 Condiciones para *Geoprocessing*.

La ruta que se hizo después de realizar lo anterior fue la siguiente:

File / New / Add data / riomxUTM y en seguida *File / Save / riomixcoac / proyectoriomx.mxd* esto para guardar el proyecto en la base de datos del programa y cada vez que se inicie abrir el archivo para trabajar, (Figura 4.24).

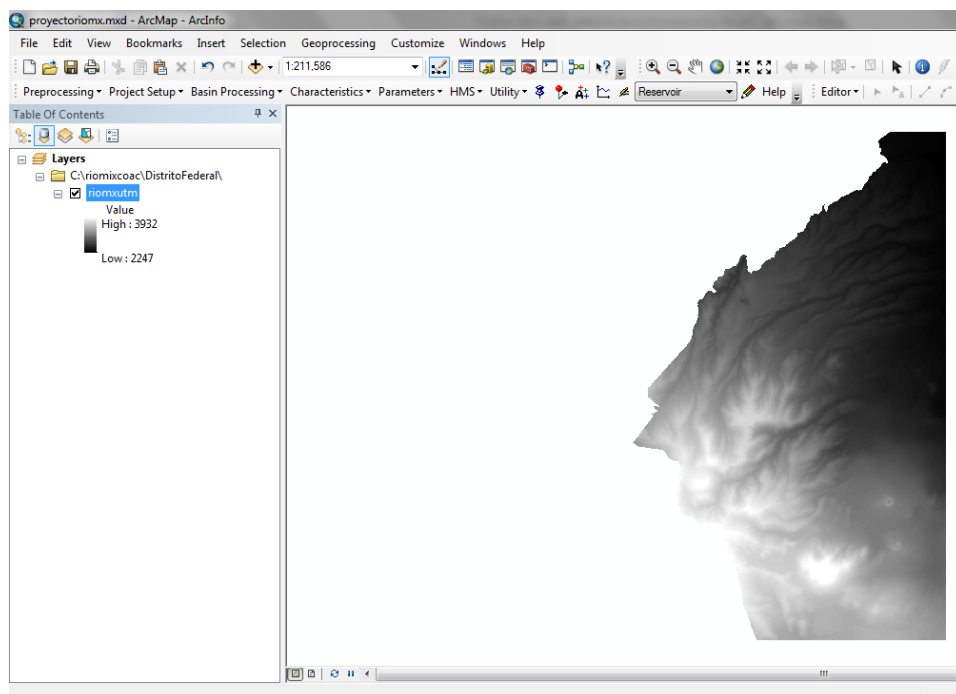


Figura 4.24 Polígono de estudio para procesamiento.

Una vez que se obtuvo el polígono de trabajo, se procedió a crear y nombrar cada componente de la cuenca en estudio, esto con ayuda del menú que contiene una serie de pestañas que sirven para procesar la información del MDE y localizar los puntos de entrada y salida de la cuenca, nombrar subcuencas, etc., ver Figura 4.25.

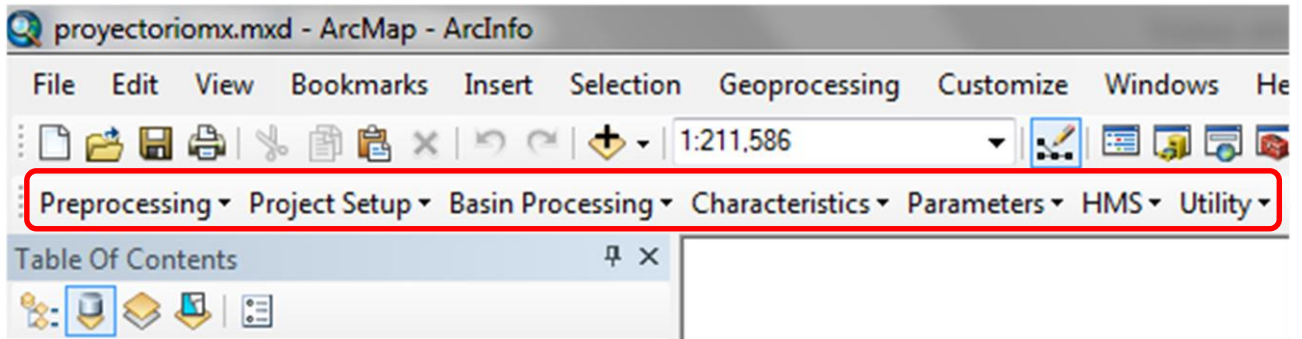


Figura 4.25 Submenú para procesamiento de MDE.

El primer paso consistió en encontrar las partes más bajas del MDE para delimitar los escurrimientos, de esta manera se ubicó también el punto de salida que más adelante se detalla.

La ruta a seguir fue: *Preprocessing / Fill Sinks* → *Input DEM: riomxutm / ok / close*

Cada procesamiento arroja una ventana en la cual se muestra si hubo errores o no, tal como se muestra en la Figura 4.26.

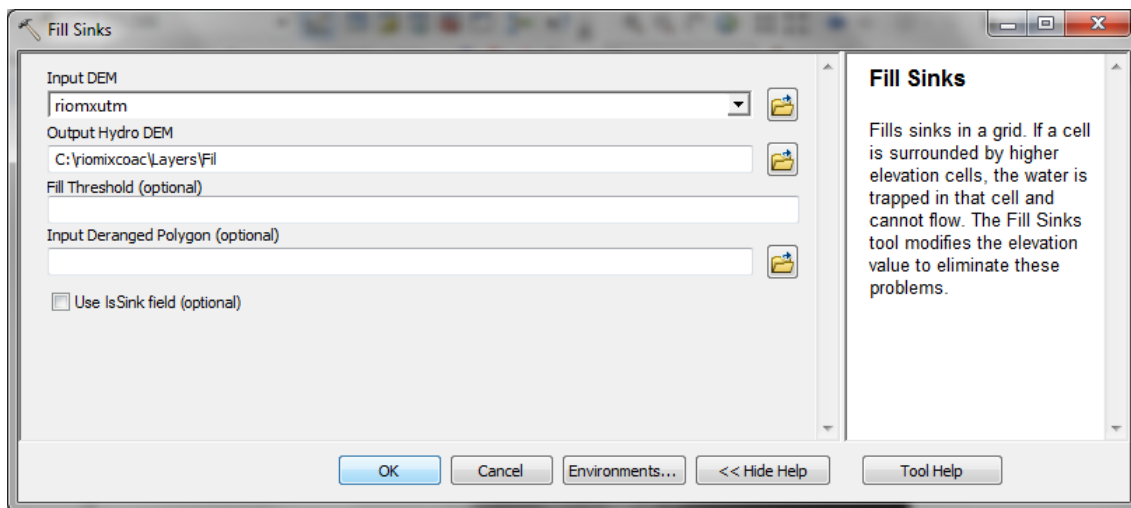


Figura 4.26 Submenú *Preprocessing / Fill Sinks*.

Una vez procesado el MDE se obtiene la siguiente capa o “Layer”, los cuales se van creando en el panel izquierdo de la interfaz del programa, además se muestra la profundidad mayor y menor que se encontró en el MDE, (Figura 4.27).

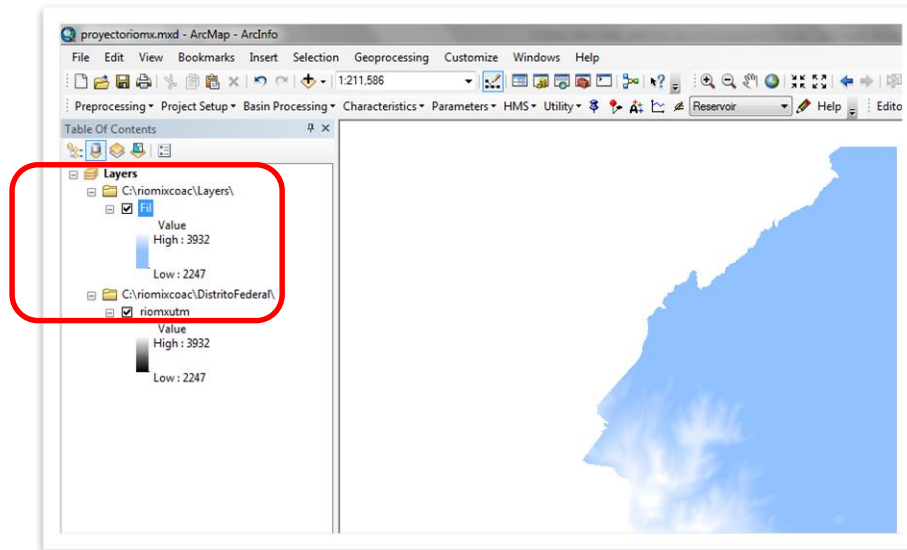


Figura 4.27 Submenú *Preprocessing / Fill Sinks*.

El siguiente paso fue definir la dirección del flujo para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing / Flow Direction* → *OK / close*. Lo que se observa en la Figura 4.28 es el submenú.

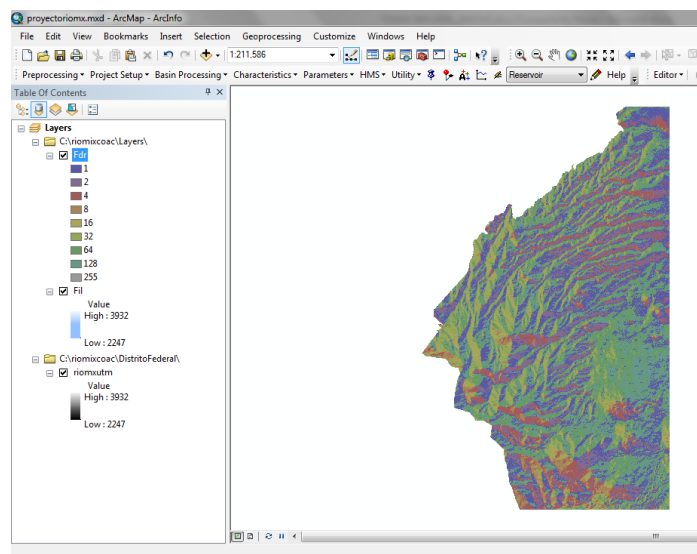


Figura 4.28 Submenú *Preprocessing / Flow Direction*.

El siguiente paso fue definir la acumulación del flujo para esto se siguieron los comandos: *Preprocessig / Flow Accumulation* → *OK / close*. Ver Figura 4.29.

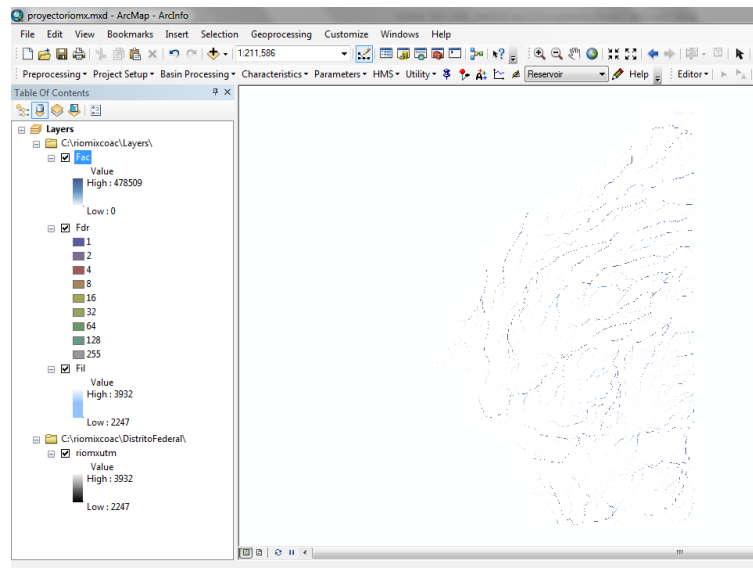


Figura 4.29 Submenú *Preprocessing / Flow Accumulation*.

El siguiente paso fue definir el umbral para los ríos, para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing / Stream Definition* → *Area SqKm to define stream: 1.5 / OK*. (Figura 4.30).

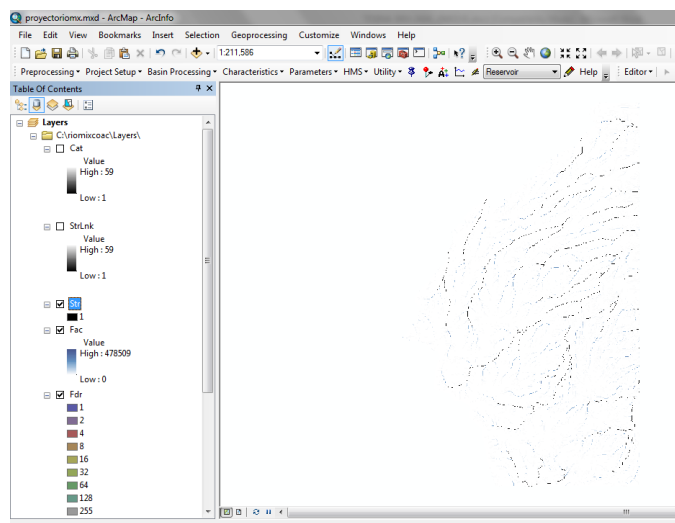


Figura 4.30 Submenú *Preprocessing / Stream Definition*.

El siguiente paso fue definir la fragmentación del flujo para los ríos, para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing / Stream Segmentation* → */ OK*. Tal como se observa en la Figura 4.31.

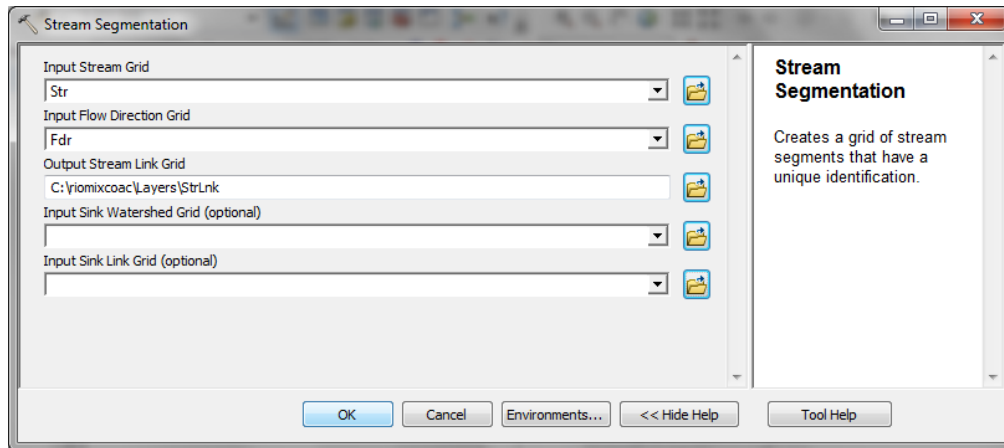


Figura 4.31 Submenú *Preprocessing / Stream Segmentation*.

El siguiente paso fue definir la separación del área de captación de flujo para los ríos, para esto se siguieron los comandos: *Preprocessig / Catchment Grid Delineation / Input Link Grid: StrLnk* → /OK. (Figura 4.32).

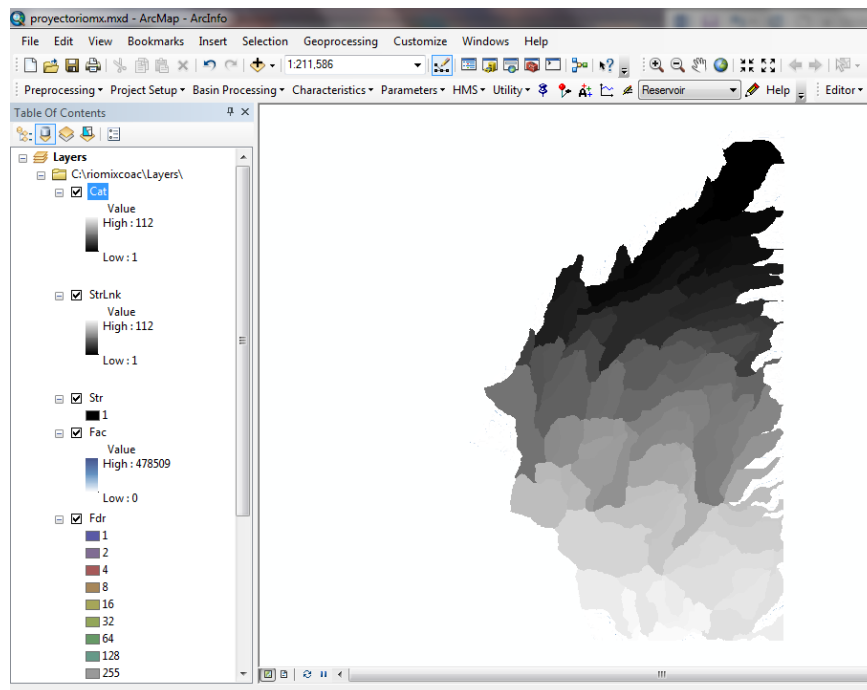


Figura 4.32 Submenú *Preprocessing / Catchment Grid Delineation*.

El siguiente paso fue convertir una rejilla de captación de entrada en una clase de entidad poligonal de captación., para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing / Catchment Polygon Processing* → /OK. Ver Figura 4.33.

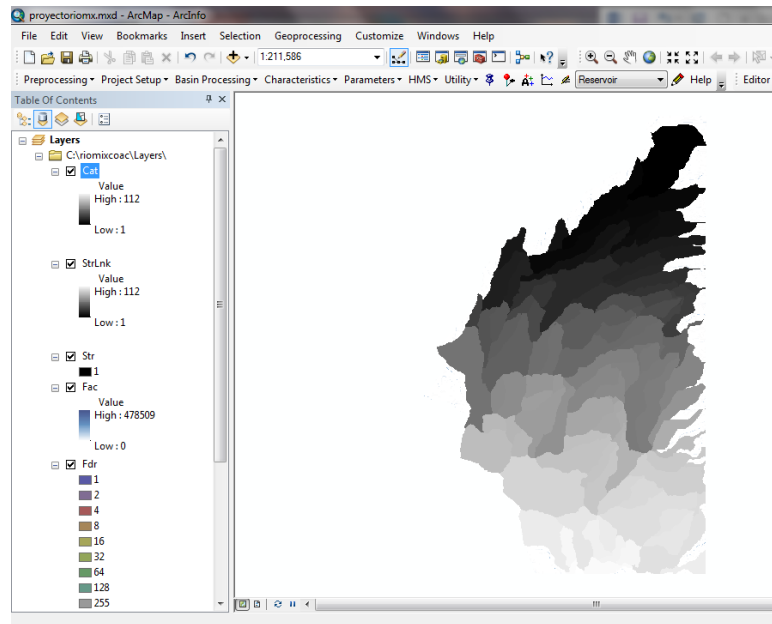


Figura 4.33 Submenú *Preprocessing* / *Catchment Polygon Processing*.

El siguiente paso fue convertir la red corriente de enlace de entrada en una clase de entidad línea de drenaje. Cada línea de la clase de entidad lleva el identificador de la cuenca en la que reside y cómo se conecta con sus características aguas abajo, para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing* / *Drainage Line Processing* → / *OK*. Ver Figura 4.34.

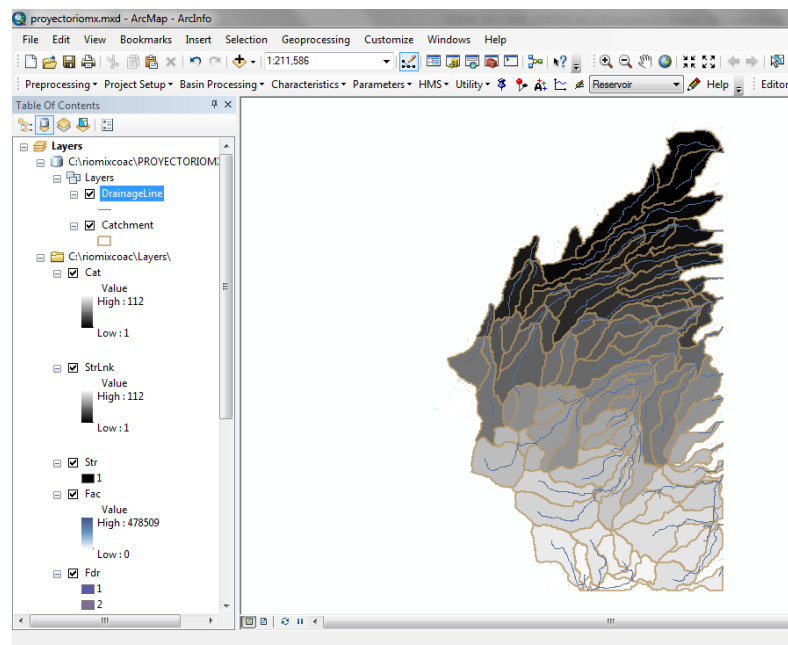


Figura 4.34 Submenú *Preprocessing* / *Drainage Line Processing*.

El siguiente paso fue generar una entidad que se utiliza para acelerar el proceso de delimitación de punto de cada subcuenca, para esto se siguieron los comandos: *Preprocessing / Adjoint Catchment Processing* → / *OK*. (Figura 4.35).

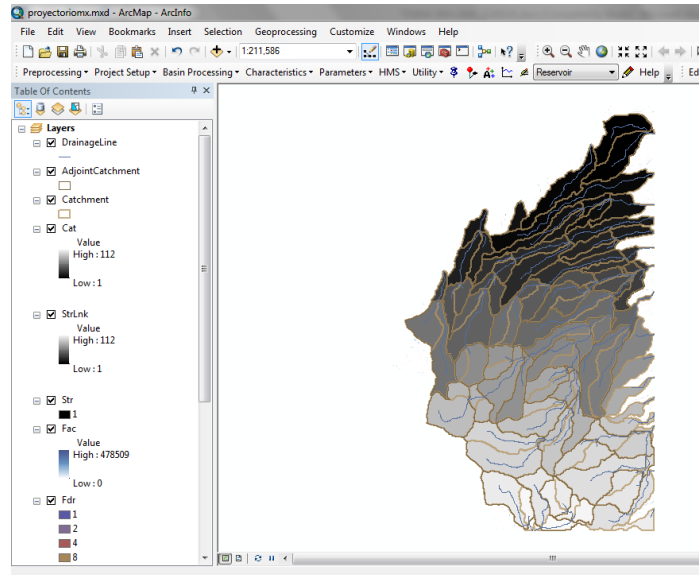


Figura 4.35 Submenú *Preprocessing / Adjoint Catchment Processing*.

El siguiente paso fue definir La Cuenca de Estudio, para ello se utilizó la ruta *Project Setup / Start New Project / OK*. Se utilizó el nombre de “*prorionmx*” en el espacio *Description*: proyecto rio Mixcoac y un paso muy importante es indicar dónde está el espacio *Project Data Location*: *Outside MainView Geodatabase*, ver Figura 4.36.

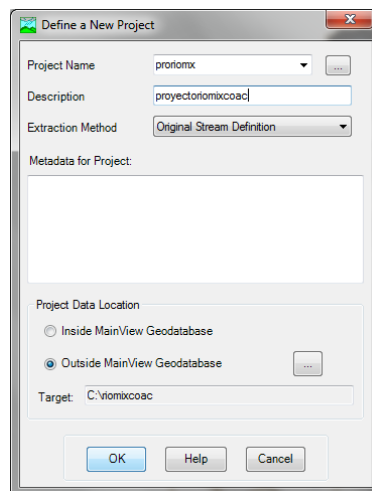


Figura 4.36 Definición de proyecto de estudio.

EL siguiente paso es uno de los más importantes y como se indica en la Figura 4.36, es el de indicar el punto de salida de la cuenca. Para ello se utilizaron las coordenadas que corresponden al nivel más bajo de la cuenca: **X: 474, 434.55 ; Y: 2' 140, 754.25**, para indicar el punto fue necesario el uso de la herramienta *Add Project Points*. El punto se localiza con el cursor lo más cercano posible, (Figura 4.37).

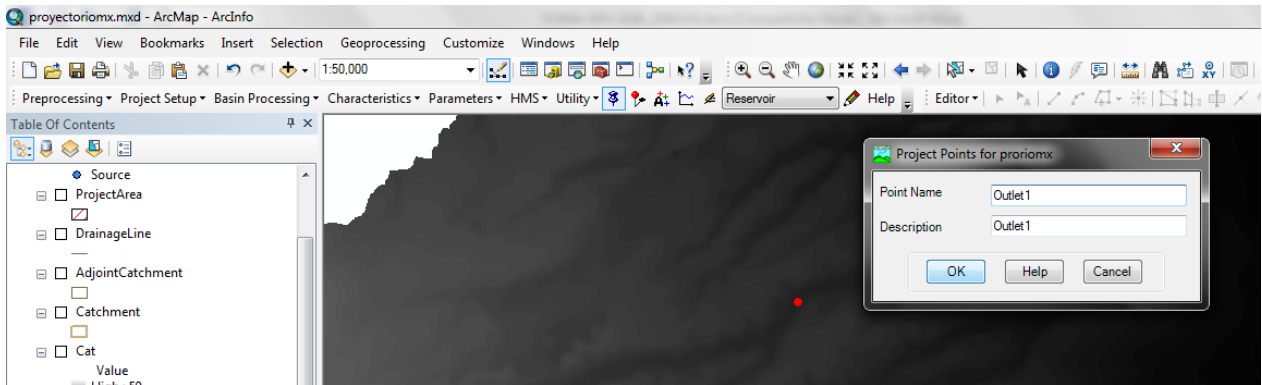


Figura 4.37 Ubicación del punto de salida.

Ahora el siguiente paso fue la secuencia: *Project Setup / Generate Project / Raw DEM: riomxutm / OK*, ver Figura 4.38.

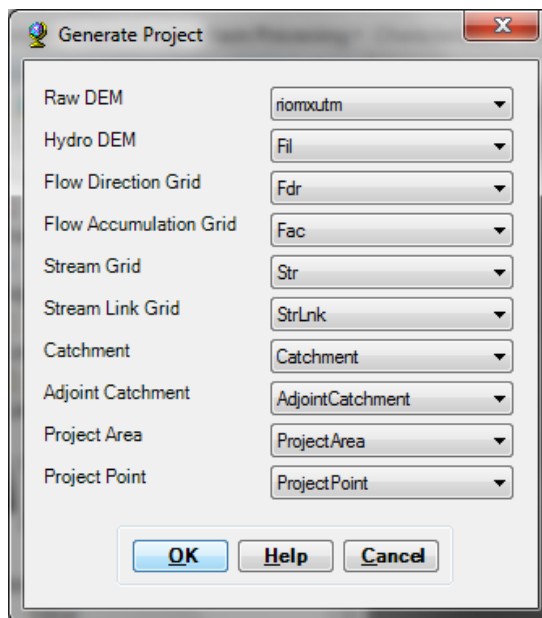


Figura 4.38 Generación de proyecto.

Al cuadro de dialogo siguiente se introduce en Ok para que genere el proyecto y se espera la creación del proyecto. Al finalizar se guarda el proyecto. Ver Figura 4.39.

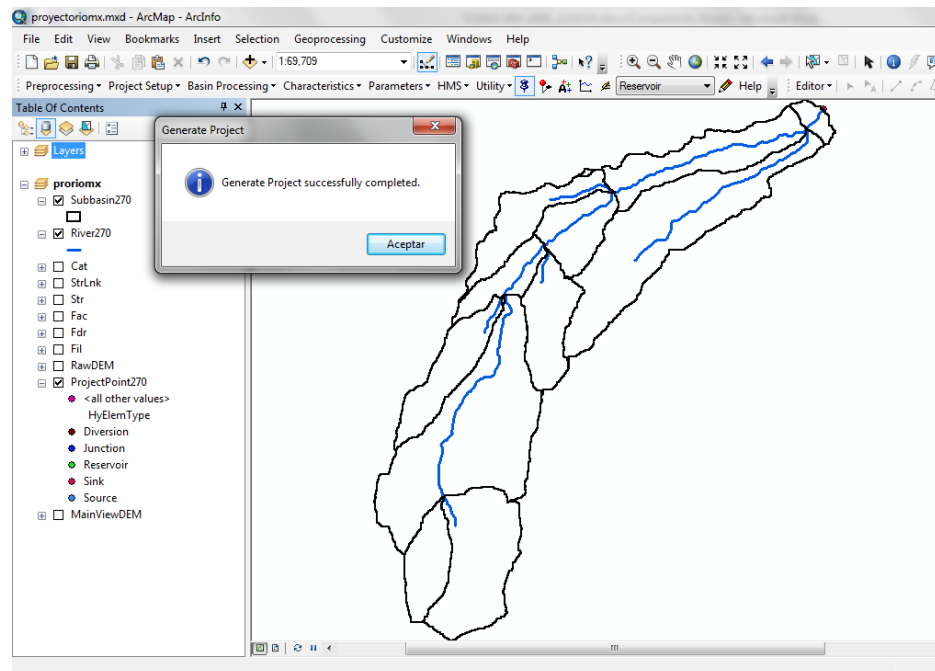
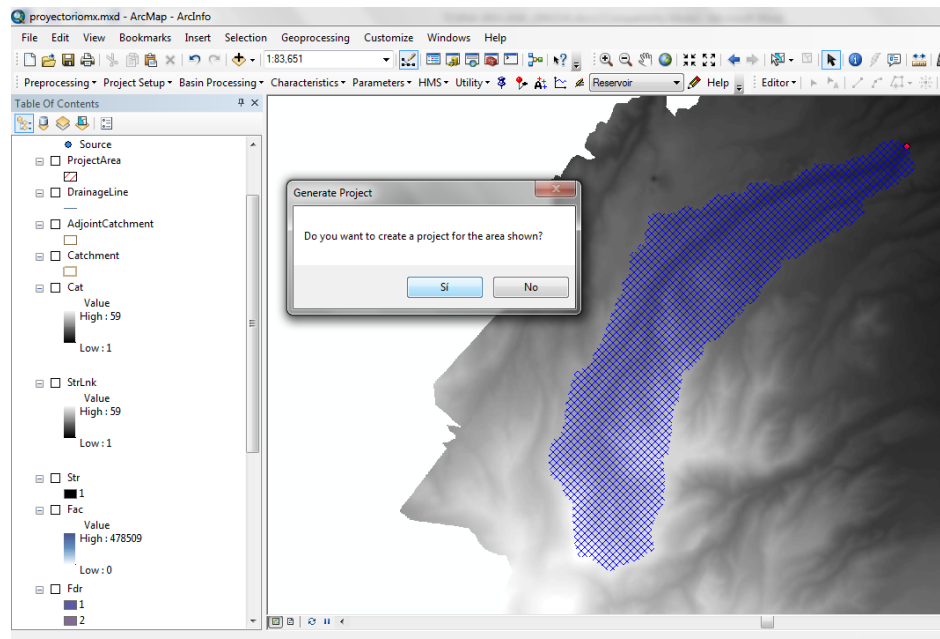


Figura 4.39 Generación de proyecto nuevo.

Nota: al dar “click” derecho sobre las capas, se puede explorar el contenido del mismo, mostrando sus características en tablas, selecciones, subcapas, etc.

Continuando con el submenú se utilizó la herramienta de “Characteristics”; dentro de este submenú se siguió la primer ruta *Characteristics/ River Length / OK*. La segunda ruta es *Characteristics/ River Slope / OK*. Se obtuvieron las características de longitud y pendiente del río principal. El paso siguiente fue obtener la pendiente de toda la cuenca, se utilizó la herramienta *ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Surface / Slope*, se elige dentro del submenú en *Input Raster: RawDEM*, en *Output measurement (optional)* se guarda dentro de la base de datos *PROYECTORIOMX.GBD* una capa con el nombre de *slope* ver Figura 4.40.

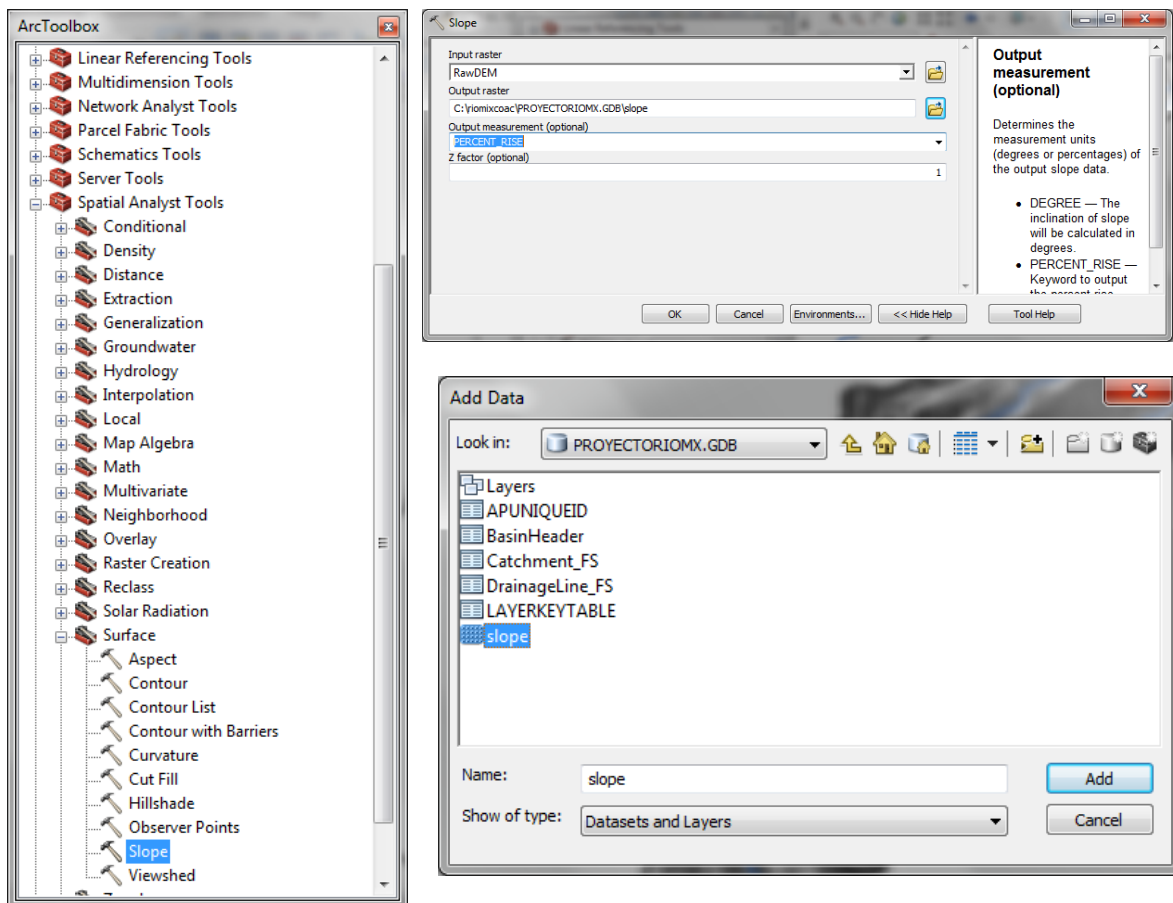


Figura 4.40 Obtención de la pendiente de la cuenca.

El resultado del procesamiento consiste en obtener con ayuda del programa, la pendiente de la cuenca para obtener ese dato como característica fisiográfica. Ver Figura 4.41.

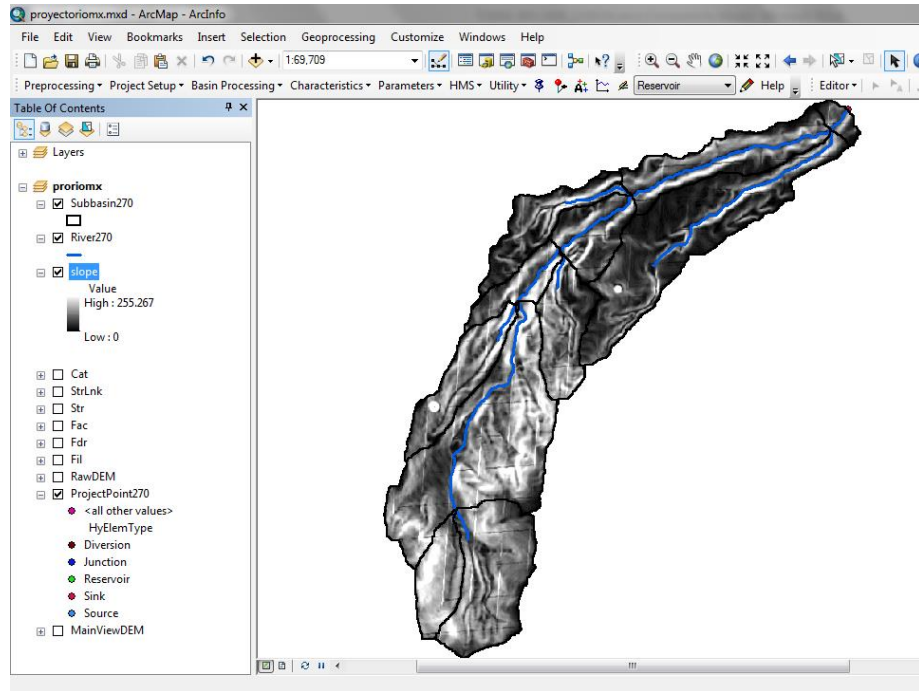


Figura 4.41 Pendiente de la cuenca.

Las siguientes características a procesar consisten en obtener la pendiente de cuenca, determinar el punto más alejado de la cuenca, el tiempo de concentración, el centroide de la cuenca y su elevación, y a partir de ese punto la distancia más alejada. Seguimos los siguientes comandos, ver Figura 4.42.

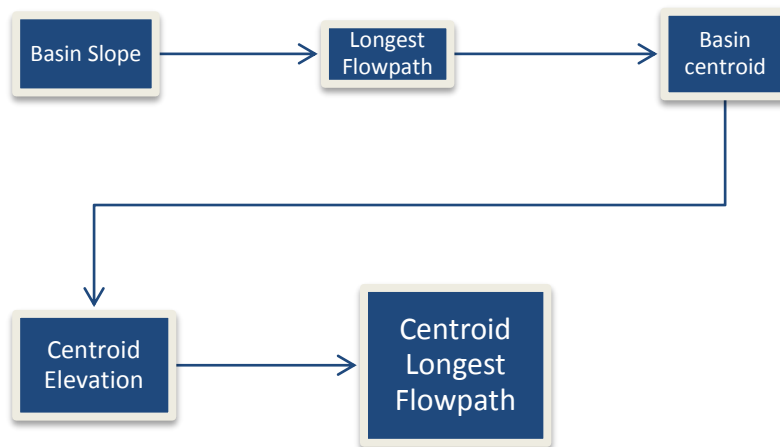


Figura 4.42 Características obtenidas de la cuenca.

El resultado del procesamiento se muestra en la Figura 4.43.

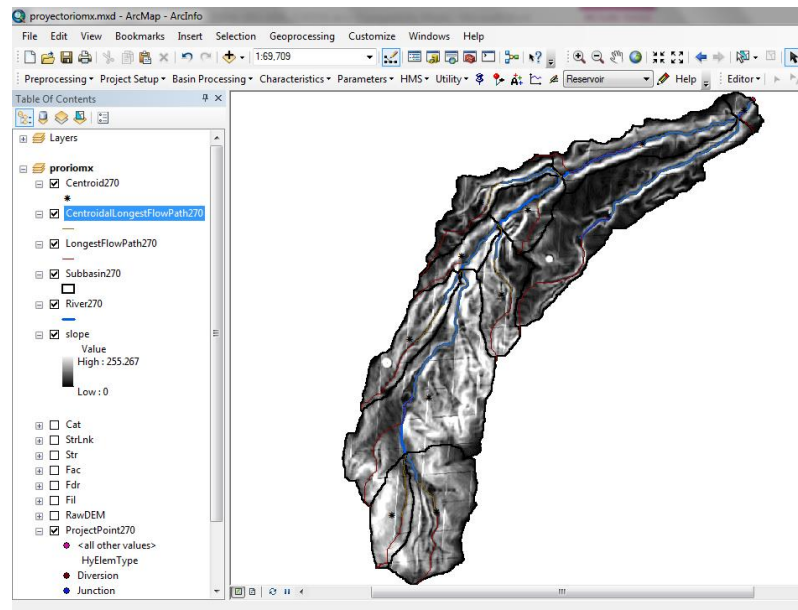


Figura 4.43 Características de la cuenca.

La siguiente etapa constituyó el uso de una base de datos de uso de suelo y vegetación obtenida en el INEGI. Esta base de datos se agregó al proyecto para después hacer un recorte y sólo obtener información de la cuenca en estudio, realizando ese corte posteriormente se hizo la unión de ambas capas de información para trabajar con un MDE.

Se procesó la información con esta serie de comandos, para uso de suelo y vegetación; para edafología, se agregaron ambas capas:

Add Data.... / PROYECTORIOMX.GDB / Layers / Project Area / Add /OK

Geoprocessing / Clip / Input: uso de suelo; Clip Features: Project Area; Output: PROYECTORIOMX.GDB name: usosuelo / OK

File / New / Don't save / OK

Add Data.... / PROYECTORIOMX.GDB / Layers / Project Area / Add /OK

Geoprocessing / Clip / Input: eda251mgw; Clip Features: Project Area; Output: PROYECTORIOMX.GDB name: edafologico / OK

El siguiente paso fue hacer la unión de cada base de datos procesada, mediante la herramienta *Geoprocessing / Union / Input: edafologico, usosuelo / Output Feature Class / PROYECTORIOMX.GDB name: ncurva / sabe / OK*. Ver Figura 4.44 y Figura 4.45 a, b.

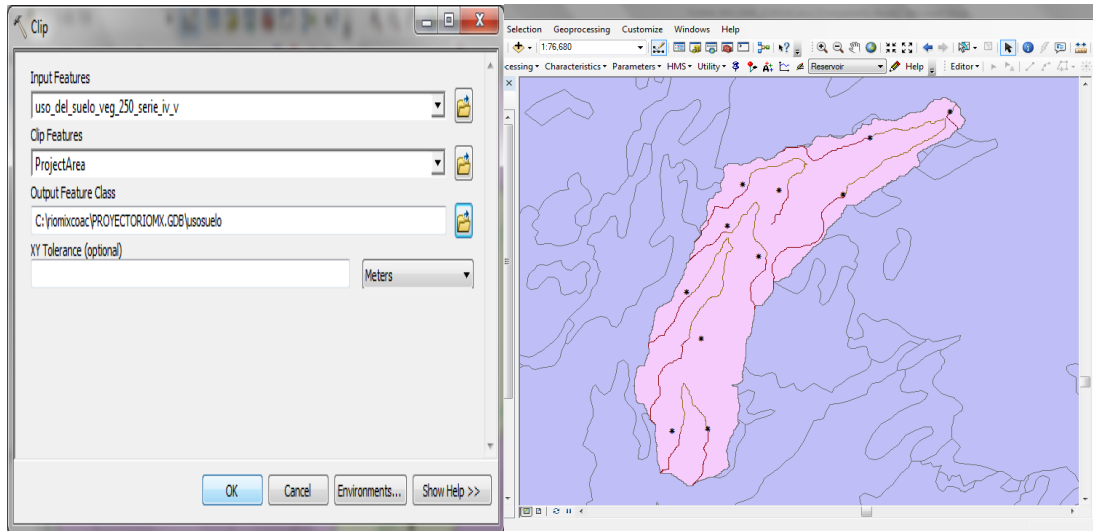


Figura 4.44 Recorte del uso de suelo y vegetación.

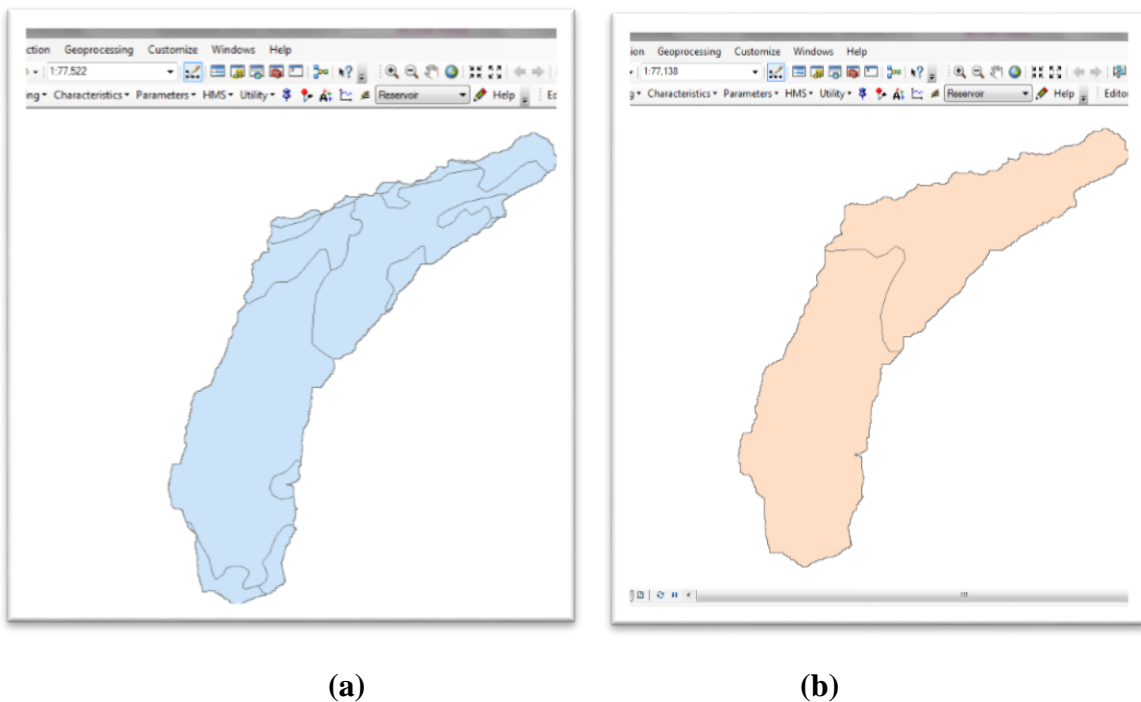


Figura 4.45 Unión de (a) usosuelo y edafológico = (b) ncurva de la cuenca.

Se realizó una tabla con los diferentes tipos de suelo encontrados (Ver 1.1A.2) y se asignaron valores según su clasificación hidrológica con base en tablas proporcionadas por INEGI, el procedimiento fue el siguiente ver Figura 4.46.

FASE_VEGS	DESC_VEGET	OTROS_SUEL	SHAPE_LENG	AREA_2	CODIGO_SUE	Shape_Le_1	Shape_Length	Shape_Area	DESCRIPCIO	TIPO_VEGET
NINGUNO	PRIMARIO	NO APLICABLE	6565.265819	3404895.9786	20104010400	12027.68689	0.038457	0.000047	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE PINO
NINGUNO	PRIMARIO	NO APLICABLE	8207.834049	84451365.155	20103010400	143504.850231	0.215853	0.001302	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE OYAMEL
NINGUNO	ANUAL	NO APLICABLE	0	10788565.4081	10101040103	29959.048507	0.025101	0.000012	ANDOSOL HUMIC	AGRICULTURA DE TEMPORAL
ARBUSTIVA	SECUNDARIO	NO APLICABLE	19499.42236	165647034.852	20104020600	255885.043047	0.10112	0.000114	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE PINO
NO DISPONIBLE	NO DISPONIBLE	NO APLICABLE	7952.973754	964949.8525	21302030300	4338.758474	0.043368	0.000051	ANDOSOL HUMIC	PASTIZAL INDUCIDO
NO APLICABLE	NO APLICABLE	ZONA URBANA	162548.287248	1074857768.27	30000000033	765467.708773	0.197242	0.000187	FEOZEM LUVICO	NO APLICABLE
NO APLICABLE	NO APLICABLE	ASENTAMIENTOS HUMANOS	28760.957802	632860.1276	30000000032	6302.165755	0.062903	0.000043	FEOZEM LUVICO	NO APLICABLE
ARBOREA	SECUNDARIO	NO APLICABLE	17237.659028	581478.2634	20201010500	4644.457127	0.044424	0.000043	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE ENCINO
NINGUNO	PRIMARIO	NO APLICABLE	6565.265819	3404895.9786	20104010400	12027.68689	0.076158	0.000157	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE PINO
NINGUNO	PRIMARIO	NO APLICABLE	8207.834049	84451365.155	20103010400	143504.850231	0.046429	0.000036	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE OYAMEL
NINGUNO	ANUAL	NO APLICABLE	0	8943880.3821	10101040103	29368.813793	0.030664	0.000031	FEOZEM LUVICO	AGRICULTURA DE TEMPORAL
NINGUNO	ANUAL	NO APLICABLE	0	10788565.4081	10101040103	29959.048507	0.225398	0.000686	FEOZEM LUVICO	AGRICULTURA DE TEMPORAL
PLANTACION FORE	PERMANENTE	NO APLICABLE	0	1227351.1413	10301030304	5422.828085	0.003253	0	FEOZEM LUVICO	BOSQUE CULTIVADO

Figura 4.46 Usos de suelo en la cuenca.

Para crear campos en la tabla mostrada en la Figura 4.46, se siguió la ruta:

Table options / Add Field / Name: TiposueH / Type: Text/ Length: 5 / OK

“Click” derecho / editor / Start editing / Colocar A or C / Editor / Save / Stop Editing.

Se agregan cuatro columnas tal y como esta: PctA, PctB, PctC, PctD: Type: Double. (Figura 4.47).

En cada columna agregada PctA, PctB, PctC y PctD, se le asignó el número 100 de acuerdo al tipo de uso de suelo conforme a su clasificación hidrológica.

Se agrega otro campo llamado *LandUse (short integer)*/ Ok. Y se le asignan los números del 1 al 13 correspondientes al uso de suelo. Ver Figura 4.48.

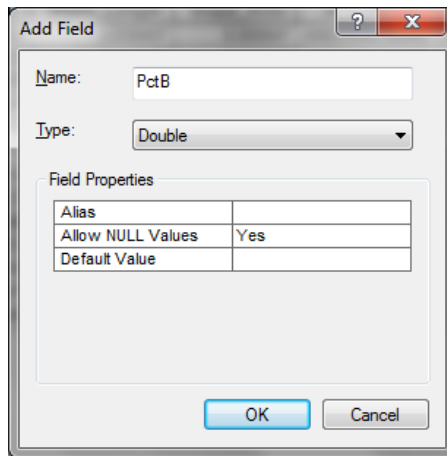
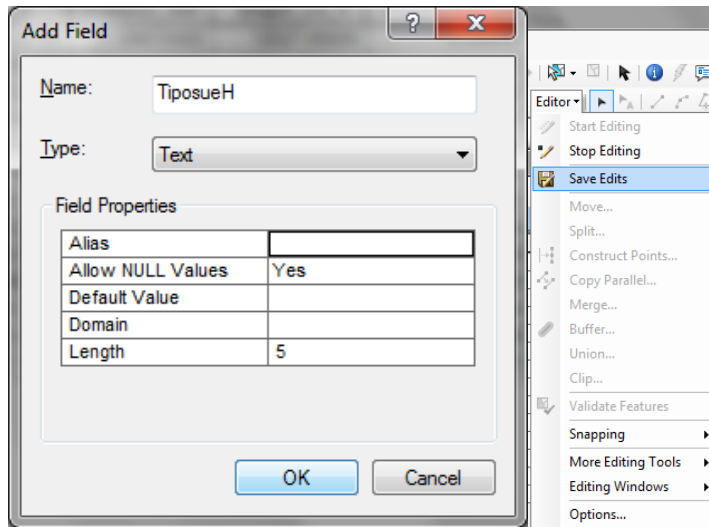
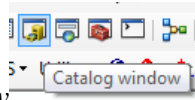


Figura 4.47 Edición de nuevas columnas.

Shape_Length	Shape_Area	DESCRIPCIO	TIPO_VEGET	TiposueH	PctA	PctB	PctC	PctD	LandUse
0.038457	0.000047	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE PINO	A	100	0	0	0	1
0.215853	0.001302	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE OYAMEL	A	100	0	0	0	2
0.025101	0.000012	ANDOSOL HUMIC	AGRICULTURA DE TEMPORAL	A	100	0	0	0	3
0.10112	0.000114	ANDOSOL HUMIC	BOSQUE DE PINO	A	100	0	0	0	4
0.043368	0.000051	ANDOSOL HUMIC	PASTIZAL INDUCIDO	A	100	0	0	0	5
0.197242	0.000187	FEOZEM LUVICO	NO APLICABLE	C	0	0	100	0	6
0.062903	0.000043	FEOZEM LUVICO	NO APLICABLE	C	0	0	100	0	7
0.044424	0.000043	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE ENCINO	C	0	0	100	0	8
0.076156	0.000157	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE PINO	C	0	0	100	0	9
0.046429	0.000036	FEOZEM LUVICO	BOSQUE DE OYAMEL	C	0	0	100	0	10
0.030664	0.000031	FEOZEM LUVICO	AGRICULTURA DE TEMPORAL	C	0	0	100	0	11
0.225396	0.000686	FEOZEM LUVICO	AGRICULTURA DE TEMPORAL	C	0	0	100	0	12
0.003253	0	FEOZEM LUVICO	BOSQUE CULTIVADO	C	0	0	100	0	13

Figura 4.48 Tabla con la clasificación de cada uso de suelo.

El siguiente paso es crear la tabla para cada tipo de vegetación encontrada en la cuenca. La ruta fue la siguiente:



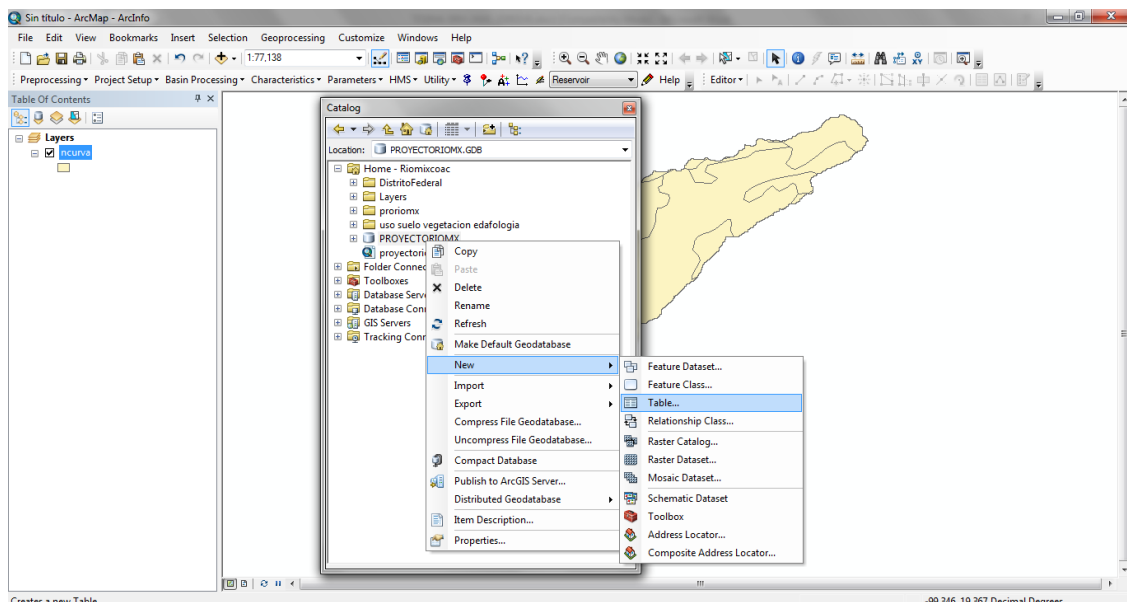
Catalog Window *Proyectoriomx* “click” derecho / *New* / *Table* / *Name: CNLookUp* / *OK* / *OK*.

“Click” derecho / Abrir la tabla creada / Add Field /

1. LUValue (short)
2. Description (text)
3. A (short)
4. B (short)
5. C (short)
6. D (short)

Editor / *Start Editing* / *CNLookUp*. Se asignan los valores correspondientes a su condición hidrológica, los cuales se pueden observar en el Anexo 92.

Editor / *Save* / *Stop*. Esta asignación de valores correspondientes a su condición hidrológica, se puede observar en la Figura 4.49 derivada de los valores ingresados a la tabla.



OBJECTID *	LUVValue	Description	A	B	C	D
1	1	Bosque Pino (mala)	45	66	77	83
2	2	Bosque Oyamel (mala)	45	66	77	83
3	3	Agricultura Temporal (mala)	72	81	88	91
4	4	Bosque Pino (mala)	45	66	77	83
5	5	Pastizal Inducido (mala)	68	79	86	89
6	6	Zona Urbana (mala)	98	98	98	98
7	7	Asentamiento Urbano (mala)	98	98	98	98
8	8	Bosque Encino (mala)	45	66	77	83
9	9	Bosque Pino (mala)	45	66	77	83
10	10	Bosque Oyamel (mala)	45	66	77	83
11	11	Agricultura Temporal (mala)	72	81	88	91
12	12	Agricultura Temporal (mala)	72	81	88	91
13	13	Bosque Cultivado (mala)	45	66	77	83

Figura 4.49 Creación de tabla *CNLookUp*.

Para indicar al ArcMap [®] la asignación del tipo de suelo, se ejecuta la ruta siguiente, dentro del submenú:

Utility / Generate CNGrid

Input: RawDEM /

Input Soil Landuse Polygon: ncurva

Output Curve Number / OK. (Figura 4.50).

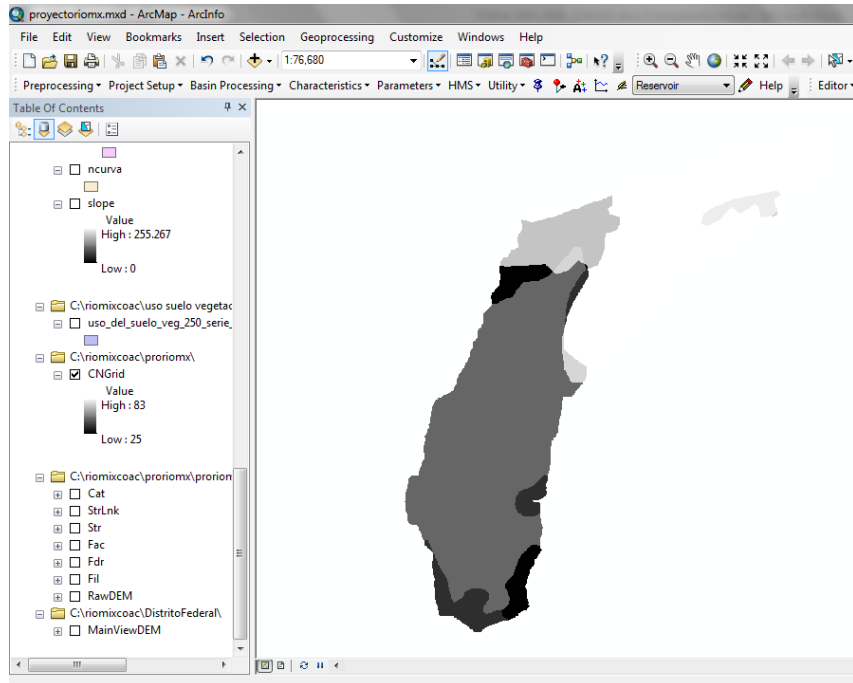


Figura 4.50 Creación de *CNgrid*.

La secuencia de comandos que sigue es:

Parameter / Select / HMS Processes

Loss: SCS

Transform: SCS

Base Flow: None.

River Routing (Muskingum) / OK. Ver Figura 4.51.

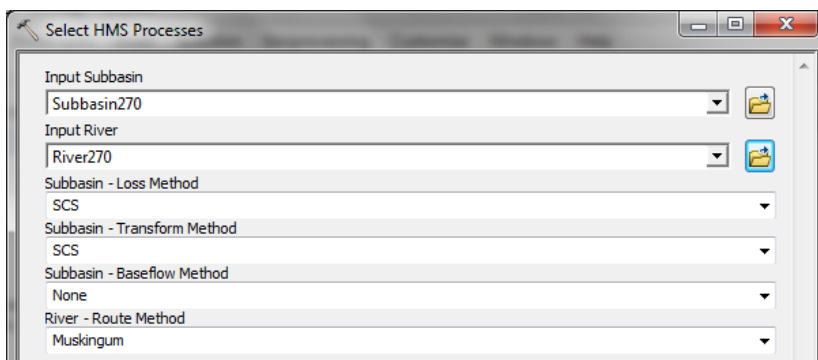


Figura 4.51 Selección de los métodos de cálculo.

La siguiente secuencia de comandos en *Parameters* fue:

River AutoName/ OK

Basin Autoname / OK

Subbasin Parameters from Raster:

Input Curve Number Grid /CNGrid / OK

CNLag / OK. La Figura 4.52 muestra algunos parámetros que se deben ajustar.

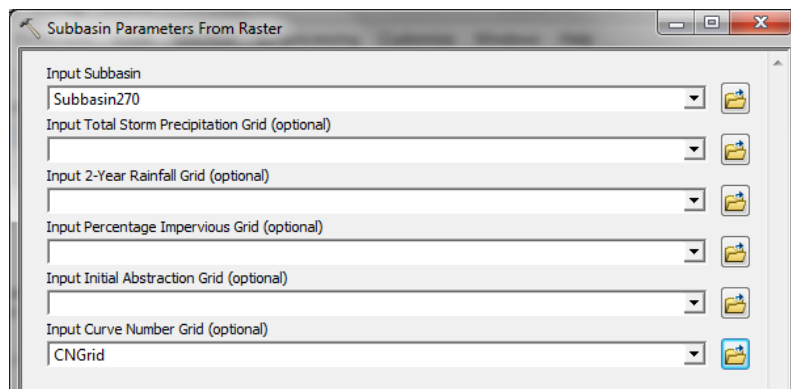


Figura 4.52 Generación de parámetros.

Los siguientes pasos corresponden a la penúltima etapa para la creación del modelo de cuenca que será exportado al programa HEC-HMS. En el submenú *HMS* seguimos la siguiente ruta:

Maps to Units: SI / OK

Check Data / OK. Nota si existen errores se repite el procedimiento de acuerdo al archivo de texto que se despliega, en este caso fue correcto y se puede observar en la Figura 4.53.

Schematic / OK / OK. (Figura 4.54 *Schematic process*.)

Toggle Legend / HMS Legend / OK. Ver Figura 4.55.

Add Coordinates / OK / OK

Prepare Data For Model Export / Yes

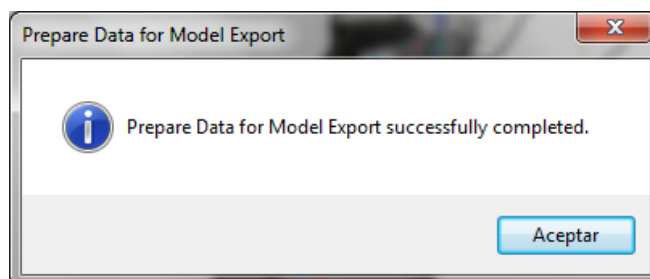


Figura 4.53 Mensaje del programa donde muestra que no hubo errores y se puede exportar exitosamente.

BackGround Shapefile / OK / OK

Basin Model File. Ver Figura 4.56.

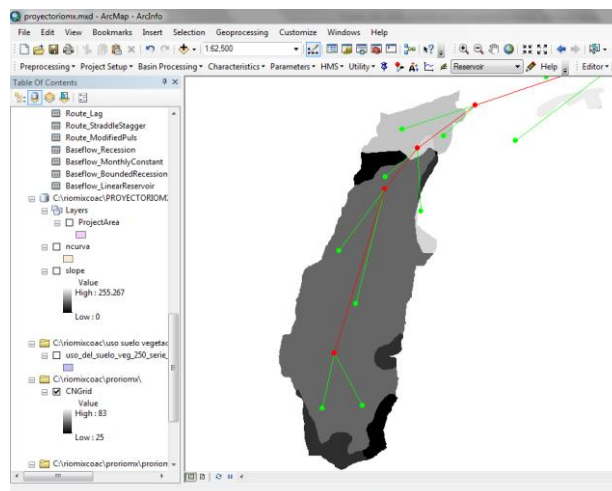


Figura 4.54 *Schematic process*.

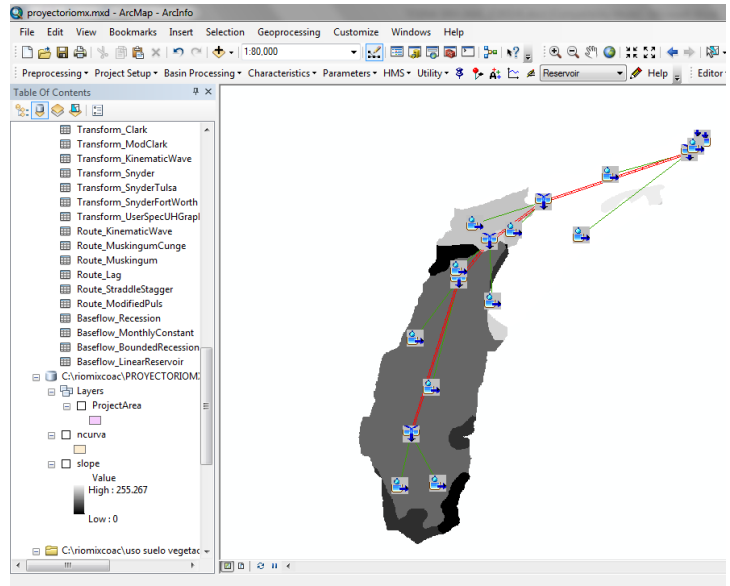


Figura 4.55 *HMS Legend.*

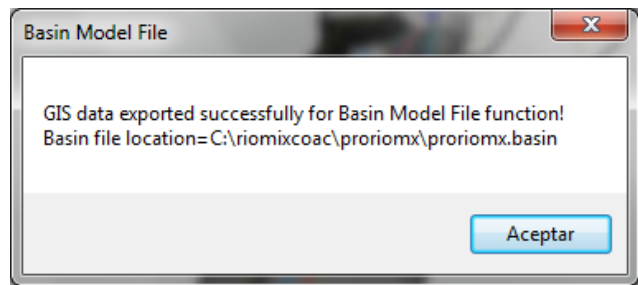


Figura 4.56 Modelo de cuenca creado satisfactoriamente.

4.4 Cálculo de hidrogramas con el programa HEC-HMS 3.5

Finalizado el proyecto de cuenca con el programa ArcMap 10. Se creó el archivo *.basin*. Este archivo contiene los datos para el procesamiento de precipitación en el programa HEC. La ruta que se sugiere es la siguiente:

Se creó un nuevo proyecto *File / New / Name: riomixcoac / Location: Documents / Default Unit System: Metric*

Una vez que se creó el proyecto se importó el archivo “*.basin*” mediante la ruta: *File / Import / Basin Model : proriomx.basin*.

Se agregó la forma de la cuenca como fondo, así como el de los ríos. Mediante la ruta: *View / Background Maps / Add / River / Subbasin*. Ver Figura 4.57.

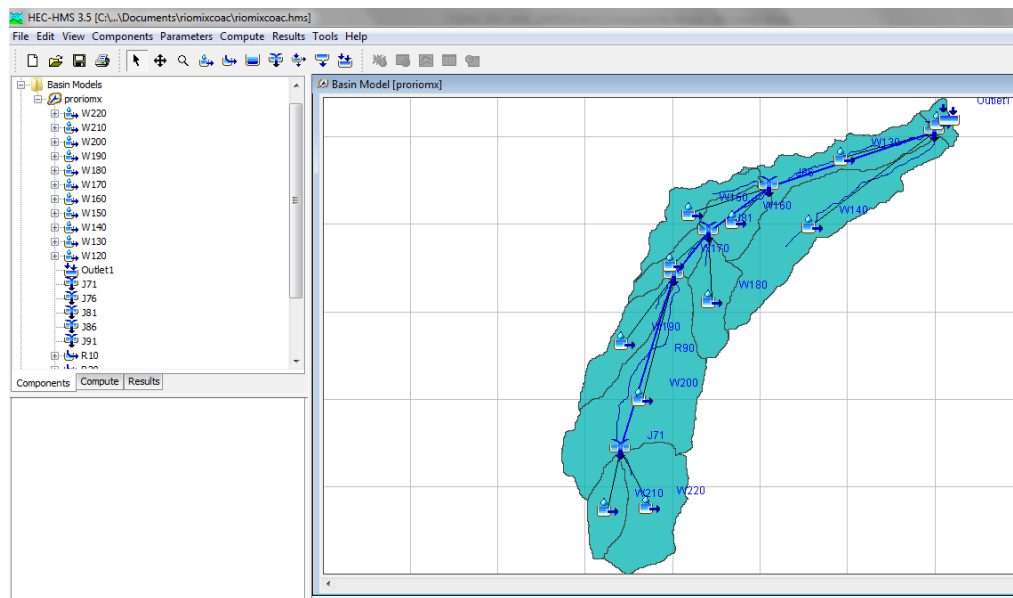


Figura 4.57 Cuenca y ríos en el programa HEC.

El siguiente paso es llevar a cabo la simulación de registro de precipitación mediante la creación del *Meteorologic Model Manager*, usando la ruta:

Menu/ Components / Meteorologic Model Manager / New / Create / Close. (Figura 4.58).

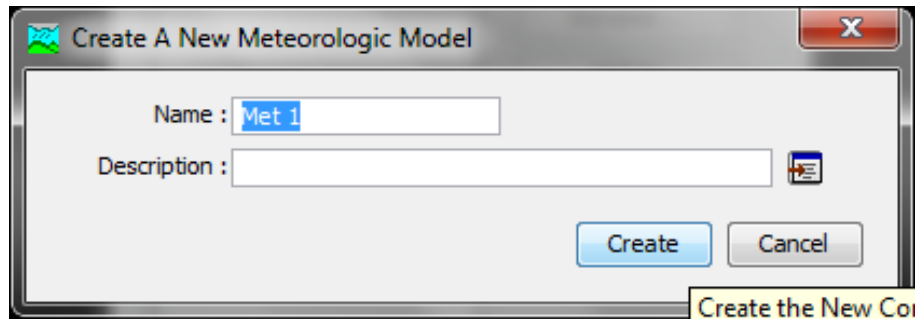


Figura 4.58 Muestra la creación del *Meteorologic Model Manager*.

Se expande la pestaña “*Met1*”. Se da “*click*” en la pestaña *Basins / Include Subbasin / Yes*. Se observa la parte de este paso en la Figura 4.59.

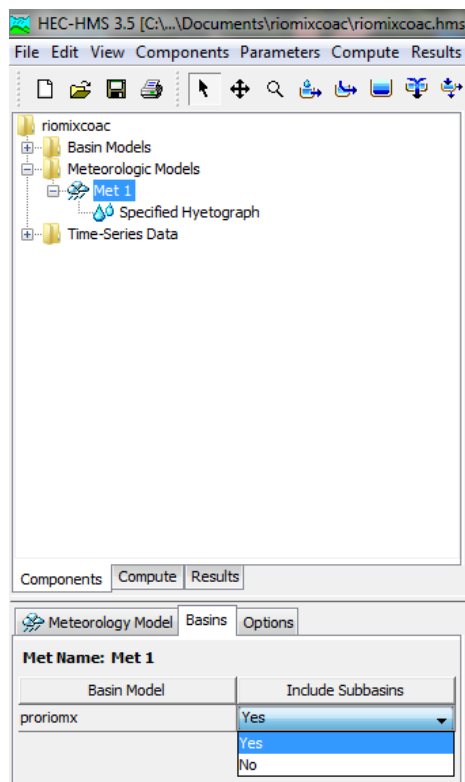
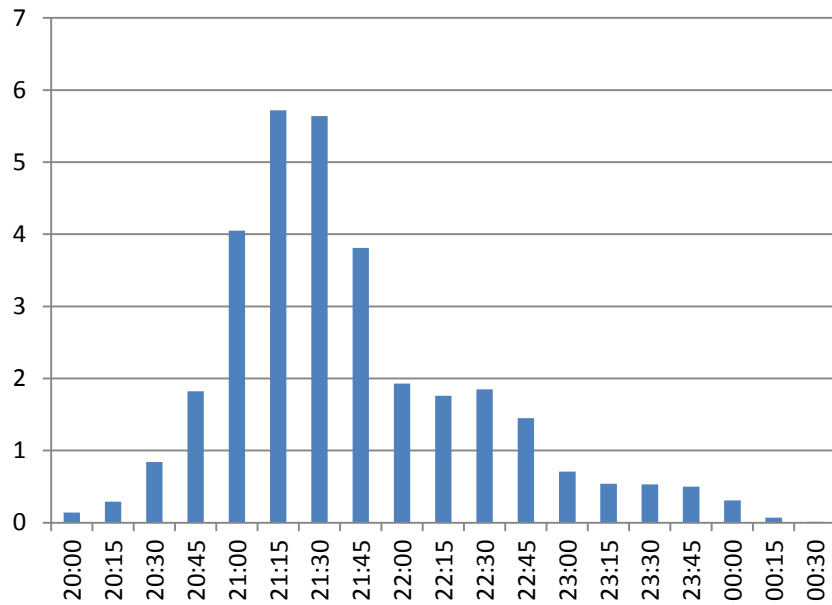


Figura 4.59 Apreciación ilustrativa de la pestaña “*Met 1*”.

El siguiente paso realizado fue dar de “alta” el evento para su simulación. Con fines de simulación, se ha elegido el evento registrado el 28 de julio de 1998 en la cuenca del río Mixocac, con una precipitación de 31.97 mm y 4.5 horas de duración. Los pulsos de lluvia son de 0.25 h y el volumen precipitado igual a 1’008,880 m³ (Quevedo, 2013).



Fuente: (Quevedo, 2013)

Figura 4.60 Hietograma de tormenta del Evento 1.

En la Tabla 4. 3 se muestra el evento del día 28 de julio de 1998 en la cuenca de estudio.

Fuente: (Quevedo, 2013)

Tabla 4. 3 Evento 1 (E1), 28 de julio de 1998, en la cuenca del río Mixcoac.

Hora	P (mm)	Hora	P (mm)
20:00	0.14	22:30	1.85
20:15	0.29	22:45	1.45
20:30	0.84	23:00	0.71
20:45	1.82	23:15	0.54
21:00	4.05	23:30	0.53
21:15	5.72	23:45	0.50
21:30	5.64	00:00	0.31
21:45	3.81	00:15	0.07
22:00	1.93	00:30	0.01
22:15	1.76		

La nueva ruta que se siguió fue para especificar el inicio y el fin del evento de precipitación, también se agregó manualmente los datos del evento en la cuenca como se observa en la Figura 4.61. Se sugirió la ruta:

*Menu / Components / Time Series Data Manager:
Data Type / Precipitation Gages: New / Create / Close
Gage 1*

*Time Window: Start Date (ddMMYYYY): 28jul1998
Start Time (HH:mm): 19:45
End Date (ddMMYYYY): 29jul1998
End Time (HH:mm): 00:30*

Posteriormente en la sub-pestaña *Table* se introducen los valores de precipitación del evento, se dejó en blanco el inicio. (Figura 4.61)

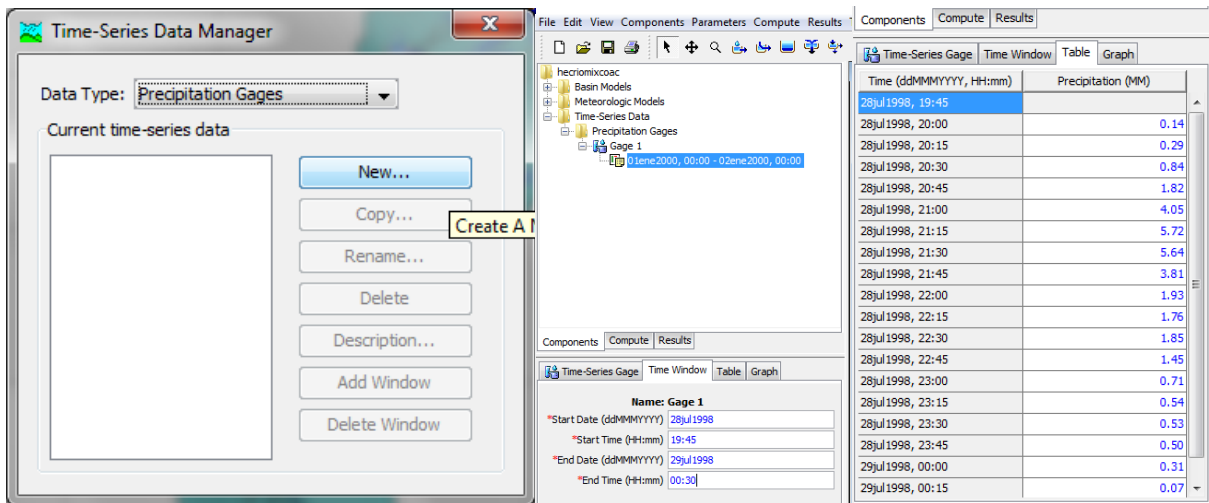


Figura 4.61 Ruta para introducir datos al programa.

El siguiente paso es dar de alta en la subcarpeta *Meteorologic Model / Met 1 / Specified Hyetograph/* la compuerta 1 o *Gage 1*.

La siguiente ruta se realizó para el control de la simulación, ver Figura 4.62 y Figura 4.63:

Menu / Components / Control Specification Manager / New / Create / OK

En la subpestaña *Control Specifications / Control 1/*

Start Date (ddMMYYYY): 28jul1998

Start Time (HH:mm): 19:45

End Date (ddMMYYYY): 29jul1998

End Time (HH:mm): 04:30

Time Interval: 1 Minute

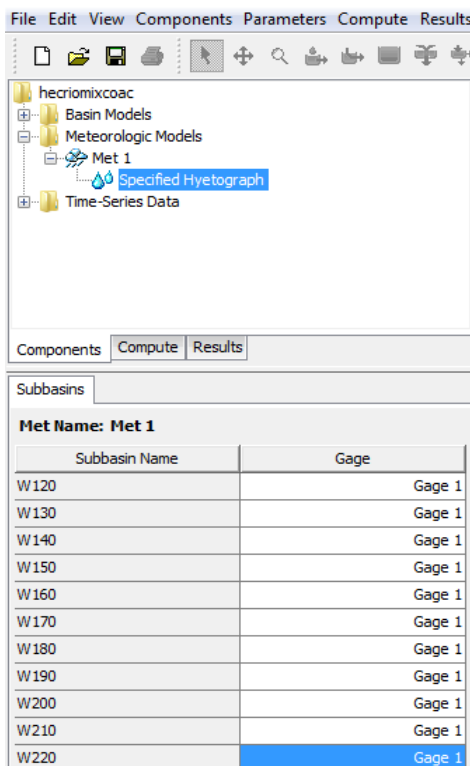


Figura 4.62 Proceso para dar de alta al *Gage 1*.

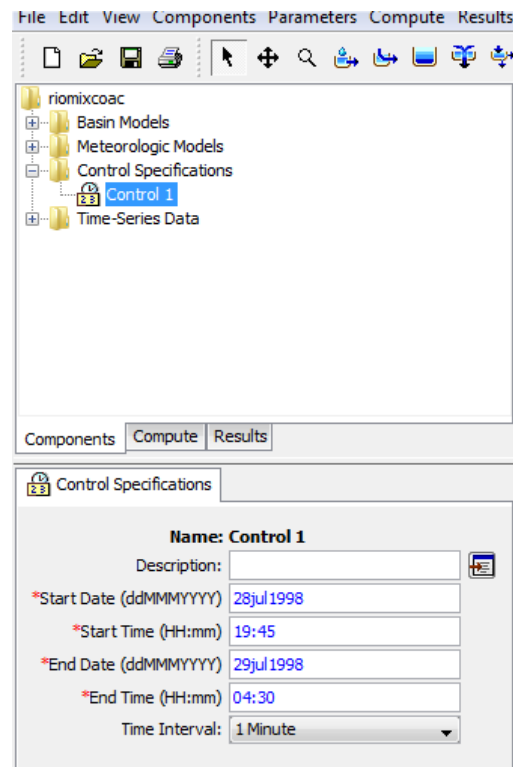


Figura 4.63 Muestra algunas especificaciones para el control de la simulación.

Una vez que se ingresó la tabla que contiene el registro de precipitación, el tiempo de duración y el intervalo, se procedió a crear la simulación del evento mediante la ruta:

Menu / Compute / Create Simulation Run / Next / Next

Menu / Compute / Select Run: Run 2 / Compute Run [Run 2] / OK

Finalizando la simulación dentro de la pestaña *Results* se explora la simulación, en ella se puede obtener las gráficas de la simulación, tablas etc., ver Figura 4.64.

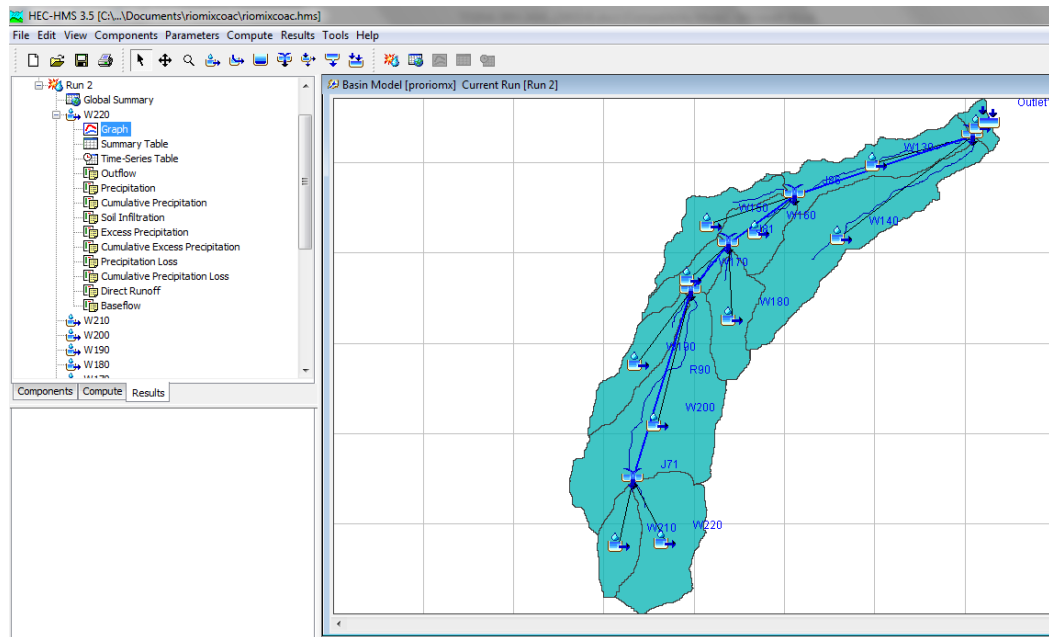


Figura 4.64 Resultados de la simulación.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del cálculo hidrológico con el programa HEC-HMS 3.5, se crearon hidrogramas (flujo continuo) para cada subcuenca y para el punto de salida (*Outlet*) como se observa en la Figura 5.1.

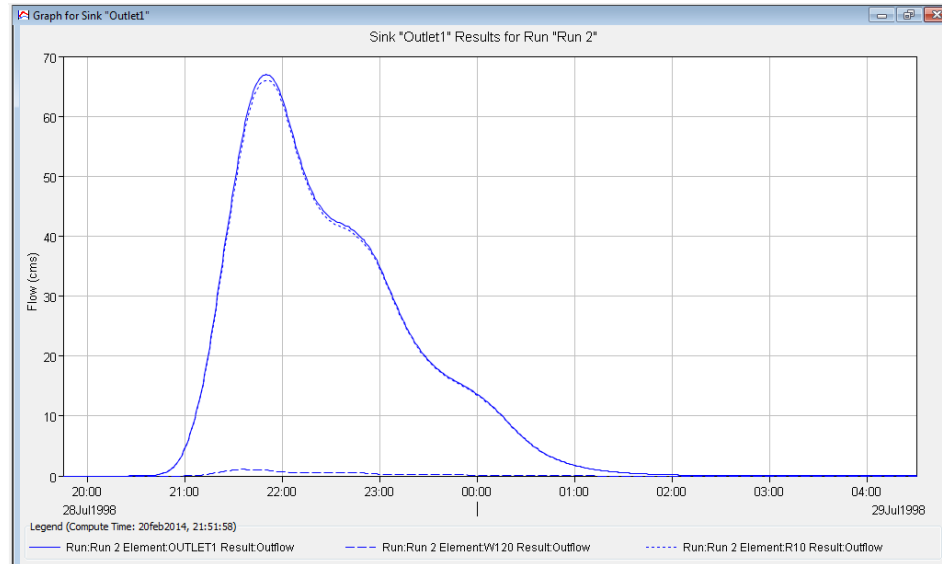
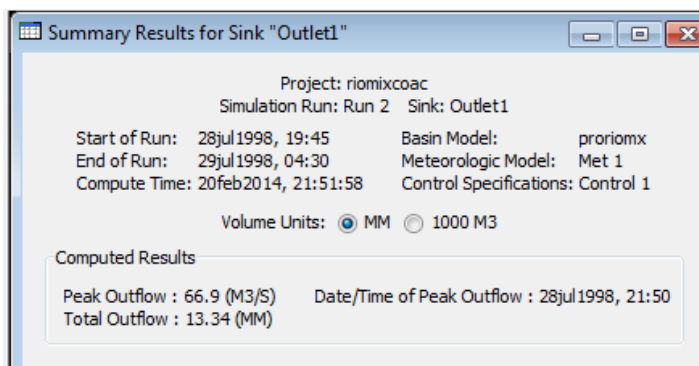


Figura 5.1 Hidrograma de salida.

Por otro lado se puede explorar la tabla general que contiene un resumen detallado del evento, donde se puede identificar tiempos en los cuales, la precipitación fue mayor o menor (Figura 5.2).



Date	Time	Outfl... (M3/S)	Date	Time	Outfl... (M3/S)	Date	Time	Outfl... (M3/S)
28jul1998	19:45	0.0	28jul1998	20:12	0.0	28jul1998	20:39	0.0
28jul1998	19:46	0.0	28jul1998	20:13	0.0	28jul1998	20:40	0.1
28jul1998	19:47	0.0	28jul1998	20:14	0.0	28jul1998	20:41	0.1
28jul1998	19:48	0.0	28jul1998	20:15	0.0	28jul1998	20:42	0.1
28jul1998	19:49	0.0	28jul1998	20:16	0.0	28jul1998	20:43	0.2
28jul1998	19:50	0.0	28jul1998	20:17	0.0	28jul1998	20:44	0.2
28jul1998	19:51	0.0	28jul1998	20:18	0.0	28jul1998	20:45	0.3
28jul1998	19:52	0.0	28jul1998	20:19	0.0	28jul1998	20:46	0.4
28jul1998	19:53	0.0	28jul1998	20:20	0.0	28jul1998	20:47	0.5
28jul1998	19:54	0.0	28jul1998	20:21	0.0	28jul1998	20:48	0.6
28jul1998	19:55	0.0	28jul1998	20:22	0.0	28jul1998	20:49	0.7
28jul1998	19:56	0.0	28jul1998	20:23	0.0	28jul1998	20:50	0.9
28jul1998	19:57	0.0	28jul1998	20:24	0.0	28jul1998	20:51	1.0
28jul1998	19:58	0.0	28jul1998	20:25	0.0	28jul1998	20:52	1.2
28jul1998	19:59	0.0	28jul1998	20:26	0.0	28jul1998	20:53	1.5
28jul1998	20:00	0.0	28jul1998	20:27	0.0	28jul1998	20:54	1.8
28jul1998	20:01	0.0	28jul1998	20:28	0.0	28jul1998	20:55	2.1
28jul1998	20:02	0.0	28jul1998	20:29	0.0	28jul1998	20:56	2.5
28jul1998	20:03	0.0	28jul1998	20:30	0.0	28jul1998	20:57	2.9
28jul1998	20:04	0.0	28jul1998	20:31	0.0	28jul1998	20:58	3.4
28jul1998	20:05	0.0	28jul1998	20:32	0.0	28jul1998	20:59	4.0
28jul1998	20:06	0.0	28jul1998	20:33	0.0	28jul1998	21:00	4.6
28jul1998	20:07	0.0	28jul1998	20:34	0.0	28jul1998	21:01	5.3
28jul1998	20:08	0.0	28jul1998	20:35	0.0	28jul1998	21:02	6.0
28jul1998	20:09	0.0	28jul1998	20:36	0.0	28jul1998	21:03	6.8
28jul1998	20:10	0.0	28jul1998	20:37	0.0	28jul1998	21:04	7.7
28jul1998	20:11	0.0	28jul1998	20:38	0.0	28jul1998	21:05	8.6

Figura 5.2 Sumario de precipitación.

El programa HEC-HMS 3.5, es flexible para el control de parámetros al momento de ejecutar la simulación; la experiencia del ingeniero determinará con su criterio, valores característicos para el desarrollo de los métodos de pérdidas, tránsito y escurrimiento que se introducen en el programa.

Cabe mencionar que para el procesamiento del MDE con el software Arcmap 10 se requiere seguir una ruta específica como se detalló en el capítulo IV Metodología. La omisión de alguno de los pasos del procedimiento generara error o gráficos y tablas con ausencia de valores.

La simulación obtenida de hidrogramas y de hietogramas a partir del software HEC-HMS 3.5 servirá como base para futuras calibraciones que incluyan el flujo base y el escurrimiento directo; o para extrapolar los registros medidos en campo (análisis real).

VI. CONCLUSIONES

La metodología planteada para la modelación hidrológica, se basa en calibrar los volúmenes por comportamiento estacional de los caudales; cuestión que fue mostrada a partir de la modelación realizada aplicando el evento del día 28 de julio de 1998.

- El modelo conceptual de cuenca unitaria es suficiente para modelar cuencas pequeñas con escasez de información, homogeneidad de características físico-geográficas y climatológicas.
- Los inconvenientes existentes de la observación, conservación y organización de la información hidrometeorológica básica, pueden ser reducidos con la aplicación del “Esquema Hidrometeorológico Integral para HEC-HMS”.
- En ausencia de hietogramas observados representativos, éstos pueden ser reconstruidos a partir de los datos de precipitación de la lluvia media diaria empleando un análisis estadístico.
- Las combinaciones de los métodos SCS, Clark y Muskingum, facilitan la modelación con HEC-HMS en cuencas con escasez o ausencia de información.
- El método SCS puede ser utilizado en la modelación de fenómenos de determinada probabilidad o donde no exista un interés específico en el tiempo de ocurrencia del gasto pico.
- El modelo de transformación de mejores resultados es el hidrograma unitario del SCS, seguido por el método de Clark en su valor mínimo, para el intervalo de valores utilizado.
- Es necesario considerar siempre el tránsito de avenidas. En general el método para el tránsito de avenidas que ofrece mejores resultados es el de Muskingum.

Finalmente, se recomienda utilizar este tipo de metodologías en casos en los que hay ausencia de información real (estaciones hidrométricas) y se requiere conocer los volúmenes medios de agua en sitios específicos, siempre y cuando la información existente lo permita.

VII. REFERENCIAS

Aranda, P. A. (2002). Diseño sistemático, basado en SIG, para redes de alcantarillado pluvial. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Carvajal-Escobar Y., Arango-López D., Jiménez-Escobar H., (2007) “*Estimación de caudales promedios mensuales por subcuencas hidrológicas mediante modelación con HEC-HMS*” Universidad del Valle. Colombia.

Chow, V. T., D.R. Maidment y L.W. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill. Inc. (edición en español, Santafé de Bogotá, Colombia).

Doan, J. H. (2003). “*Geospatial Hydrologic Modelling System Extensión HEC-Geo- HMS, user’s manual.*” U. S. Army Corps of Engineering Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 281.

Dueñas, C. (1997). “*Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones.*” In: *Jornadas Parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua: VI La protección civil ante el riesgo de inundaciones*, Cámara del Senado. Madrid, 7.

Estrada, S. V. y Pacheco R. M. (2012). *Modelación Hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXXIII (1): 94-105.

Feldman, A. D. (2000). “*Hydrologic Modelling System HEC–HMS, Technical reference manual.*” U. S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center,

González J., Martínez M. C., J. B., and Marrero, N. (2000). *Hidrología Superficial para Ingenieros*, Facultad de Ingeniería Civil, CIH, ISPJAE, La Habana. HEC, Davis, CA, 157.

Martín J. P., López S., Martín P., Simarro P., and Benito G. (2003). “*Uso de Modelos Uni- y Bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de La Reina.*” Ingeniería del agua 10 (1).

Méndez B. A., R. Domínguez., G. Soto, F. Rivera., V. Magaña y E. Caetano. (2011). Radars, an alternative in hydrological modeling. Lumped model. *Atmósfera*. UNAM, 24 (2):157-171.

- Mobayed K. N. (2001). *Modelo distribuido de lluvia-escorrentía basado en el manejo de variables georeferenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas*. Tesis doctoral, UNAM, México.
- Montenegro, E., and Zárate, O. (1998). "Sistematización para actualización caracterización hidrológica en cuenca Taquiña." Convenio LHUMSS – PROMIC. Serie Estudios Hidrológicos, (7).
- Muñoz, E. (1998). "Sistema de simulación hidrológica para el cálculo de la avenida de proyecto. Convenio LHUMSS – PROMIC." Serie Estudios Hidrológicos, Cochabamba – Bolivia.
- Nanía, L. S. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0 y HEC-GEO-HMS 1.1*. Universidad de Granada, Dpto. de Mec. de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Área de Ingeniería Hidráulica.
- Naranjo M. E., Duque R. (2004). *Estimación de la oferta de agua superficial y conflictos de uso en la cuenca alta del río Chamba, Mérida, Venezuela*. *Interciencia*, 29 (3): 130- 137.
- National Center for Geographic Information, and Analysis. (1990). "NCGIA Core Curriculum." University of California, Santa Bárbara (EE.UU).
- Olaya, F.V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*. Edición electrónica del autor. <http://heart.sf.net/textos>.
- Pacheco R. (2012). *Modelación Hidrológica con Hec-Hms en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). Tesis (Maestría).
- Pizarro R., Soto M., Farias C. et al. (2005). *Aplicación de dos modelos de simulación integral hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. Bosque (Valdivia)*, 26 (2): 123-129.
- Quevedo J. A., (2013). *Análisis y validación de hidrogramas unitarios con base física para la modelación de escurrimientos pluviales*. Tesis Maestría. UAQ. México.
- Quiñonero, R.J., Sarría, F. (2007). *Modelización de la dinámica hidrológica y erosiva en barrancos de la cuenca del río Quípar (Suroeste de España) con GRASS*. *Geofocus*, (7): 188-215.
- Sánchez, F.J. (2010). *HEC-HMS. Manual básico*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. España. <http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Sherman, L.K. (1932). *Stream flow from rainfall by the unit graph method*. Eng. News Record, 108: 501-505.

Soil Conservation Service (SCS), (1964, 1972, 1986), Hydrology, SCS National Engineering Handbook. U. S. Department of Agriculture, Washington D. C.

US Army Corps of Engineers (USACE), (2010), Geospatial Hydrologic Modeling System HEC-GeoHMS, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, EUA.

Usul, N. y Yilmaz, M. (2002). *Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's technique in GIS*. 22nd Annual Esri International User Conference, San Diego, California.

PAGINAS WEB

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Consultado en enero de 2014 en:
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>

Consultado en enero de 2014:

http://www.uabcs.mx/geologia/geo_bajamx/sig/zonas_utm.pdf

A. ANEXOS

A.1 Zonas UTM para México y resto del mundo

Universal Transversa de Mercator

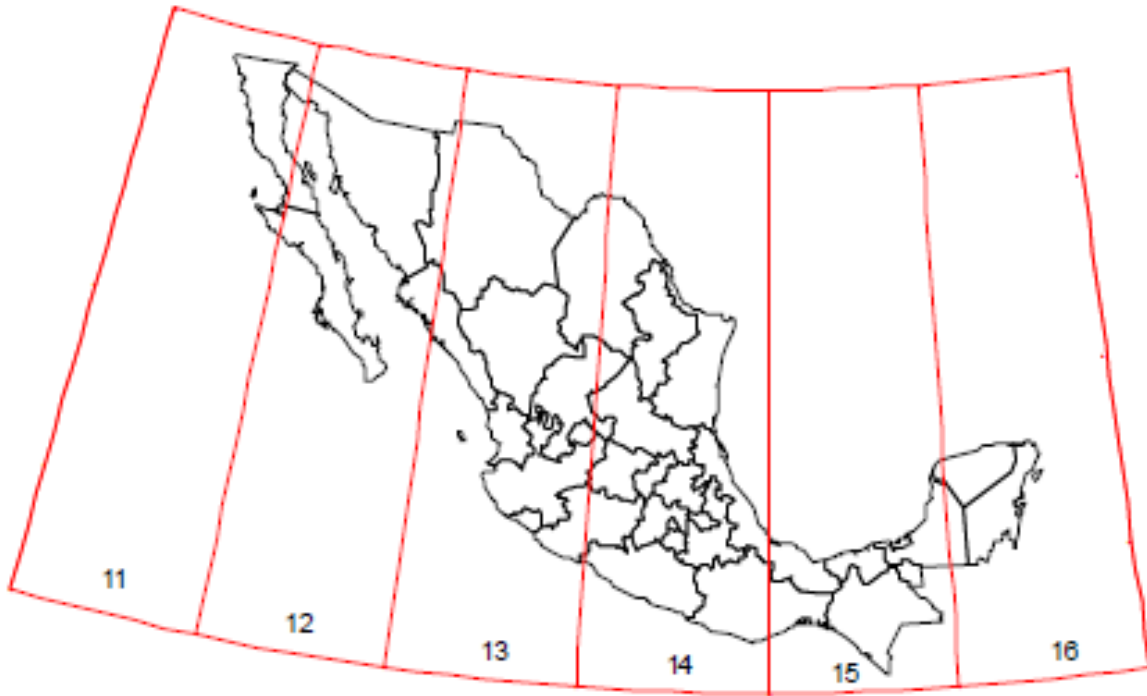
Zonas de la proyección Universal Transversa de Mercator, meridianos centrales y rangos de longitudes. Todos los valores son en grados este (E) u oeste (W) del meridiano principal de Greenwich (0).

Zona	Meridiano central	Rango	Zona	Meridiano central	Rango
1	177W	180W-174W	31	3E	6E-0
2	171W	174W-168W	32	9E	6E-12E
3	165W	168W-162W	33	15E	12E-18E
4	159W	162W-156W	34	21E	18E-24E
5	153W	156W-150W	35	27E	24E-30E
6	147W	150W-144W	36	33E	30E-36E
7	141W	144W-138W	37	39E	36-42E
8	135W	138W-132W	38	45E	42E-48E
9	129W	132W-126W	39	51E	48E-54E
10	123W	126W-120W	40	57E	54E-60E
11	117W	120W-114W	41	63E	60E-66E
12	111W	114W-108W	42	69E	66E-72E
13	105W	108W-102W	43	75E	72E-78E
14	99W	102W-96W	44	81E	78E-84E
15	93W	96W-90W	45	87E	84E-90E
16	87W	90W-84W	46	93E	90E-96E
17	81W	84W-78W	47	99E	96E-102E
18	75W	78W-72W	48	105E	102E-108E
19	69W	72W-66W	49	111E	108E-114E
20	63W	66W-60W	50	117E	114E-120E
21	57W	60W-54W	51	123E	120E-126E
22	51W	54W-48W	52	129E	126E-132E
23	45W	48W-42W	53	135E	132E-138E
24	39W	42W-36W	54	141E	138E-144E
25	33W	36W-30W	55	147E	144E-150E
26	27W	30W-24W	56	153E	150E-156E
27	21W	24W-18W	57	159E	156E-162E
28	15W	18W-12W	58	165E	162E-168E
29	9W	12W-6W	59	171E	168E-174E
30	3W	6W-0	60	177E	174E-180E

(Fuente: http://www.uabcs.mx/geologia/geo_bajamx/sig/zonas_utm.pdf)

En negritas se muestran los meridianos centrales y zonas UTM para México. Las zonas UTM ocurren cada 6° de longitud. Las zonas UTM en el Hemisferio Sur son indicadas con un signo negativo antes de número de la zona.

Ejemplo: Zona 17 tiene un meridiano central de 81° W y un norte falso (Y) de 10, 000, 000 metros del Ecuador. La siguiente figura muestra las zonas UTM para México.



Zonas UTM de México

(Fuente: http://www.uabcs.mx/geologia/geo_bajamx/sig/zonas_utm.pdf)

A.2 Clasificación Hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles			
Q	Arenosoles			
J	Fruvisoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)			
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)	B	Buena	Arenas finas y limos
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Ragosoles			
H	Fozozems			
K	Kastanozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
N	Nitosoles			
C	Chernozems			
-	Alisoles			
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintosoles			
-	Lixisoles			

(Fuente: FAO)

A.3 Número de curva según la cobertura de suelo

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parquesaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100

EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acuales, crasicamle, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, subinorme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89

Definición de condición hidrológica

Suelos agrícolas:

Mala: tiene menos del 25 % del terreno cubierto

Regular: tiene entre 25 y 50 % del terreno cubierto

Buena: tiene más del 50 % del terreno cubierto.

Uso forestal:

Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto

Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto.

Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.

(Fuente: INEGI)



Centro Universitario, Enero 15, 2014.

C. JAVIER ALVAREZ MAYA,
C. SIMÓN RAMÍREZ HERNÁNDEZ,
Pasante (s) del área de Ingeniería Civil,
P R E S E N T E .

En respuesta a la solicitud que Usted (es) plantea (n) sobre la ASIGNACIÓN de ASESOR, necesario para la elaboración de la TESINA, y requisito para la acreditación del **DIPLOMADO EN VÍAS TERRESTRES** se le (s) designa al (la) **MC. JOSÉ ANTONIO QUEVEDO TIZNADO**, para desarrollar el tema: **"MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON BASE EN SOFTWARE HEC®"** por lo que deberá (n) dirigirse al catedrático para ponerse de acuerdo y realizar el trabajo correspondiente tomando en cuenta los lineamientos que para su elaboración otorga el Centro de Educación Continua.

Por lo anterior me permito hacer de su conocimiento que la tesina deberá entregarse debidamente empastada y en disco compacto; aprobada por su asesor y la coordinación del área a más tardar el día 10 de marzo del 2014.

ATENTAMENTE

"El ingenio para crear, no para destruir"

M. en I. RUBÉN RAMÍREZ JIMÉNEZ
COORDINADOR CENTRO DE EDUCACIÓN CONTINUA



FIRMA DE ACEPTACIÓN DEL ASESOR

MC. JOSÉ ANTONIO QUEVEDO TIZNADO

Nombre: José Antonio Quevedo Tiznado

Firma: Antonio Quevedo

Fecha: 16 de Enero de 2014

De enterado



Cp. Archivo.
Cpr*



Centro Universitario, Febrero 2014.

A QUIEN CORRESPONDA:

Hago constar que el (os) pasante (s) de la Licenciatura de Ingeniería Civil C. JAVIER ÁLVAREZ MAYA y SIMÓN RAMÍREZ HERNÁNDEZ, aprobó (n) la TESINA del DIPLOMADO EN VÍAS TERRESTRES impartido por el Centro de Educación Continua para lo cual presenta (n) el trabajo titulado: "MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON BASE EN SOFTWARE HEC®"

Aprobada con fines de Titulación.

Antonio Quevedo

M. en C. JOSÉ ANTONIO QUEVEDO TIZNADO
ASESOR DE TESINA