



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

“APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE
ELEVACIÓN DIGITAL EN LA INGENIERÍA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

LUIS EDUARDO SANTILLÁN JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. LUIS POMPOSO VIGUERAS
MUÑOZ

San Juan de Aragón, México.2015





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme brindado la vida y siempre llenarme de bendiciones, por ponerme en el seno de una gran familia, por darme la fortaleza y permitirme llegar hasta este momento.

A mis padres Luis y Reyna, por siempre creer en mí, por brindarme todo su apoyo durante todos estos años, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por su esfuerzo y sacrificio gracias por todo papás.

A mis hermanas Berenice, Eliza y Gisela, por escucharme y siempre darme ánimos para seguir adelante, por ese gran cariño incondicional la quiero hermanitas.

A mis compañeros y amigos, por compartir esas horas de estudio, practicas, desayunos, juegos y por hacer más amenas las clases, por estar en los buenos y en los malos momentos. Ustedes saben quiénes son porque el cariño se siente y no necesito poner el nombre de todos ustedes, siempre los recordare.

A mi familia, por su apoyo económico y moral en especial a mis tías José, Chivis y Lucy, por lo mucho que me apoyaron para que pudiera estudiar.

Al M. en C. Luis Pomposo Vigueras Muñoz, por su apoyo y paciencia para la realización de esta tesis, por sus enseñanzas, consejos y platicas motivadoras.

A mi querida Universidad, por permitirme ser parte de ella y ser mi segunda casa, por todo lo que me dio durante todos estos años por contribuir en mi formación personal y profesional dentro y fuera de las aulas.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| AGRADECIMIENTOS | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| JUSTIFICACIÓN | 1 |
| OBJETIVO | 1 |
| CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 LOCALIZACIÓN..... | 2 |
| 1.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA..... | 3 |
| 1.2.1 CUENCA..... | 3 |
| 1.2.2 PARTEAGUAS..... | 3 |
| 1.3 MEDICIÓN DE ÁREA Y LONGITUDES..... | 3 |
| 1.3.1 LONGITUDES (PERÍMETROS Y LONGITUDES DE CAUCE)..... | 4 |
| 1.3.2 ÁREA..... | 5 |
| 1.4 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA..... | 7 |
| 1.4.1 CRITERIO DE HORTON..... | 7 |
| 1.4.2 CRITERIO DE NASH..... | 9 |
| 1.5 PENDIENTE DEL CAUCE APLICANDO EL MÉTODO DE TAYLOR Y SCHWARZ..... | 12 |
| CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS CARTOGRÁFICOS Y GEODÉSICOS..... | 14 |
| 2.1 GEODESIA..... | 15 |
| 2.2 LA GEODESIA EN MÉXICO..... | 16 |
| 2.3 SISTEMAS DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS..... | 16 |
| 2.4 LÍNEAS DE REFERENCIA DEL GLOBO TERRESTRE..... | 17 |
| 2.5 ESFERAS Y GEOIDES..... | 18 |
| 2.6 ELIPSOIDES..... | 19 |
| 2.7 DATUM..... | 21 |
| 2.8 EL SISTEMA DE REFERENCIA EUROPEO..... | 21 |
| 2.9 SISTEMA DE REFERENCIA EN MÉXICO..... | 22 |
| 2.9.1 NAD27..... | 22 |
| 2.9.2 NAD83..... | 22 |
| 2.9.3 WGS84..... | 23 |
| 2.9.4 MARCO ITRF2008 EN MÉXICO..... | 23 |
| 2.10 SISTEMA DE PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS..... | 24 |
| 2.10.1 TIPOS DE PROYECCIONES..... | 24 |
| 2.11 EL SISTEMA UTM..... | 26 |
| 2.12 EL ORÍGEN DE LOS MAPAS..... | 28 |
| 2.13 ESCALA..... | 30 |
| 2.13.1 ESCALA NUMÉRICA..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 2.13.2 ESCALA GRÁFICA | 31 |
| 2.14 MAPAS MÁS USUALES | 31 |
| 2.15 MAPAS TOPOGRÁFICOS..... | 32 |
| 2.15.1 SIMBOLOGÍA..... | 34 |
| 2.15.2 HISTORIA DE LA INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA EN MÉXICO | 34 |
| CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 36 |
| 3.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 37 |
| 3.2 DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 38 |
| 3.3 MODELO DE DATOS | 41 |
| 3.4 EL MODELO RASTER | 42 |
| 3.5 EL MODELO VECTORIAL | 43 |
| 3.6 MODELO DE DATOS RASTER VS VECTORIAL | 44 |
| 3.7 UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..... | 46 |
| 3.8 LOS DRONES EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 46 |
| 3.8.1 USO DE DRONES EN SIG EN TOPOGRAFÍA..... | 47 |
| 3.8.2 USO DE DRONES EN GESTIÓN DE EMERGENCIAS | 48 |
| 3.8.3 USO DE DRONES PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES | 48 |
| CAPÍTULO 4. MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL (M.E.D.)..... | 50 |
| 4.1 MODELO..... | 51 |
| 4.2 MODELOS ANALÓGICOS Y MODELOS DIGITALES | 51 |
| 4.3 EL ORIGEN DE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL..... | 52 |
| 4.4 MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL | 53 |
| 4.4.1 MODELO VECTORIAL DE CONTORNOS..... | 54 |
| 4.4.2 MODELO VECTORIAL REDES DE TRIÁNGULOS IRREGULARES (TIN)..... | 55 |
| 4.4.3 MODELO RASTER MATRICES REGULARES..... | 55 |
| 4.4.4 MODELO RASTER MATRICES DE RESOLUCIÓN VARIABLE..... | 56 |
| 4.5 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL..... | 56 |
| 4.6 MÉTODOS DE GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN | 56 |
| 4.6.1 TECNOLOGÍA LIDAR (ACRÓNIMO EN INGLÉS “DETECCIÓN Y MEDICIÓN A TRAVÉS DE LA LUZ..... | 57 |
| 4.6.2 MÉTODOS INDIRECTOS RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DE CORRELACIÓN CRUZADA..... | 58 |
| 4.6.3 MÉTODOS INDIRECTOS: DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS | 59 |
| 4.7 USOS DE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL | 60 |
| 4.8 APLICACIONES MILITARES | 61 |
| 4.8.1 INTERVISIBILIDAD ENTRE DOS PUNTOS | 61 |
| 4.9 MANEJO Y PLANEACIÓN DE RECURSOS NATURALES..... | 61 |
| 4.9.1 ANÁLISIS DEL OCULTAMIENTO TOPOGRÁFICO | 62 |

| | |
|---|------------|
| 4.10 GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA | 62 |
| 4.11 INGENIERÍA CIVIL..... | 63 |
| 4.11.1 CÁLCULO DE PERFILES | 63 |
| 4.11.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO..... | 64 |
| 4.11.3 EXTRACCIÓN DE REDES DE DRENAJE | 64 |
| 4.11.4 EL MODELO DE CAUDALES MÁXIMOS..... | 64 |
| CAPÍTULO 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN..... | 66 |
| 5.1 OBTENCIÓN DE LOS MED..... | 67 |
| 5.1.1 DESCARGAR MED DE LA NASA | 67 |
| 5.1.2 DESCARGAR MED DEL INEGI | 70 |
| 5.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA..... | 72 |
| 5.3 OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO MÉTRICAS DE LA CUENCA..... | 87 |
| 5.4 GENERACIÓN DE UN TIN A PARTIR DE LOS MED | 98 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 102 |
| CONCLUSIONES..... | 103 |
| RECOMENDACIONES | 104 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 105 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1-1 Ubicación del punto de estudio.....</i> | 2 |
| <i>Figura 1-2 Carta topográficas 1:50 000 de Atlacomulco de Fabela.....</i> | 2 |
| <i>Figura 1-3 Carta topográficas 1:50 000 Tepeji del Río.....</i> | 2 |
| <i>Figura 1-4 Delimitación de la cuenca usando método tradicional.....</i> | 3 |
| <i>Figura 1-5 Curvímetro.....</i> | 4 |
| <i>Figura 1-6 Obtención del perímetro de la cuenca y longitud del cauce principal por medio de AutoCAD.....</i> | 4 |
| <i>Figura 1-7 Obtención de área por medio de conteo de cuadros.....</i> | 5 |
| <i>Figura 1-8 Área irregular sujeta a apreciación.....</i> | 5 |
| <i>Figura 1-9 Planímetro.....</i> | 6 |
| <i>Figura 1-10 Obtención del área por medio de Autocad.....</i> | 6 |
| <i>Figura 1-11 Trazado de cuadrícula para el método de Horton.....</i> | 7 |
| <i>Figura 1-12 Puntos de intersección y longitudes Lx.....</i> | 8 |
| <i>Figura 1-13 Cuadrícula con al menos 30 intersecciones, para el método de Nash.....</i> | 9 |
| <i>Figura 1-14 Distancia mínima entre dos curvas pasando por el punto de intersección.....</i> | 10 |
| <i>Figura 1-15 Caso especial en el que no es posible unir dos curvas de diferentes cotas.....</i> | 10 |
| <i>Figura 2-1 Esquema de los elementos del sistema de coordenadas geográficas.....</i> | 17 |
| <i>Figura 2-2 Representación gráfica del geoide.....</i> | 18 |
| <i>Figura 2-3 Parámetros que definen el elipsoide.....</i> | 19 |
| <i>Figura 2-4 Relación geoide-elipsoide.....</i> | 21 |
| <i>Figura 2-5 Estaciones de la RGNA.....</i> | 23 |
| <i>Figura 2-6 Proyección cónica.....</i> | 25 |
| <i>Figura 2-7 Proyección cilíndrica.....</i> | 25 |
| <i>Figura 2-8 Proyección plana.....</i> | 26 |
| <i>Figura 2-9 Esquema de una zona UTM.....</i> | 27 |
| <i>Figura 2-10 Cuadrícula UTM.....</i> | 28 |
| <i>Figura 2-11 Mapamundi más antiguo conocido.....</i> | 29 |
| <i>Figura 2-12 Representación de las diferentes escalas.....</i> | 31 |
| <i>Figura 2-13 Carta Topográfica de Cuernavaca.....</i> | 33 |
| <i>Figura 3-1 Componentes de un SIG.....</i> | 37 |
| <i>Figura 3-2 Mapa original del Dr. John Snow.....</i> | 39 |
| <i>Figura 3-3 Aspecto de un mapa generado con SYMAP.....</i> | 40 |
| <i>Figura 3-4 Representación de modelos raster y vectorial.....</i> | 41 |
| <i>Figura 3-5 Capas en Sistemas de Información Geográficos.....</i> | 42 |
| <i>Figura 3-6 Imprecisión de forma en el modelo de representación raster.....</i> | 45 |
| <i>Figura 3-7 Ambigüedad en la asignación de valores en una celda modelo raster.....</i> | 45 |
| <i>Figura 3-8 Dron.....</i> | 47 |
| <i>Figura 3-9 Uso de Drones en topografía.....</i> | 47 |
| <i>Figura 3-10 Daños provocados por deslizamientos de tierra.....</i> | 48 |
| <i>Figura 4-1 Mapa impreso México ejemplo de modelo analógico.....</i> | 52 |
| <i>Figura 4-2 Modelo digital de elevación en formato TIN.....</i> | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-3 Modelo digital de elevación en formato raster | 56 |
| Figura 4-4 Componentes que intervienen en la Tecnología LIDAR..... | 58 |
| Figura 4-5 Método fotogramétrico de correlación cruzada de Foto | 59 |
| Figura 4-6 Escáner de tambor | 60 |
| Figura 4-7 Índices de radiación correspondientes a un MED..... | 62 |
| Figura 4-8 Representación tridimensional de la zona geotérmica Las Tres Vírgenes, B.C.S..... | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1-1 Número de intersecciones y longitud en dirección X criterio HORTON..... | 8 |
| Tabla 1-2 Número de intersecciones y longitud en dirección Y criterio HORTON..... | 8 |
| Tabla 1-3 Cálculo de la pendiente de la cuenca según NASH | 11 |
| Tabla 1-4 Cálculo de la pendiente del cauce según Taylor-Schwart | 13 |
| Tabla 2-1 Nombre del elipsoide y año de cálculo, medida del semieje mayor e índice de aplanamiento | 20 |
| Tabla 3-1 Entidades geométricas en el modelo de representación vectorial..... | 44 |
| Tabla 5-1Tabla comparativa de los resultados obtenidos con MED y Arcmap contra los resultados obtenidos usando métodos tradicionales..... | 98 |

INTRODUCCIÓN

Los Modelos de Elevación Digital (MED) son una estructura numérica, de datos que contienen la representación simplificada de las formas del relieve terrestre, como son las montañas, planicies, depresiones y mesetas, que permiten modelar estos espacios geográficos.

Los MED permiten conocer aspectos tales como: alturas, pendientes, desniveles, áreas sujetas a inundación, volúmenes de tierra y delimitación de cuencas, con lo que ayudan al desarrollo y a la generación de conocimiento en el estudio de las formas del terreno, con lo que se convierten en una herramienta muy importante en el diseño de infraestructura, toma de decisiones y uso sostenible del territorio.

En el Capítulo 1 se muestra como se delimitaba una cuenca y se obtenían las características físicas de la cuenca como son: perímetro, área, pendiente media de la cuenca y del cauce, así como los instrumentos y metodologías utilizadas antes de la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y MED.

En el capítulo 2 se habla del sistemas de coordenadas geográficas y las proyecciones cartográficas, como el UTM, entre otros conceptos que son clave a la hora de la manipulación de los MED, dentro de los sistemas de información geográfica, ya que es indispensable que estos estén geo-referenciados y para algunos procesos como el cálculo de distancias, proyectados en coordenadas UTM. Y aunque el programa hace esto de manera muy sencilla es importante saber que son y los tipos de proyecciones que existen.

En el capítulo 3 se da una reseña histórica de los sistemas de información geográfica, desde sus orígenes, y como fueron evolucionando hasta nuestros días. Se describen los tipos de modelos de datos (raster y vectorial) y se dan sus principales ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

En el capítulo 4 se abordan los Modelos de Elevación Digital, sus orígenes, los tipos que existen, su construcción y métodos de generación así como los usos y aplicaciones que tienen en nuestros días.

El capítulo 5 es el capítulo más importante de este trabajo ya que en él se muestra un ejemplo, desde la obtención en internet de un MED hasta la generación y delimitación de una cuenca paso a paso, así como la obtención de sus características físicas principales como son: perímetro, área, longitud del cauce, pendiente media de la cuenca y generación de un TIN (Triangular Irregular Network).

En el capítulo 6 se dan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, se hace una comparativa de las ventajas de usar los MED en la obtención y delimitación de cuencas respecto a los instrumentos y técnicas de medición usadas en el capítulo 1, para la obtención de los mismos parámetros.

JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad de conocer y manejar las nuevas tecnologías, que nos permitan desarrollar los proyectos en un menor tiempo y con una mayor precisión, se realiza el siguiente trabajo para mostrar las ventajas de los Modelos de Elevación Digital y los Sistemas de Información Geográfica con respecto a las cartas topográficas, papel y calculadora.

Ya que actualmente no basta con saber hacer los procedimientos en papel, es necesario estar familiarizados con las nuevas tecnologías.

OBJETIVO

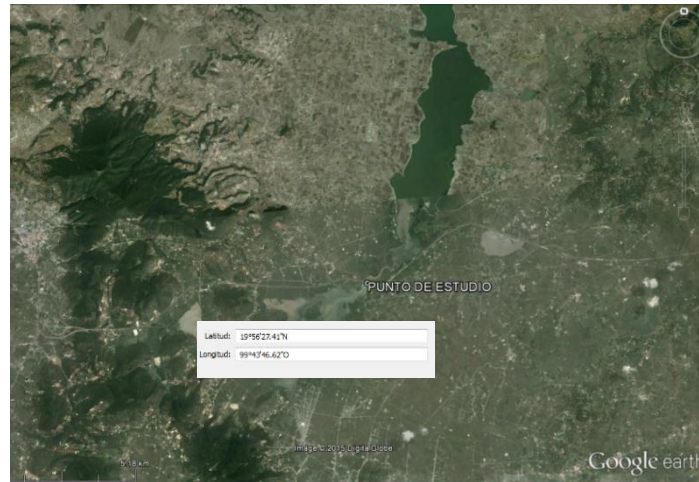
El objetivo del presente trabajo es desarrollar de la manera más clara posible, un ejemplo de la delimitación de una cuenca y la obtención de sus principales características físicas, con la ayuda de un modelo de elevación digital como dato de entrada y el programa Arcmap 10.2 para el geo-procesamiento del mismo.

Esto con la finalidad de apoyar a toda la persona que esté interesada en conocer como se realiza dicho proceso paso a paso, de una manera que sea comprensible para personas que no están familiarizadas con la herramienta.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

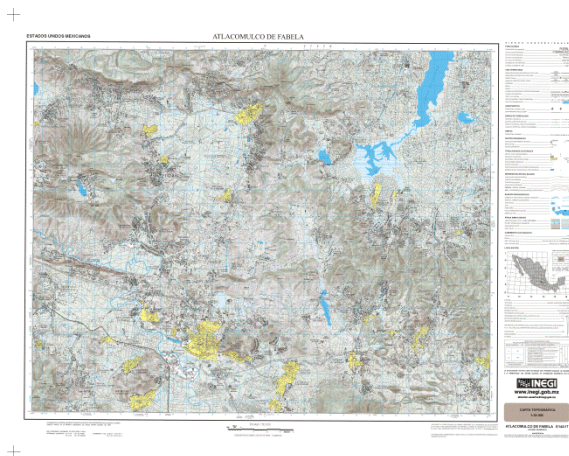
1.1 LOCALIZACIÓN

Punto de estudio se localiza en el cruce de la carretera arco norte y la parte más reducida del embalse de la presa Huapango en el Estado de México, sus coordenadas son Latitud $19^{\circ}56'27.41''N$ y Longitud $99^{\circ}43'46.62''O$ en formato DMS(grados, minutos y segundos). Se encuentra a una altitud de 2,612 metros sobre el nivel del mar. Ver figura 1-1.

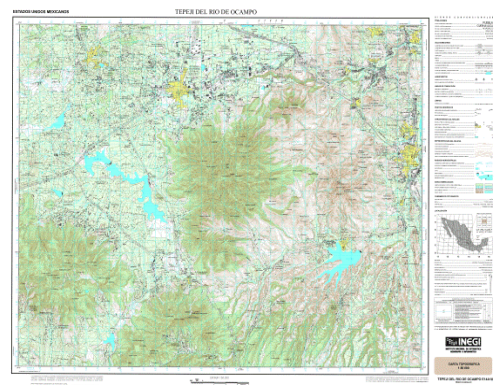


*Figura 1-1 Ubicación del punto de estudio
Fuente: captura de pantalla de Google Earth Pro*

Para la delimitación de la cuenca y obtención de sus características morfo métricas se requería, de información cartográfica, conocida como cartas topográficas para este caso, cartas topográficas clave E 14 A 17 “Atlaacomulco de Fabela” y E 14 A 18 “Tepeji del Río de Ocampo”, escala 1:50, 000, editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI.



*Figura 1-2 Carta topográficas 1:50 000 de
Atlaacomulco de Fabela
Fuente: INEGI*



*Figura 1-3 Carta topográficas 1:50 000
Tepeji del Río
Fuente: INEGI*

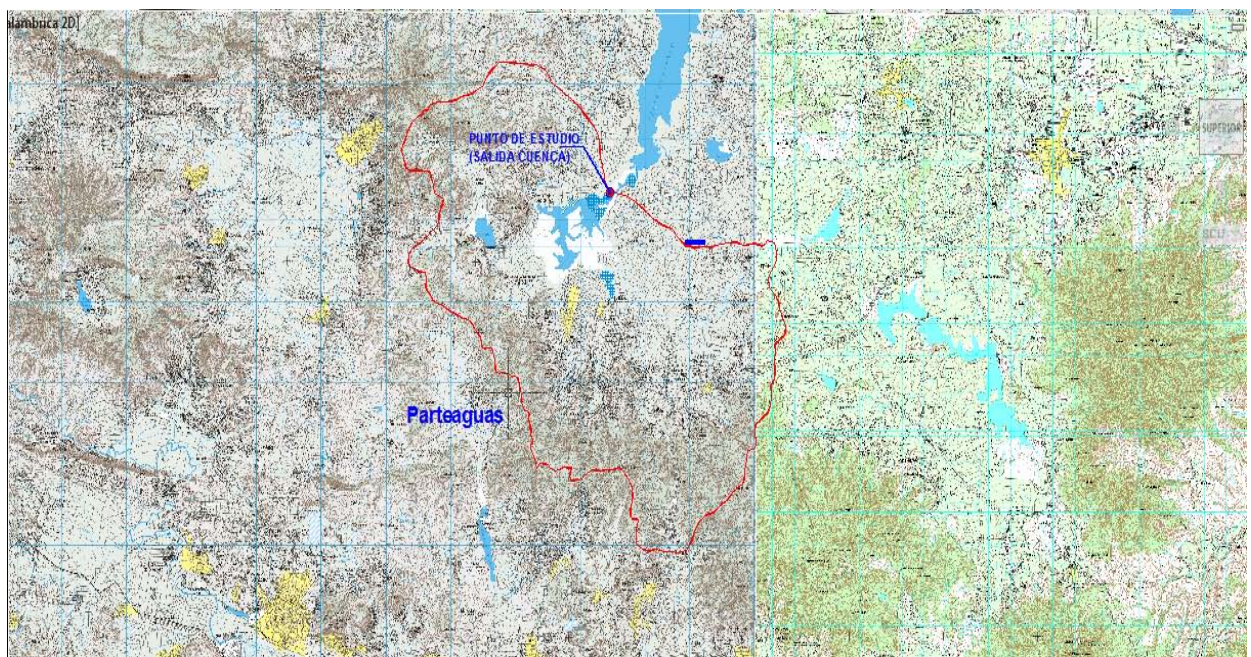
1.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

1.2.1 CUENCA

Es la zona de la superficie terrestre de nuestro interés, en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema hacia un mismo punto de salida.

1.2.2 PARTEAGUAS

Para dar forma a la cuenca, se tiene que delimitar con una línea imaginaria que uno los puntos de mayor elevación, encerrando la corriente principal o de interés, sin que se tenga que cortar ninguna de sus corrientes tributarias, es decir aquellas corrientes que se incorporan a la corriente principal para formar su sistema de drenaje.



*Figura 1-4 Delimitación de la cuenca usando método tradicional
Fuente: captura de pantalla elaboración propia*

1.3 MEDICIÓN DE ÁREA Y LONGITUDES

En el estudio de una cuenca hidrológica es necesario medir áreas y longitudes, el problema radica en que las superficies y las longitudes no son regulares con lo que se dificulta su obtención por los métodos tradicionales.

1.3.1 LONGITUDES (PERÍMETROS Y LONGITUDES DE CAUCE)

La herramienta utilizada para realizar esta medida es el curvómetro, el cual es un aparato dotado de una pequeña rueda con la que se recorre la línea a medir, aunque también se puede usar una cuerda, que se deslizará por la longitud que se necesita y luego se medirá la cuerda con una regla.



Figura 1-5 Curvómetro

Fuente: <http://tracklander.blogspot.mx/2011/05/que-es-y-como-se-usa-un-curvimetro.html>

También se puede medir las longitudes por medio de un CAD, para ello es necesario realizar los siguientes pasos.

- 1- Importar la imagen de la carta topográfica y delimitar la cuenca, y el cauce principal para ello se tendrá que trazar el parteaguas y el cauce, similarmente a como se hace en papel.
- 2- Señalarle al programa el objeto (cauce) y en la línea de comando teclear `_list`.
- 3- El programa nos indicará algunas características del objeto entre ellas la longitud del cauce, hacer lo mismo para el parteaguas, para obtener el perímetro.

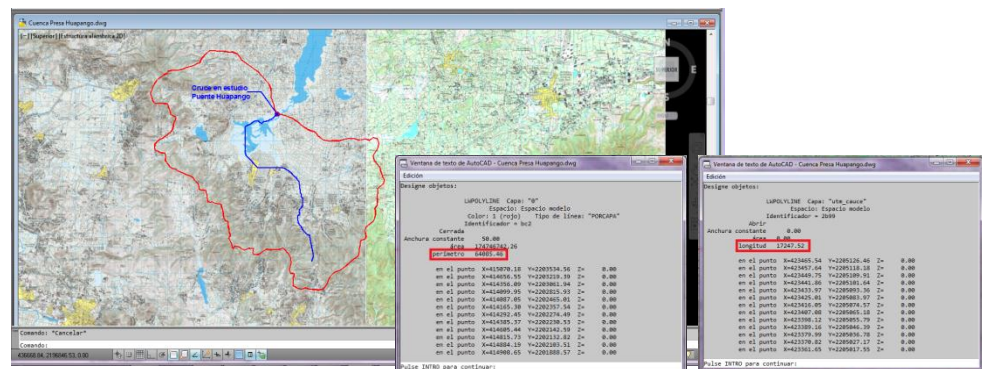


Figura 1-6 Obtención del perímetro de la cuenca y longitud del cauce principal por medio de AutoCAD

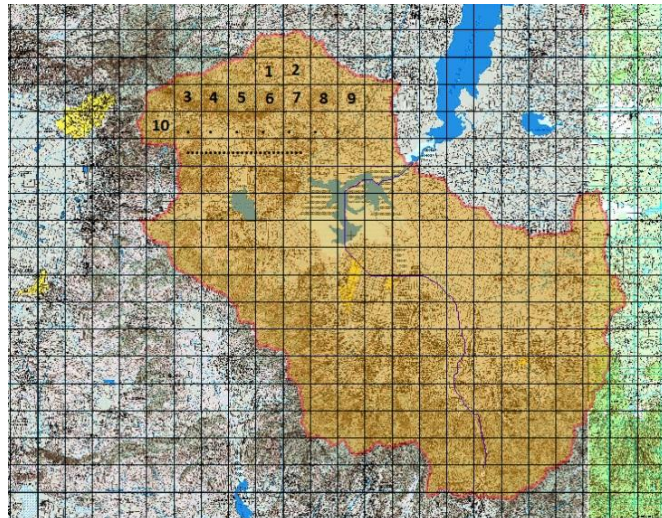
Fuente: captura de pantalla elaboración propia

Longitud del cauce: 17.25 km, perímetro de la cuenca 64.09 km

1.3.2 ÁREA

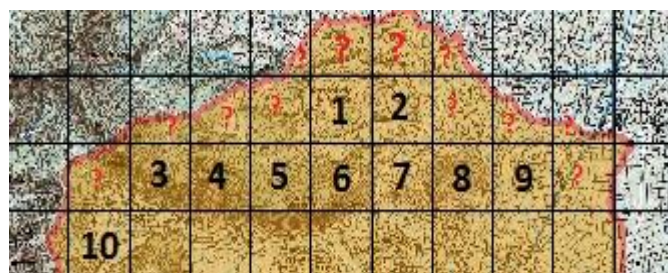
Una cuenca tiene su superficie perfectamente definida por su contorno y viene a ser el área drenada comprendida dentro de la línea imaginaria llamada parteaguas.

Para la obtención del área de la cuenca, se solía realizar desde contar el número de cuadros que quedaban encerrados en la cuenca, cada uno de ellos representaba un km^2 , en las cartas topográficas 1:50 000.



*Figura 1-7 Obtención de área por medio de conteo de cuadros
Fuente: captura de pantalla elaboración propia*

Aunque no todo los cuadros que están dentro del área de la cuenca están completos lo que dificulta, el conteo de éstos y deja a la apreciación del técnico o ingeniero el área que le dará a cada uno de ellos.



*Figura 1-8 Área irregular sujeta a apreciación
Fuente captura de pantalla elaboración propia*

Otra forma de obtener el área de una cuenca es usando un instrumento llamado planímetro, el cual es un aparato de medición utilizado para el cálculo de áreas irregulares aunque tiene el inconveniente de que su precio es elevado.



Figura 1-9 Planímetro

Fuente <http://www.gisiberica.com/Plan%EDmetros/plan%EDmetros.htm>

También se puede medir el área por medio de un CAD, para ello es necesario realizar los siguientes pasos.

- 1- Importar la imagen de la carta topográfica y delimitar la cuenca, para ello es necesario trazar el parteaguas con todas las características mencionadas anteriormente, similarmente a como se hace en papel
- 2- Señalarle al programa el objeto (parteaguas) e indicarle que se necesita el área.
- 3- El programa indicará la superficie de la cuenca.

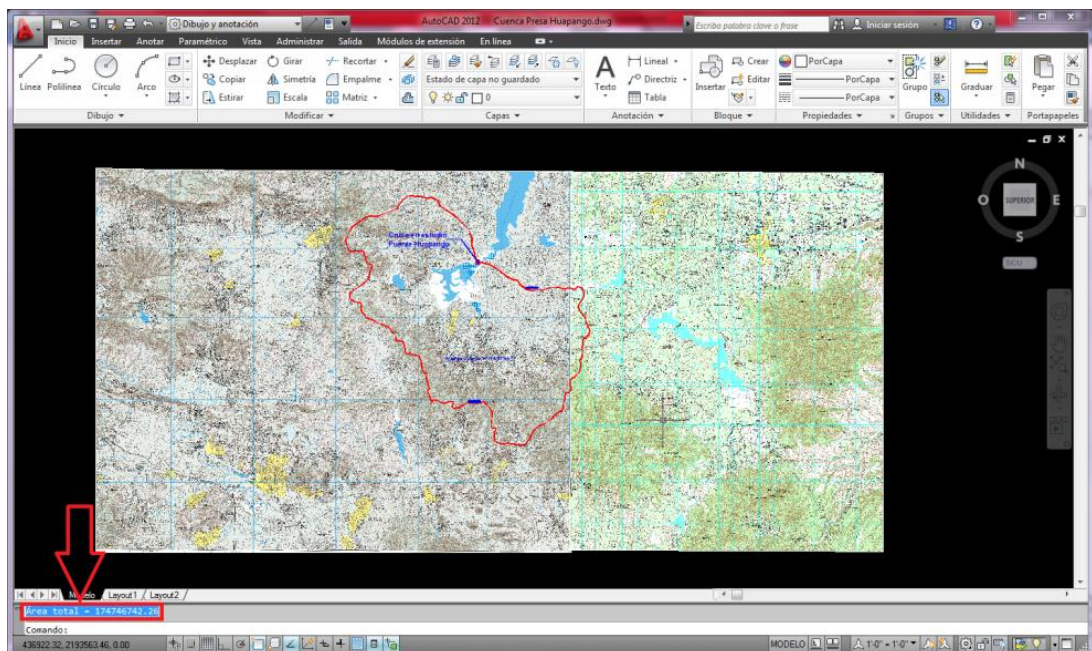


Figura 1-10 Obtención del área por medio de Autocad
Fuente: captura de pantalla elaboración propia

Área: 174.75 km²

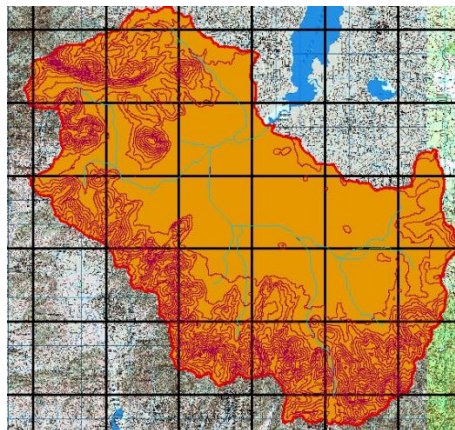
1.4 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

La determinación de la Pendiente Media de una Cuenca Hidrográfica, es una de las tareas no sólo más laboriosas, sino también más importantes en la realización de cualquier estudio hidrológico, esta Pendiente Media controla la velocidad con que se dará la escorrentía superficial en dicha cuenca.

1.4.1 CRITERIO DE HORTON

Consiste en trazar una malla de cuadrados sobre la proyección planimétrica de la cuenca orientándola según la dirección de la corriente principal. Si se trata de una cuenca pequeña, la malla llevará al menos cuatro (4) cuadros por lado, pero si se trata de una superficie mayor, deberá aumentarse el número de cuadros por lado, ya que la precisión del cálculo depende de ello.

Una vez construida la malla, en un esquema similar al que se muestra en la siguiente Figura.



*Figura 1-11 Trazado de cuadrícula para el método de Horton
Fuente captura de pantalla elaboración propia*

Medimos la pendiente en sentido horizontal.

- Contamos los puntos de intersección de las líneas horizontales con cualquier curva de nivel. En este ejemplo son 186 (sólo las intersecciones que se encuentran dentro de la cuenca)
- Medimos la longitud de los tramos horizontales de la rejilla dentro de los límites de la cuenca (en verde en el dibujo). En nuestro ejemplo, suman 54.83 km.

Y aplicamos la siguiente fórmula

$$S_x = \left(\frac{N_x}{L_x} \right) D$$

Donde:

S_x = Pendiente de la cuenca en la dirección X

N_x = Número de intersecciones de la curva de nivel con la malla en sentido X

L_x = Longitud total de las líneas de la malla en sentido X dentro de la cueca

D = Equidistancia entre curvas de nivel

$$S_x = \left(\frac{N_x}{L_x}\right) D = \left(\frac{186}{54830}\right) 30 = 0.1018 = 10.18\%$$

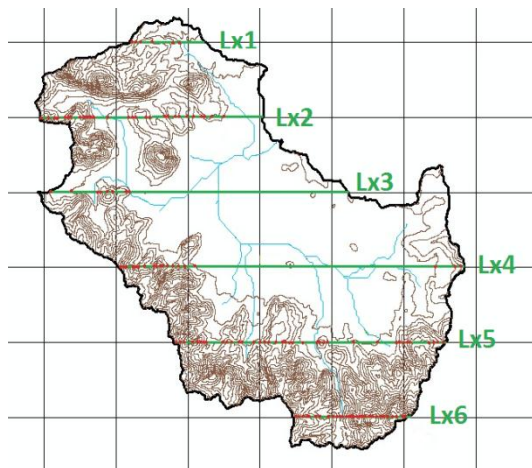


Figura 1-12 Puntos de intersección y longitudes Lx

Fuente elaboración propia

Tabla 1-1 Número de intersecciones y longitud en dirección X criterio HORTON

| NÚMERO DE LINEA | NÚMERO DE INTERSECCIONES (Nx) | LONGITUD DE Lx (Km) |
|-----------------|-------------------------------|---------------------|
| Lx1 | 6 | 3.1 |
| Lx2 | 34 | 9.27 |
| Lx3 | 16 | 12.33 |
| Lx4 | 33 | 14.43 |
| Lx5 | 56 | 11.19 |
| Lx6 | 41 | 4.51 |
| TOTALES | 186 | 54.83 |

Hacer lo mismo con las líneas verticales.

Tabla 1-2 Número de intersecciones y longitud en dirección Y criterio HORTON

| NÚMERO DE LINEA | NÚMERO DE INTERSECCIONES (Ny) | LONGITUD DE Ly (Km) |
|-----------------|-------------------------------|---------------------|
| Ly1 | 37 | 8.56 |
| Ly2 | 72 | 14.69 |
| Ly3 | 16 | 12.97 |
| Ly4 | 28 | 10.03 |
| Ly5 | 30 | 8.15 |
| TOTALES | 183 | 54.40 |

$$S_y = \left(\frac{N_y}{L_y}\right) D = \left(\frac{183}{54400}\right) 30 = 0.1009 = 10.09\%$$

Finalmente la ecuación de la pendiente media queda de la siguiente manera

Promedio aritmético

$$S_c = \frac{S_x + S_y}{2} = \frac{0.1018 + 0.1009}{2} = 0.1014$$

Promedio geométrico

$$S_c = \sqrt{S_x * S_y} = \sqrt{0.1018 * 0.1009} = 0.1013$$

1.4.2 CRITERIO DE NASH

Actuando en forma similar al criterio de Horton, se traza una cuadrícula en el sentido del cauce principal, que debe cumplir la condición de tener no menos de 30 intersecciones ubicadas dentro de la cuenca. En cada una de ellas se mide la distancia mínima (d) entre curvas de nivel, la cual se define: Como el segmento de recta de menor longitud posible que pasando por el punto de intersección, corta a las curvas de nivel más cercanas en forma aproximadamente perpendicular.

Para poder correlacionar el dibujo con los cálculos posteriores, se ha asignado un número a cada una de las líneas horizontales y una letra a las verticales, de esta forma podremos hacer referencia a los puntos.

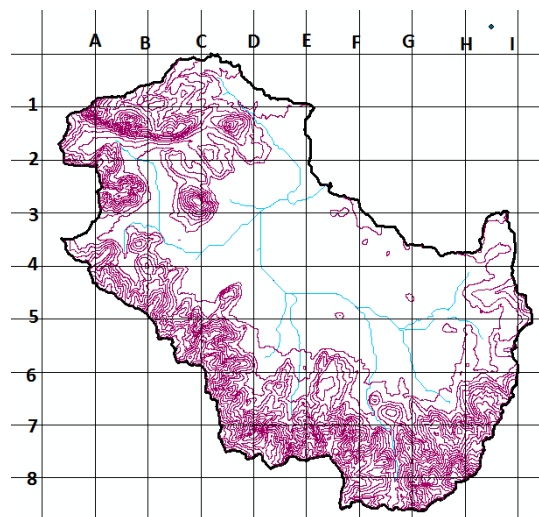


Figura 1-13 Cuadrícula con al menos 30 intersecciones, para el método de Nash
Fuente: captura de pantalla elaboración propia

Por ejemplo, en el punto 1c, tenemos lo siguiente $d_i=356.55m$, hacemos esto con al menos 30 intersecciones

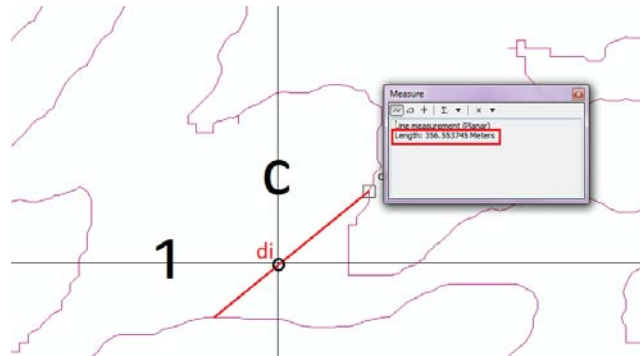


Figura 1-14 Distancia mínima entre dos curvas pasando por el punto de intersección
Fuente: captura de pantalla elaboración propia

Una situación especial, es cuando una curva de nivel no se puede intersectar con otra curva de nivel de elevación diferente a la de su punto inicial. Éste es el caso del Punto 2B y el 4B, lo que implicaría que el terreno es horizontal (pendiente 0) lo cual, si bien no es una situación imposible, no es del todo cierto, en estos casos la pendiente se considerará nula y estos son los puntos que no se tomaran en cuenta para el cálculo de la pendiente media.

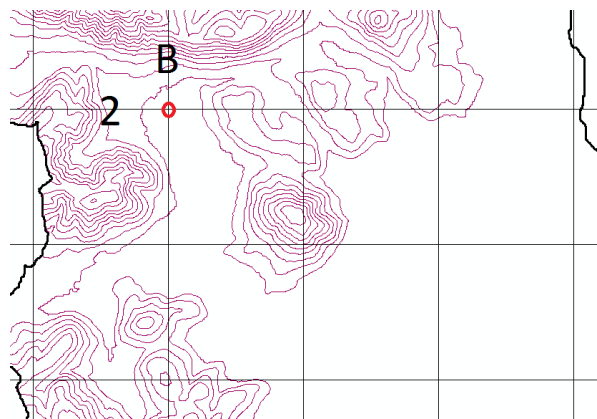


Figura 1-15 Caso especial en el que no es posible unir dos curvas de diferentes cotas
Fuente: captura de pantalla elaboración propia

$$S = \frac{\sum S_i}{n}$$

Donde:

S = pendiente media de la cuenca

S_i = pendiente en cada uno de los puntos de intersección con la malla

n = número total de intersecciones detectadas

$$S = \frac{\sum S_i}{n} = \frac{5.09913197}{39} = 0.1307$$

Tabla 1-3 Cálculo de la pendiente de la cuenca según NASH

| INTERSECCIÓN | COORDENADAS | | DISTANCIA MÍNIMA (m) | PENDIENTE |
|--------------|-------------|---|-------------------------|------------|
| 1 | 1 | A | 34.64 | 0.57736721 |
| 2 | 1 | B | 219.98 | 0.13637603 |
| 3 | 1 | C | 356.55 | 0.08413967 |
| 4 | 1 | D | 1317.92 | 0.02276314 |
| 5 | 2 | A | 77.75 | 0.38585209 |
| 6 | 2 | B | 0 | 0 |
| 7 | 2 | C | 229.05 | 0.13097577 |
| 8 | 2 | D | 154.52 | 0.19414962 |
| 9 | 2 | E | 4146.55 | 0.00723493 |
| 10 | 3 | B | 1919.65 | 0.01562785 |
| 11 | 3 | C | 68.29 | 0.43930297 |
| 12 | 3 | D | 4367.5 | 0.00686892 |
| 13 | 3 | E | 4637.5 | 0.006469 |
| 14 | 4 | A | 139.58 | 0.21493051 |
| 15 | 4 | B | 0 | 0 |
| 16 | 4 | C | 6149.32 | 0.00487859 |
| 17 | 4 | D | 6015.09 | 0.00498746 |
| 18 | 4 | E | 5333.97 | 0.00562433 |
| 19 | 4 | F | 4119.29 | 0.00728281 |
| 20 | 4 | G | 3182.6 | 0.00942626 |
| 21 | 4 | H | 3713.72 | 0.00807815 |
| 22 | 5 | C | 109.7 | 0.27347311 |
| 23 | 5 | D | 5401.94 | 0.00555356 |
| 24 | 5 | E | 3217.62 | 0.00932366 |
| 25 | 5 | F | 3983.53 | 0.00753101 |
| 26 | 5 | G | 3823.21 | 0.00784681 |
| 27 | 5 | H | 1189.38 | 0.02522323 |
| 28 | 5 | I | 851.82 | 0.03521871 |
| 29 | 6 | D | 166.13 | 0.18058147 |
| 30 | 6 | E | 302.73 | 0.09909821 |
| 31 | 6 | F | 309.04 | 0.09707481 |
| 32 | 6 | G | 2460.04 | 0.01219492 |
| 33 | 6 | H | 491.49 | 0.06103888 |
| 34 | 7 | D | 61.97 | 0.48410521 |
| 35 | 7 | E | 108.01 | 0.27775206 |
| 36 | 7 | F | 157.58 | 0.19037949 |
| 37 | 7 | G | 405.74 | 0.07393898 |
| 38 | 7 | H | 162.98 | 0.18407167 |
| 39 | 8 | F | 185.72 | 0.16153349 |
| 40 | 8 | G | 142.59 | 0.21039344 |
| 41 | 8 | H | 68.11 | 0.44046396 |
| | | | $\sum S_i =$ | 5.09913197 |

1.5 PENDIENTE DEL CAUCE APLICANDO EL MÉTODO DE TAYLOR Y SCHWARZ

La pendiente de un cauce influye sobre la velocidad de flujo y por lo tanto juega un papel muy importante, En general, la pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo, Esta definición se aproxima al valor real de la pendiente cuando es reducida la longitud del tramo.

En consecuencia, la pendiente media del cauce principal se aproximará más al real, mientras mayor sea el número de tramos seleccionados a lo largo del cauce. De acuerdo con el criterio de Taylor y Schwarz, se considera que el río puede estar formado por una serie de tramos de igual longitud o bien por tramos de longitud variable. La pendiente media para tramos de igual longitud se determina con la expresión:

$$S = \left(\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right)^2$$

Donde:

S = pendiente media de cauce

S_i = pendiente del tramo i

m = numero tramos de igual longitud

La pendiente media para tramos de longitud variable se calcula con la siguiente ecuación.

$$S = \left(\frac{L_T}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right)^2$$

Donde:

S = pendiente media de cauce

S_i = pendiente del tramo i

m = numero tramos de igual longitud

Tabla 1-4 Cálculo de la pendiente del cauce según Taylor-Schwart

| TRAMO | LONGITUD | COTA INICIAL | COTA FINAL | DESNIVEL | S_i | $\sqrt{S_i}$ | $\frac{longitud}{S_i}$ |
|-------|----------|--------------|------------|----------|----------|--------------|------------------------|
| 1 | 9379.95 | 2612 | 2620 | 8 | 0.000853 | 0.029204 | 321185.40 |
| 2 | 3434.01 | 2620 | 2640 | 20 | 0.005824 | 0.076316 | 44997.39 |
| 3 | 932.16 | 2640 | 2660 | 20 | 0.021456 | 0.146477 | 6363.86 |
| 4 | 751.06 | 2660 | 2680 | 20 | 0.026629 | 0.163184 | 4602.53 |
| 5 | 841.43 | 2680 | 2700 | 20 | 0.023769 | 0.154172 | 5457.73 |
| 6 | 681.64 | 2700 | 2720 | 20 | 0.029341 | 0.171292 | 3979.40 |
| 7 | 661.19 | 2720 | 2740 | 20 | 0.030248 | 0.173921 | 3801.67 |
| 8 | 565.36 | 2740 | 2760 | 20 | 0.035376 | 0.188084 | 3005.89 |
| TOTAL | 17246.8 | | | 148 | | | 393393.869 |

Utilizando la ecuación desarrollada por Taylor y Schwarz para determinar la pendiente del cauce de un río, cuando está integrado por varios tramos, se obtiene el resultado siguiente:

$$S = \left(\frac{L_T}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right)^2 = \left(\frac{17246.8}{393,393.87} \right)^2 = 0.001922 = 0.1922\%$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS CARTOGRÁFICOS Y GEODÉSICOS

2.1 GEODESIA

El hecho de que la tierra no sea plana, y cuando el territorio que pretendemos estudiar es lo suficientemente extenso, la curvatura de la Tierra no puede ser ignorada. Este es el caso que vamos a encontrar cuando trabajemos con un SIG., y es por ello que los SIG implementan los elementos necesarios para poder efectuar un manejo de la información geográfica riguroso y acorde con los conceptos de la geodesia.

La geodesia es la ciencia que desarrolla y estudia los métodos, tecnologías y procedimientos dirigidos a determinar con exactitud el tamaño y la forma de la Tierra o parte de ella, incluyendo su campo gravitacional externo.

En la actualidad los sensores remotos transportados en satélites espaciales y plataformas aéreas así como las mediciones terrestres, se emplean para determinar la posición y la velocidad de los puntos u objetos ubicados sobre la superficie terrestre u orbitando el planeta, utilizando para ello un sistema de referencia terrestre materializado, apoyándose en la matemática, la física, la astronomía y las ciencias de la computación.

El campo de la geodesia se ha extendido al estudio de tamaño y forma de planetas y sus satélites, así como sus cambios.

Los datos geodésicos son útiles para:

- Referir levantamientos cartográficos y levantamientos catastrales
- Análisis espacial de cartografía temática en sistemas de información geográfica
- Estudios de geodinámica terrestre
- Referir geográficamente vías de comunicación
- Inventarios de los recursos del país
- Establecer las bases geodésicas para la definición de límites municipales, estatales e internacionales

De estas aplicaciones, se puede apreciar que el campo de la geodesia está asociado a la satisfacción de necesidades sociales, económicas, políticas, de conservación del medio ambiente y del aprovechamiento de recursos del espacio aéreo, terrestre y marino, entre otras.

Se debe considerar que los datos que aporta la Geodesia no son finitos, se conoce la dirección geográfica de un sitio de interés para un tiempo dado, más la Tierra se mueve y los fenómenos naturales pueden cambiar la geografía de un día para otro.

Por lo tanto, esta ciencia contribuye al estudio de las variaciones de la superficie terrestre a través del tiempo, lo cual se cuantifica para evaluar los fenómenos dinámicos de nuestro planeta.

El uso del tiempo y la representación de datos mediante símbolos, siempre ha tenido un interés especial. Vemos que, el uso de pequeñas fracciones de tiempo y direcciones geográficas precisas determinan el éxito en el aterrizaje de un avión con ¡cero visibilidad!, en la localización de personas extraviadas, para que un discapacitado visual cruce una calle sin ayuda, y más. ¡Nos movemos en tiempo real! dentro del espacio físico que ocupamos.

2.2 LA GEODESIA EN MÉXICO

En México, el conocimiento de la Geodesia se remonta a la era prehispánica. El calendario azteca es testimonio histórico de la comprensión de la astronomía por parte de nuestros antepasados, así como las pirámides de Teotihuacán, cuyas construcciones y disposición geométrica tienen una escala relacionada con las dimensiones de la Tierra y una orientación referida a los cuerpos de nuestro sistema solar.

La actividad geodésica ha recorrido un largo camino desde la era de las cintas para medir y los aparatos conocidos como teodolitos. Gracias a los avances de la tecnología, es posible contar con instrumentos y equipos electrónicos, ópticos, inerciales y de rayo láser; además del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) los sensores remotos y las computadoras; los cuales ayudan a resolver los problemas de posicionamiento geodésico.

2.3 SISTEMAS DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Si queremos ubicar varios puntos dibujados sobre un papel, lo único que debemos hacer es trazar un sistema de coordenadas cartesiano con dos ejes, pero si la superficie del papel estuviese curvada y arrugada, la construcción del sistema de coordenadas y su lectura supondrán un problema complejo: esta es la situación que nos encontramos cuando pretendemos medir posiciones sobre la superficie esférica e irregular de la Tierra.

Las coordenadas geográficas van a definir un sistema de referencia tridimensional de localización en la superficie de la tierra. Para ello se requieren tres elementos:

- 1.-Unidades de medida angulares desde el centro de la tierra, grados, radianes, etc. Que definen una red de meridianos y paralelos
- 2.-La elección de un meridiano de origen, o primer meridiano- en muchos casos Greenwich desde los acuerdos internacionales de 1884
- 3.-La elección de un Datum que a su vez necesita de la consideración de: (a) un elipsoide que defina el achatamiento terrestre; (b) un geoide que defina la forma aproximada de la Tierra.

2.4 LÍNEAS DE REFERENCIA DEL GLOBO TERRESTRE

Un punto sobre la superficie de terrestre está definido por sus valores de latitud, longitud y altitud. La latitud y la longitud son medidas angulares calculadas desde el centro de la tierra. La altitud lo será dese la superficie del geoide. Para dar un sentido a la medida de los ángulos, se establece dos planos de referencia que dividen a la Tierra horizontal y verticalmente

El plano horizontal está marcado de forma natural por el ecuador, y cualquier punto situado al norte de este plano podrá ser medido con grados denominados de latitud N, o grados con signo positivo, y cualquier punto situado al sur será medido con grados de latitud S o grados con signo negativo con un rango entre $+90^{\circ}\text{N}$ y -90°S .

La latitud es el ángulo entre la línea que une el centro de la esfera con un punto de su superficie y el plano ecuatorial. Las líneas formadas por puntos de la misma Latitud se denominan paralelos y forman círculos concéntricos paralelos al ecuador. Por definición la latitud es de 0° en el ecuador, que divide el globo en los hemisferios norte y sur.

El plano vertical es artificial y muchas naciones, en distintos periodos de su historia, han mantenido uno o varios meridianos de origen en sus cartografías, estando generalizado en la actualidad el uso del establecido en el observatorio Astronómico de Greenwich (Londres). La longitud es el ángulo formado entre dos de los planos que contienen a la línea de los Polos.

El primero es un plano arbitrario que se toma como referencia y el segundo es el que, además de contener a la línea de los polos, contiene al punto en cuestión. Las líneas formadas por puntos de igual longitud se denominan meridianos y convergen en los polos.

Los grados hacia el este o hacia el oeste del meridiano de origen serán medidos como grados de longitud. Grados con signo positivo hacia el este y con signo negativo hacia el oeste, con un rango entre $+180^{\circ}\text{E}$ y -180°O

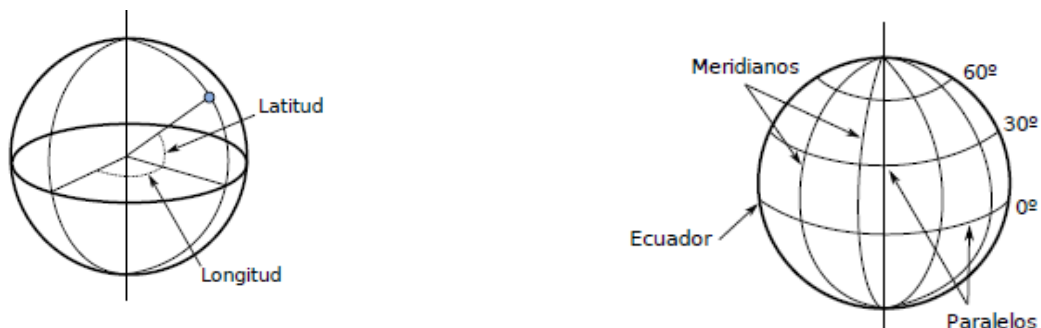


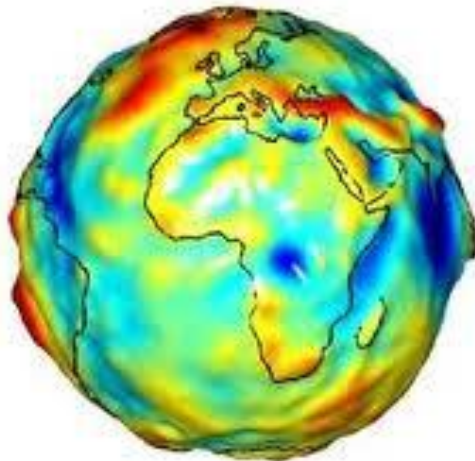
Figura 2-1 Esquema de los elementos del sistema de coordenadas geográficas
Fuente: de Sistemas de información geográfica, Víctor Olaya

Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad, especialmente cuando se trabaja con grandes regiones. No obstante, no se trata de un sistema cartesiano, y tareas como la medición de áreas o distancias es mucho más complicada.

Si bien la distancia entre dos paralelos es prácticamente constante ya que un grado de latitud equivale más o menos a una misma distancia en todos los puntos, es decir un grado de latitud varía su valor entre 110.6km en el Ecuador y 111.7 km. en los polos. La distancia entre dos meridianos no lo es, y varía entre unos 11,3 kilómetros en el Ecuador hasta los cero kilómetros en los polos, donde los meridianos convergen.

2.5 ESFERAS Y GEOIDES

El sistema de coordenadas de la superficie de la Tierra descrito puede ser representado sobre una esfera perfecta para facilitar así los cálculos, lo que es pertinente en muchas aproximaciones cartográficas, especialmente cuando se trabaja a escalas pequeñas o inferiores a 1: 5 000 000. A estas escalas las irregularidades en la forma de la tierra y las diferencias de altitud en su superficie son percibidas como insignificantes.



*Figura 2-2 Representación gráfica del geoide
Fuente: www.cali.gov.com*

Bajo estas condiciones se considera que cada uno de los radios o semiejes de la esfera terrestre mide 6, 370, 997 m. O si se quiere se puede considerar una esfera de 6, 371 km.

Aunque las diferencias entre la forma real de la Tierra y la de una esfera perfecta, como la anteriormente considerada, son relativamente pequeñas si consideramos la Tierra en su conjunto, adquieren una importancia grande a escalas mayores de 1: 1 000 000 dando lugar a problemas de exactitud en la confección de mapas. Dos son las causas de esta divergencia: en primer lugar el achatamiento que ha sufrido la Tierra en sus polos (de más de 21.5 km. en cada eje), como

consecuencia entre otros motivos, de su constante giro; en segundo lugar, por la desigual distribución de las masas terrestres, puesto que afecta a la dirección de la gravedad que es la que determina la horizontal y la vertical de cada lugar, de lo cual depende buena parte de las observaciones locales.

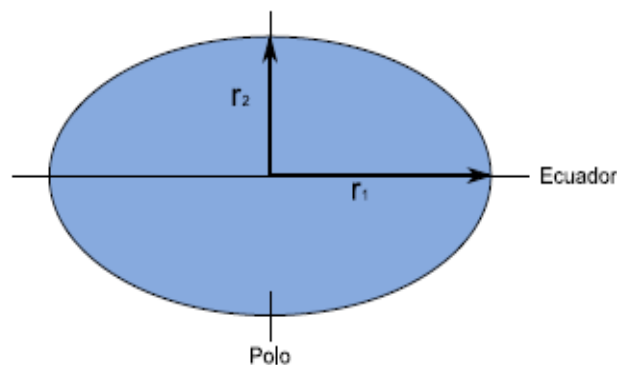
La forma que adquiere la Tierra considerando los factores anteriores, no es ya la de una esfera, sino más bien la de un esferoide, es decir, la de una figura que se aproxima a la forma de la esfera.

En realidad su forma es irregular única y por tal motivo el término más apropiado es el de geoide, de cuya forma y medición se encarga la geodesia. El geoide no es una representación matemática, y se define como la superficie equipotencial del nivel medio del mar, lo que significa que cualquier punto ha de ser perpendicular con la dirección de la gravedad.

Dado que las masas de agua se ven afectadas por las atracciones planetarias, en especial de la luna y el sol, provocando cambios constantes en su nivel, el cálculo de su media ha de realizarse tras periodo de medición constantes en 18.6 años (ciclo completo lunar), para promediar entre las altas y bajas mareas astronómicas, las mareas vivas y muertas máximas y mínimas, y obtener con ello un nivel que permita asignar la altitud 0 a una superficie situada entre la más baja de las mareas astronómicas y las más bajas de las mareas muertas.

2.6 ELIPSOIDES

En realidad, la Tierra no es una esfera perfecta, ya que su propia rotación ha modificado esa forma y ha provocado un achatamiento en los polos. Esta hipótesis fue ya planteada por Newton, y corroborada posteriormente con numerosas experiencias. No obstante, podemos seguir tratando de asimilar la forma de la Tierra a la de una superficie teórica, aunque no ya la de una esfera sino a la que se denomina un elipsoide. Sobre un elipsoide, el radio de la Tierra ya no es constante, sino que depende del emplazamiento



*Figura 2-3 Parámetros que definen el elipsoide
Fuente: Sistemas de información geográfica, Víctor Olaya*

Pero para poder elaborar mapas con precisión se requiere de una superficie de referencia geométrica regular, por ello las observaciones sobre el geoide se transfieren a la figura regular matemáticamente operable que más se le parece, que es la del elipsoide, lo cual permite la aplicación de conceptos geométrico; estableciendo así una base práctica para el trabajo con coordenadas y la definición de un sistema de referencia.

Llegados a este punto, conviene recordar que la creación de estas superficies es consecuencia de las dificultades que supone medir y conocer con precisión la forma exacta de la superficie terrestre.

Al no tener los dos ejes iguales, como en la esfera, la forma del elipsoide es definida mediante la relación entre los radios ecuatoriales y polares, o semiejes mayor y menor respectivamente.

Los intentos por medir la longitud exacta de estos ejes, y de adaptar la curvatura del elipsoide a una superficie terrestre concreta, realizadas por distintos países o instituciones científicas, ha dado lugar a la existencia, en los últimos doscientos años, de muy diversas medidas de elipsoides.

Tabla 2-1 Nombre del elipsoide y año de cálculo, medida del semieje mayor e índice de aplanamiento

| PRINCIPALES ELIPSOIDES MEDIDOS EN LOS SIGLOS XIX Y XX | | |
|--|------------------------|------------------------------------|
| Elipsoide | Semieje Mayor a (m) | $\frac{1}{f(\text{Aplanamiento})}$ |
| Airy 1830 | 6,377,563.396 | 299.3249646 |
| Everest 1830 | 6,377,276.345 | 300.8 |
| Bessel 1841 | 6,377,397.16 | 299.1528128 |
| Clarke 1866 | 6,378,206.40 | 294.9786982 |
| internacional 1924 (Hayford) | 6,378,388.00 | 297 |
| América del sur (1969) | 6,378,160.00 | 298.25 |
| WGS72 | 6,378,135.00 | 298.26 |
| WGS84 | 6,378,137.00 | 298.2572236 |

El conocimiento de las medidas del elipsoide empleado en cada momento es imprescindible si se quieren hacer coincidir cartografías realizadas con bases distintas.

Para hacer comparables las diversas mediciones sobre estos semiejes, se establece un índice; el índice de achatamiento o aplanamiento f , representado por una fracción decimal de la diferencia de longitud de los dos ejes.

$$\frac{1}{f} = \frac{\text{semieje}_{\text{mayor}}(a) - \text{semieje}_{\text{mayor}}(b)}{\text{semieje}_{\text{mayor}}(a)}$$

Desde 1970 (1968 en la cartografía militar) se adoptó el de Hayford medido en 1909 y denominado Internacional desde 1924, con $f = 1/297$ y $a = 6,378,388$ m, que es el utilizado por los países europeos tras la segunda guerra mundial. En ese momento, el meridiano de origen pasa a ser el del observatorio de Greenwich.

El elipsoide WGS-84 es muy empleado en la actualidad, pues es el utilizado por el sistema GPS.

2.7 DATUM

Es el conjunto formado por una superficie de referencia (elipsoide) y un punto en el que coincide con el geoide, este punto se denomina punto astronómico fundamental, y en el elipsoide es tangente al geoide. La altura geoidal en este punto es, como cabe esperar, igual a cero. La vertical al geoide y al elipsoide son idénticas en el punto fundamental.

Para un mismo elipsoide pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datum y a distintas coordenadas para un mismo punto.

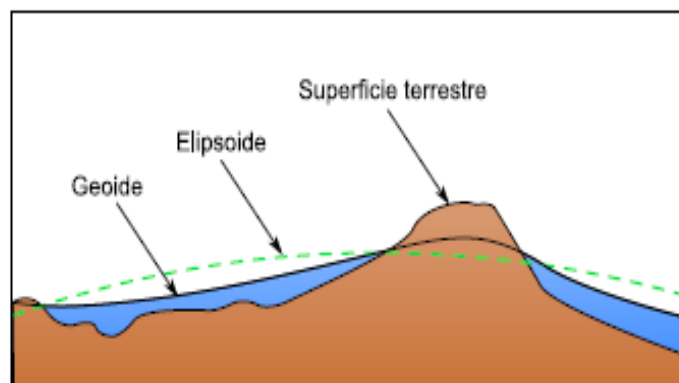


Figura 2-4 Relación geoide-elipsoide
Fuente: Sistemas de información geográfica Víctor Olaya

2.8 EL SISTEMA DE REFERENCIA EUROPEO

En el caso de la cartografía europea, el datum actualmente en uso se midió tras la segunda guerra mundial, en la torre de Helmert en Potsdam (Alemania) tomando como elipsoide de referencia el obtenido por Hayford en 1909, pasando a

denominarse European Datum de 1950 (ED50). Es el datum adoptado en cartografía oficial europea y el del Mapa Topográfico nacional desde 1970.

Un nuevo sistema de referencia de alta precisión ha sido ya medido y próximamente sustituirá al European Datum de 1950 en la cartografía oficial, es del sistema de Referencia Terrestre Europeo (ETR89). En España está basado en una nueva red geodésica tridimensional (precisa, uniforme y homogénea) denominada REGENTE (Red Geodésica Nacional Mediante Técnicas Espaciales) enlazada al sistema europeo con coordenadas de exactitud centimétrica y precisión 100 veces superior a la anterior.

Todo esto va a tener una gran repercusión en las actividades cotidianas y en los Sistemas de Información Geográfica que las gestionen. El conocimiento de los procesos implicados en la transformación de coordenadas cobra así importancia, pues contra lo que comúnmente se cree, no estará exactamente en el mismo lugar un punto situado a 50° N y 25° E en todos los sistemas de referencia terrestre, en función del elipsoide de partida considerado.

Ya que las distancias radiales son distintas y en consecuencia los ángulos que nos posibilitan los cálculos de distancias desde un meridiano de origen: estas diferencias pueden variar entre varios metros hasta centenares.

2.9 SISTEMA DE REFERENCIA EN MÉXICO

En México se han utilizado diversos datums a lo largo de la historia, el INEGI es la institución que se encarga de realizar acciones para que la información geográfica sea comparable en tiempo y espacio

2.9.1 NAD27

Hasta 1998 se utilizó oficialmente en México el NAD27 (North American Datum of 1927) de acuerdo a las normas oficiales del INEGI y modificadas ese mismo año, como referencia para los levantamientos horizontales, es por eso que lo debemos tener muy en cuenta ya que gran parte de la cartografía existente esta referenciada o ubicada dentro de este datum.

Datum que es por definición incompatible con los sistemas modernos por ser un sistema de referencia regional que emplea un elipsoide no geocéntrico, en la actualidad ya no podemos seguir ocupando este datum ya que las nuevas tecnologías como el GPS proporcionan precisiones mayores que hacen necesario ocupar otro datum acorde a tales dimensiones

2.9.2 NAD83

Es el datum oficial de los Estados Unidos de Norteamérica, solo se debe considerar este datum en cartografía de la frontera norte y solo en algunos casos.

De acuerdo a las definiciones anteriores, el ITRF2008 es el conjunto de estaciones materializadas alrededor de la superficie terrestre y sus coordenadas asociadas, que pueden ser posicionadas con instrumentos de medición como estación total o receptores GPS para propagar coordenadas ITRF2008 a otros puntos. En nuestro país, la materialización del ITRF2008 se da a través de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), y su densificación se logra por medio de levantamientos GPS sobre marcas o monumentos en toda la República, marcas que conforman la red geodésica pasiva. Actualmente la RGNA está conformada a la fecha por 22 estaciones que registran continuamente datos de los satélites GPS.

2.10 SISTEMA DE PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

A pesar de su innegable utilidad y la potencia que nos brindan para la localización de cualquier punto sobre la superficie terrestre, un sistema de coordenadas esféricas tiene muchos inconvenientes a la hora de tratar de hacer una representación visual de la información cartográfica, lo habitual es hacerlo en una superficie plana, ya sea en un pliego de papel o en un dispositivo como una pantalla.

Por todo ello, se deduce que existe una necesidad de poder trasladar la información geográfica (incluyendo, por supuesto, la referente a su localización) a un plano, con el objeto de poder crear cartografía y simplificar gran número de operaciones posteriores, el proceso de asignar una coordenada plana a cada punto de la superficie de la Tierra que nos es plana, se conoce como proyección cartográfica.

Es decir una proyección cartográfica es la correspondencia matemática biunívoca entre los puntos de una esfera o elipsoide y sus transformados en un plano

Se puede pensar que podemos obtener una representación plana de la superficie de una esfera o un elipsoide si tomamos esta y la extendemos hasta dejarla plana, sin embargo esto es imposible ya que dicha superficie no se puede desarrollar y quedar plana, por lo tanto hay que buscar una forma distinta de relacionar los puntos de la superficie tridimensional con los puntos en el plano, aunque inevitablemente aparecerán distorsiones. Las distorsiones se producen básicamente en tres aspectos:

- a) Los ángulos, esto es en la relación angular que separan unos puntos a los otros, lo que influye en la forma que presentaran los objetos cartográficamente.
- b) Las distancias, o proporción entre la real y la del mapa representado a escala.
- c) En el área o superficie de las entidades geográficas.

2.10.1 TIPOS DE PROYECCIONES

Las proyecciones se clasifican según la superficie sobre la que se proyectan los puntos. Las superficies más habituales son el plano, el cono y el cilindro

- a) Cónicas. La superficie desarrollable es un cono, que se sitúa generalmente tangente o secante en dos paralelos a la superficie del elipsoide. Es este caso la distorsión se minimiza en las áreas entre dichos paralelos, haciéndola útil para representar franjas que no abarquen una gran distancia en latitud, pero poco adecuada para representación de grandes áreas.

En esta proyección la distorsión aumenta conforme nos alejamos del centro del mapa hacia el este y oeste.

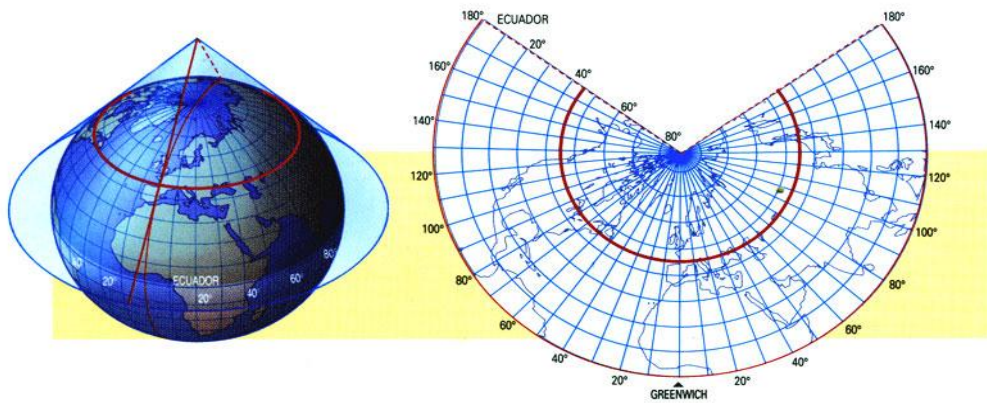


Figura 2-6 Proyección cónica

Fuente <http://carto1mexico-velazquez.blogspot.mx/2013/03/los-metodos-de-representacion.html>

- b) Cilíndricas. La superficie desarrollable es un cilindro. Al proyectar los meridianos se convierten en líneas paralelas, así también los paralelos, aunque la distancia entre los meridianos no es constante. En su concepción más simple, el cilindro se sitúa de forma tangente al Ecuador.

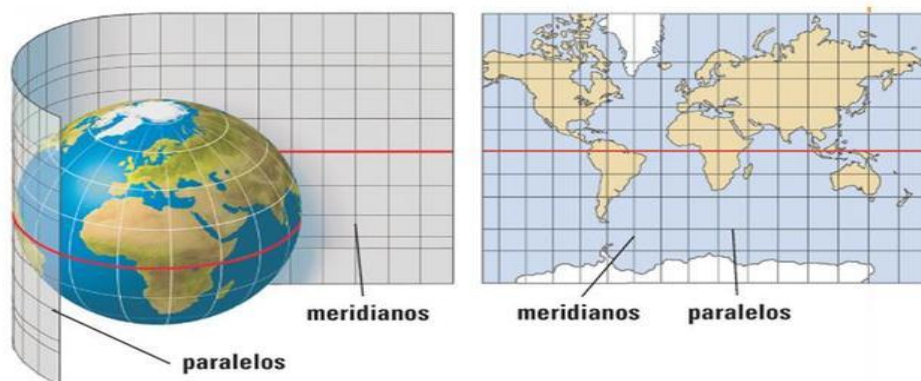


Figura 2-7 Proyección cilíndrica

Fuente: <http://carto1mexico-velazquez.blogspot.mx/2013/03/los-metodos-de-representacion.html>

Es una de las más utilizadas, aunque por lo general en forma modificada, debido a las grandes distorsiones que ofrece en las zonas de latitud elevada, lo que

impide apreciar a las regiones polares en su verdadera proporción. Es utilizada en la creación de algunos mapamundis

c) Planas o Azimutales. La superficie desarrollable es directamente un plano, tenemos distintos tipos en función de la posición del punto de fuga:

-Gnómica o central. El punto de fuga se sitúa en el centro del elipsoide

-Estereográfica. El plano es tangente y el punto de fuga se sitúa en las antípodas del punto de tangencia. La proyección polar estereográfica es empleada habitualmente para cartografiar las regiones polares.

-Ortográfica. El punto de fuga se sitúa en el infinito

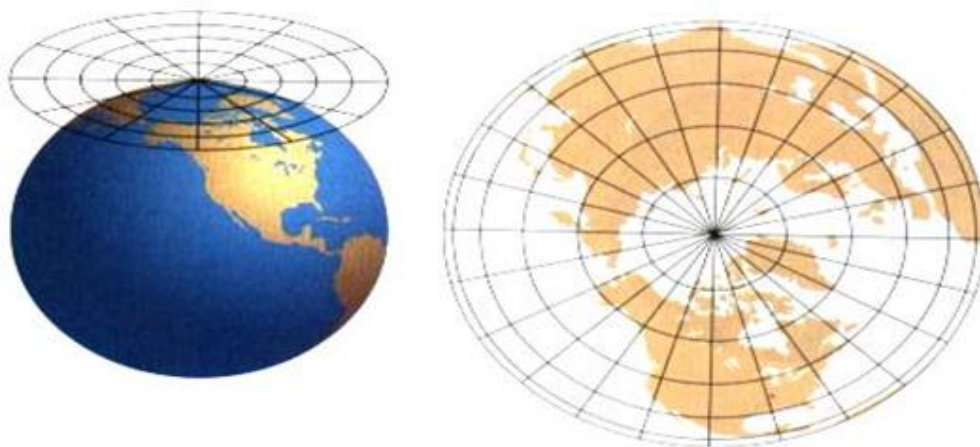


Figura 2-8 Proyección plana

: <https://sites.google.com/site/elrincondelsabersantafe/proyecciones-g>

2.11 EL SISTEMA UTM

En la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección universal transversa de Mercator, la cual da lugar al sistema de coordenadas UTM. Este sistema fue desarrollado por el prolífico matemático y cartógrafo alsaciano Johann Heinrich Lambert (1728-1777), no es simplemente una proyección, sino que se trata de un sistema completo para cartografiar la totalidad de la tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas, actualmente se emplea únicamente el elipsoide (WGS-84)

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos. La cuadrícula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de 6 ° de longitud. El huso 1 se sitúa entre los 180° y 174°O, y la numeración avanza hacia el Este.

En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van desde los 80°S hasta los 84°N. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

Una zona UTM se localiza, por tanto, con un número y una letra, y es en función de la zona como posteriormente se dan las coordenadas que localizan un punto. Estas coordenadas se expresan en metros y expresan la distancia entre el punto y el origen de la zona UTM en concreto. El origen de la zona se sitúa en el punto de corte entre el meridiano central de la zona y el ecuador. Por ejemplo, para las zonas UTM en el huso 31, el cual va desde los 0° hasta los 6°, el origen se sitúa en el punto de corte entre el ecuador y el meridiano de 3°.

Para evitar la aparición de números negativos, se considera que el origen no tiene una coordenada X de 0 metros, sino de 500000. Con ello se evita que las zonas al Este del meridiano central tengan coordenadas negativas, ya que ninguna zona tiene un ancho mayor de 1000000 metros (el ancho es máximo en las zonas cerca del ecuador, siendo de alrededor de 668 kilómetros). Por eso siempre se usa un valor de (Easting) de no más de 6 dígitos cuando se expresa en metros.

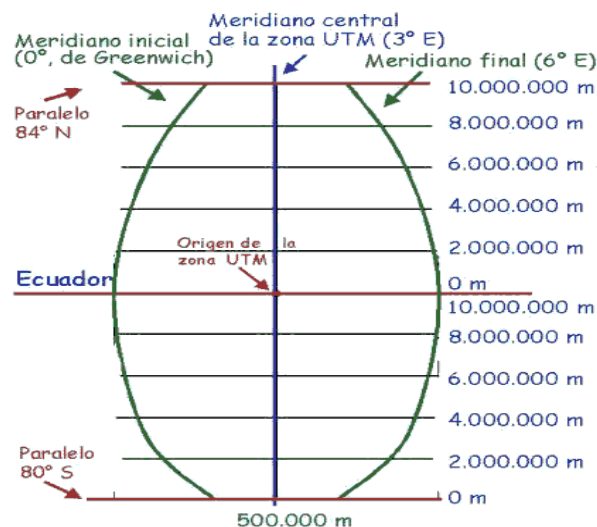


Figura 2-9 Esquema de una zona UTM

.Fuente: http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas_utm.html

De igual modo, cuando se trabaja en el hemisferio sur (donde las coordenadas Y serían siempre negativas), se considera que el origen tiene una coordenada Y de 10000000 metros, lo cual hace que todas las coordenadas referidas a él sean positivas. Por eso siempre se usa un valor de Northing de no más de 7 dígitos cuando se expresa en metros. Por esta razón siempre se usa un dígito más para expresar la distancia al norte (Northing) que la distancia al este (Easting). El sistema UTM no es capaz de representar una superficie curva, existe cierta distorsión. Considerando las 60 zonas UTM por separado, esta distorsión es inferior al 0,04%.

Para las zonas polares no resulta adecuado emplear el sistema UTM, ya que las distorsiones que produce son demasiado grandes. En su lugar, se utiliza el sistema UPS (Universal Polar Stereographic).

Siempre tendemos a pensar que el valor de una coordenada UTM corresponde a un punto determinado o a una situación geográfica discreta. Esto no es verdad. Una coordenada UTM siempre corresponde a un área cuadrada cuyo lado depende del grado de resolución de la coordenada. Cualquier punto comprendido dentro de este cuadrado (a esa resolución en particular) tiene el mismo valor de coordenada UTM. Mientras mayor sea el número de dígitos que usemos en las coordenadas, menor sea el área representada. Normalmente, el área que registran los GPS coincide con el valor de un metro cuadrado, ya que usan 6 dígitos para el valor de Easting y 7 dígitos para el Northing. México queda comprendido entre las zonas 11 y 16.

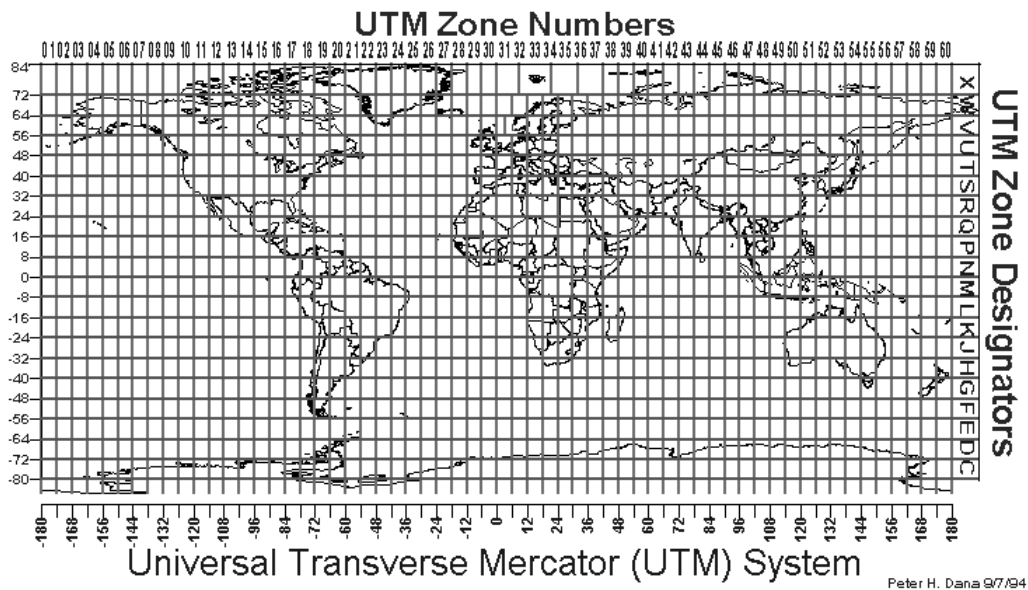


Figura 2-10 Cuadrícula UTM
 Fuente: <http://dbwww.essc.psu.edu/lasdoc/overview/geomreg/appe.html>

2.12 EL ORIGEN DE LOS MAPAS

Se ha dicho que la historia de los mapas es más antigua que la historia misma, evidentemente mucho antes de la invención de la escritura el hombre se ha comunicado o ha dejado constancia de sus pensamientos o intenciones por medio de signos o ideogramas.

En este sentido el mapa es una forma de expresión que permite transmitir experiencias sobre distancias, recorridos y localizaciones que ya desde tiempos remotos se ha utilizado por los pueblos cazadores y guerreros que tenían la necesidad de desplazarse de un lugar a otro.

El mapa tiene por objeto en cualquier cultura representar diversos puntos y accidentes de la tierra y la relación que entre ellos establece el hombre. Estas relaciones principalmente se determinan por la distancia y la dirección, la distancia no solo se expresaba en medidas lineales sino que muy frecuentemente en unidades de tiempo como (horas y días, etc.).

Las civilizaciones antiguas recurrieron como soporte de los mapas a una variedad de materias como: madera, piedra, tabletas de arcilla cocida e incluso pintada sobre la piel preparada de animales.

En América los incas, del Perú, los tallaban sobre piedras, como lo muestra la llamada (piedra de Saihuite) que representa una ciudad. De los Aztecas se conservan bastantes mapas que en general representan un aspecto muy decorativo; y en los que curiosamente representan con más interés hechos históricos que los propios detalles topográficos.

Los esquimales son famosos por la habilidad con que construyen sus mapas sobre madera o sobre piel de foca empleando colores para señalar la vegetación, las corrientes de agua, los lagos, las islas, etc.

Pero quizá los mapas primitivos más interesantes sean los de los indígenas de las islas Marshall formados por un armazón de cañas atadas con fibras de palma, señalando en ellos con pequeña conchas las islas y con cañas curvadas las corrientes marinas y los frentes de olas. Estos mapas pese a su aspecto rustico han servido a estos pueblos para orientarse en sus navegaciones cubriendo distancias enormes sobre el Pacífico.



Figura 2-11 Mapamundi más antiguo conocido

Fuente: una tablilla de arcilla cocida de origen Babilónico Fuente <http://varinia.es/blog/2012/04/>

El mapa más antiguo conocido es una placa de barro cocido precedente de Gasur, en el sur de Mesopotamia, y se conserva en el museo Semítico de la Universidad de Harvard data de 2500 A.C. y representa el valle de un río. En general los mapas babilónicos suelen ser, representaciones de tipo catastral.

Se han encontrado también en Mesopotamia representaciones del mundo, según la concepción babilónica, es decir, centrada en una masa continental en forma de disco rodeada por el mar.

Este universo circular del mapamundi de Babilonia se puede considerar como fuente de una de las grandes tradiciones de la cartografía, que a través del mundo clásico llega hasta finales de la edad media

En la Edad Media se produjo un retroceso en casi todos los ámbitos de la cultura debido, entre otras cosas, a las invasiones bárbaras, la caída del Imperio Romano y el derrumbamiento del comercio.

El renacimiento tres situaciones reactivaron el desarrollo de la cartografía: la recuperación de la obra de Ptolomeo, la obtención de información cada vez más precisa en distancias y formas a representar un sistema de impresión

La cartografía de los siglos XVIII y XIX. Europa sobresalió en este ámbito, especialmente Francia, donde se elaboraron los primeros mapas regionales y nacionales de su territorio. La expansión colonialista europea de la época, proporcióna la exploración de territorios en África, América y Oceanía y con ello, la aportación de nueva información que contribuyo a perfeccionar los mapas.

El siglo XX, la introducción de la aerofotografía entre otros avances, permitió el desarrollo cartográfico en zonas poco accesibles como selvas y pantanos con reducción en costos y tiempo de producción y por supuesto, en el logro de una mayor precisión en la información.

A esta tecnología se suma ahora el apoyo de satélites artificiales programados para enviar información a centros de cómputo especializados donde se elaboran cartas geográficas de una gran precisión.

En la actualidad se elaboran mapas que representan el relieve (topográficos), la naturaleza y disposición de las rocas (geológicos), ríos y lagos (hidrológicos), las características de los suelos (edafológicos), demarcaciones políticas etcétera.

En la elaboración de este tipo de representaciones destacan aspectos como un sistema de referencia, una escala, una simbología, una rosa de viento.

2.13 ESCALA

El concepto de escala es fundamental a la hora de trabajar con cartografía, y es uno de los valores básicos que definen toda representación cartográfica. Esta representación ha de tener un tamaño final manejable, con objeto de que pueda resultar de utilidad y permitir un uso práctico, pero el objeto que se cartografía (un país, un continente o bien la Tierra al completo) es un objeto de gran tamaño.

Esto hace necesario que, para crear un mapa, se deba reducir o bien el objeto original o bien el objeto ya proyectado, dando lugar a una versión (reducida) que ya cumple con los requisitos de tamaño adecuado.

Es decir, la escala es la relación existente entre una longitud cualquiera, medida sobre el mapa y la correspondiente longitud en el terreno. Conociendo esta relación podemos ya conocer las verdaderas magnitudes de los elementos que vemos en el mapa, ya que podemos convertir las medidas hechas sobre el mapa en medidas reales, es importante recordar que las medidas no son tan reales

puesto que la propia proyección las ha distorsionado. Las escalas más habituales son la numérica y la gráfica.

2.13.1 ESCALA NUMÉRICA

Es la relación expresada en números, de la distancia entre dos puntos de un mapa y la distancia real entre esos mismos puntos en el terreno; así por ejemplo, la escala 1:500 000 indica que 1 cm del mapa equivale a 500 000 cm en el terreno; es decir a 5000 metros o 5 km.

2.13.2 ESCALA GRÁFICA

Es una línea recta graduada, dividida en segmentos, que indica, simultáneamente, la longitud real en km o m y la longitud del mapa en centímetros. Es muy útil en las reducciones o ampliaciones de los mapas con escala numérica.

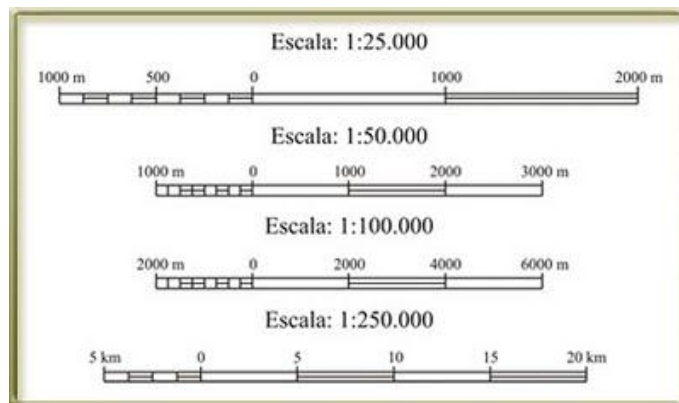


Figura 2-12 Representación de las diferentes escalas
fuente: http://entendiendolageografia.blogspot.mx/2011_03_01_archive.html

2.14 MAPAS MÁS USUALES.

Para cada necesidad existe un tipo diferente de mapa, algunos de uso muy especializado, son utilizados exclusivamente por ingenieros, economistas, agrónomos, geógrafos y otros; en cambio existen otros de uso común por ejemplo: mapas de carreteras, turísticos, los de división política en los que se pueden identificar países o ciudades importantes etc.

Dada la infinidad de mapas que pueden elaborarse y la cantidad de temas que se han de presentar, en cartografía se ha optado por clasificarlos en temáticos y generales.

Los temáticos destacan determinados aspectos de una región como el clima, las aguas superficiales y subterráneas, la geología entre otras características geográficas.

Los mapas generales se basan en mapas topográficos, éstos representan la configuración del terreno y los principales rasgos geográficos. Los mapas topográficos constituyen la cartografía básica en la que se basan los sistemas de información geográfica para elaborar los mapas.

2.15 MAPAS TOPOGRÁFICOS

En estos se representan detalles geográficos como poblaciones, montañas, ríos y caminos, entre otros, de la superficie de una región, mediante signos convencionales y el uso de diferentes escalas.

Debido a su estructura y enfoque, la cartografía topográfica sirve como apoyo a las actividades de estudio, análisis, programación y planeación en los niveles local, regional y nacional, a corto, mediano y largo plazo, por sector y rama de producción, y también desde las perspectivas rural y urbana.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), a través de la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, en el marco del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, realiza trabajos de cobertura nacional, que posibilitan la generación de archivos vectoriales para la cartografía topográfica digital.

Estos datos sirven como referencia visual para diferentes propósitos; tales como:

- Gestión de recursos e infraestructura
- Prevención de desastres
- Evaluación de pendientes
- Análisis visual de cuencas y de drenaje Planeación de distribución de recursos
- Toma de decisiones
- Análisis y estudios del territorio
- Estudios ambientales, entre otros.

Los principales rasgos representados son:

- Infraestructura de transporte: incluye las redes de transporte e instalaciones tales como las carreteras, caminos, aeropuertos, túneles, puentes, etc.

- Hidrografía: incluye los elementos superficiales de agua como lagos y estanques, ríos, canales y océanos.
- Información de localidades: incluye edificaciones, manzanas y vialidades.
- Nombres geográficos: corresponden a los nombres propios que se le asignan a un lugar o a un accidente geográfico, de tal manera que se constituyen en una importante referencia para la localización y el principal mecanismo para identificar un lugar.
- Datos de elevación: representan la configuración del relieve.
- Límites: representados por la división político-administrativa y del territorio del país como lo son los límites internacionales y líneas costeras.

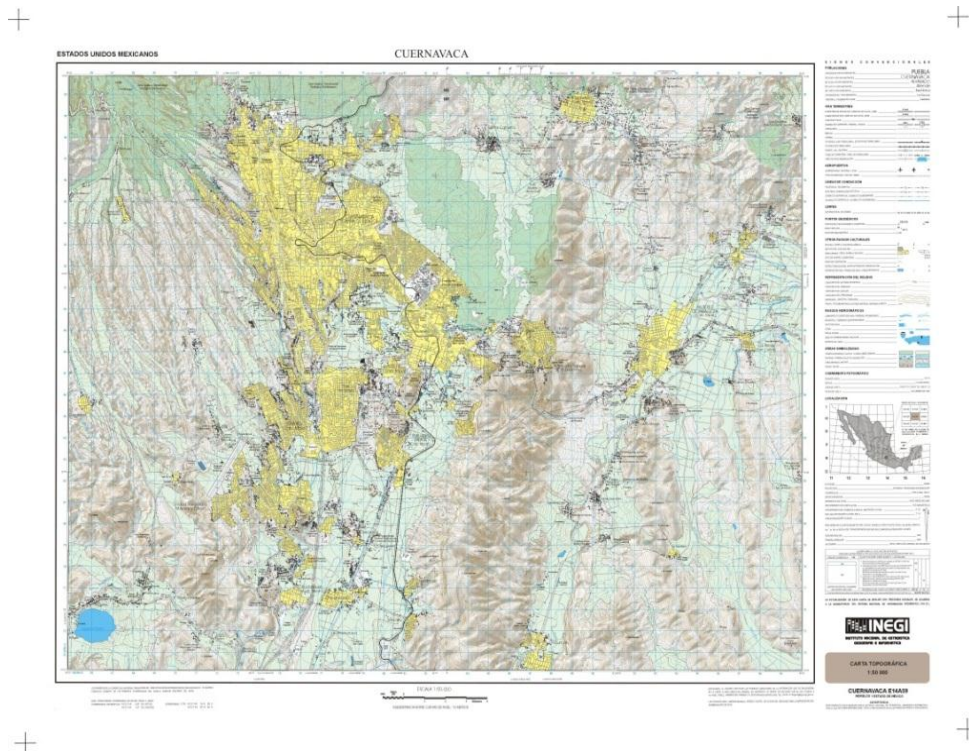


Figura 2-13 Carta Topográfica de Cuernavaca
 Fuente: INEGI. Productos y Servicios, Carta Topográfica

La Carta Topográfica permite “ver” de manera sintética la situación del territorio, y las necesidades actuales requieren de un detalle que permita a los gobiernos estatales y municipales, desarrollar actividades de planeación como seguimiento, tanto en el ámbito urbano como rural.

Adicionalmente, considerando que los efectos de las decisiones a nivel local provocan transformaciones que trascienden el ámbito municipal, es necesario que la información tenga cobertura nacional.

2.15.1 SIMBOLOGÍA

La carta requiere símbolos que diferencien cada uno de los objetos que se encuentran en ella, y en consecuencia, la información representada pasa por un proceso de selección. Asimismo, dependiendo de la escala, y cuanto menor sea ésta, habrá una mayor abstracción en la información representada, recurriéndose en mayor medida a los símbolos y a la generalización cartográfica de los datos asentados.

En todos los mapas se le da referencia a los símbolos empleados y se muestra la totalidad de ellos en los márgenes de los mismos.

2.15.2 HISTORIA DE LA INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA EN MÉXICO

En el año de 1968 se creó la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP), cuyo objetivo fue realizar el inventario de los recursos naturales del país, a través del levantamiento cartográfico escala 1:50 000 (carta topográfica).

El primer levantamiento cartográfico del país a escala 1:50 000 se desarrolló de 1970 a 1988 (Serie I), lo anterior empleando para ello procesos tradicionales: herramientas óptico-mecánicas y técnicas manuales casi artesanales en la edición cartográfica con apoyo de información levantada directamente en campo, tanto de los atributos de las entidades geográficas, como de los topónimos asociados a los mismos, con el apoyo de clasificación de campo.

Los procesos tradicionales empleados para la actualización cartográfica resultaron eficientes y con un alto grado de exactitud. Sin embargo, el avance en esta tarea fue lento, por tal motivo, a partir del año de 1997 da inicio el proceso de modernización, con el objeto de actualizar la cartografía mediante métodos digitales terminando esta tarea en el año 2007 (Serie II).

Con lo anterior surge el primer Diccionario de Datos Topográficos Escala 1:50 000 elaborado en 1996 y publicado en 1998 para la Serie II, que se refiere a la cartografía convertida de analógica a formato digital y que además se actualizó entre los años 1997 y 2007.

Dicho lo anterior, las series definidas para los datos topográficos escala 1:50 000 son las siguientes:

- SERIE I. Cartografía elaborada entre los años 1970 – 1988 por medios analógicos. Consta de 2,324 cartas en papel.
- SERIE II. Cartografía convertida del formato analógico a formato digital entre los años de 1997 – 2007. Sin embargo, la información es la misma de la serie I. Consta de 2,324 cartas.

- SERIE III. Cartografía que se actualizará entre los años 2013 al 2018. A la fecha se cuenta con un avance 492 cartas del total de 2,357 cartas.

Actualmente se lleva a cabo la producción de los Conjuntos de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III mediante el uso del software ArcGIS apoyándose en herramientas propias, así como del Diccionario de Datos Topográficos Escala 1:50 000 correspondiente a la Serie III con fecha de Abril del 2013.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un sistema de información geográfica es un conjunto de elementos relacionados entre sí ordenadamente, de acuerdo a ciertas reglas que permiten analizar e interpretar hechos relativos a la superficie de la tierra. Sus principales componentes son: Hardware, software, Datos geográficos, Cartografía, Equipo humano y Metodología.

- Hardware. Es el equipo necesario para ejecutar el software
- Software. Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos
- Datos. Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica para la existencia de estos, la información geográfica, la verdadera razón de ser de los SIG, reside en los datos y es por ello que el conocimiento exhaustivo de los datos y su naturaleza resulta obligado para una buena comprensión de los SIG
- Metodología. Es un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos
- Equipo humano. Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG

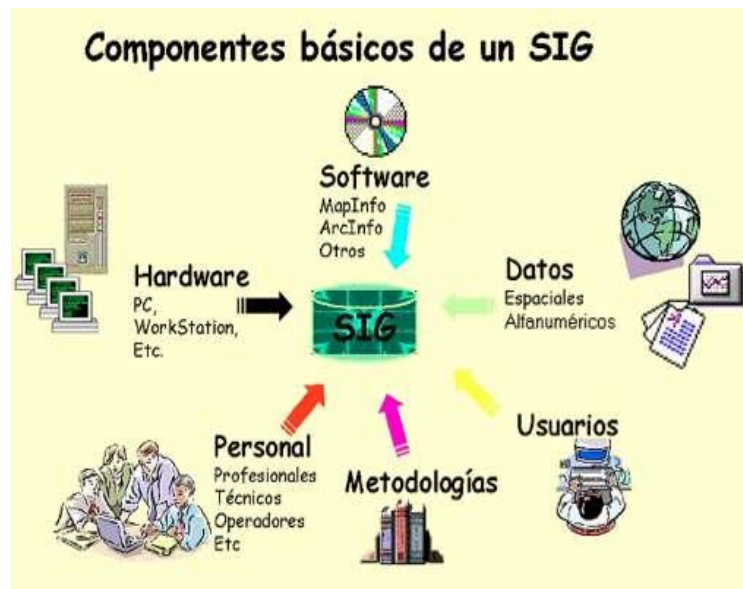


Figura 3-1 Componentes de un SIG

Fuente: www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2010/tesisPaulinaLeija.pdf

Otras definiciones que se han dado para los sistemas de información geográfica y que a continuación se mencionan por considerarlas relevantes son:

Arannof (1991) dio la siguiente definición de SIG: “Un sistema de información geográfica (GIS) es un sistema basado en el ordenador, que proporciona los cuatro siguientes conjuntos de capacidades para el manejo de datos georeferenciados: entrada de los datos, gestión de datos (almacenamiento y recuperación), manipulación y análisis y salida de los datos”.

La empresa ESRI define a los sistemas de información geográfica (SIG) como sistemas empleados para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas.

El objetivo de SIG consiste en crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente.

Los SIG, aunque den la impresión de ser aplicaciones meramente prácticas, basadas en un programa concreto, trabajan con una metodología propia y poseen un núcleo teórico importante en el que se combinan conceptos de diferentes disciplinas (topología, estadística espacial, geometría computacional) entre otras.

Debe entenderse, pues, un SIG como un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña una función particular. Por lo tanto podemos decir que un SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica.

3.2 DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El desarrollo sufrido los SIG desde sus orígenes hasta nuestros días es enorme. La popularización de las tecnologías y los esfuerzos de desarrollo llevados a cabo por un amplio abanico de ciencias beneficiarias han contribuido a redefinir la disciplina.

Hace unos 15.000 años en las paredes de las cuevas de Lascaux (Francia) los hombres de Cro-Magnon pintaban en las paredes los animales que cazaban, asociando estos dibujos con trazas lineales que, se cree, cuadraban con las rutas de migración de esas especies. Si bien este ejemplo es simplista en comparación con las tecnologías modernas, estos antecedentes tempranos imitan a dos elementos de los sistemas de información geográfica modernos: una imagen asociada con un atributo de información

En 1854 el pionero de la epidemiología, el Dr. John Snow, proporcionaría otro clásico ejemplo de este concepto cuando cartografió, en un ya famoso mapa, la incidencia de los casos de cólera en el distrito de Soho en Londres. Este protoSIG, uno de los ejemplos más tempranos del método geográfico, permitió a Snow localizar con precisión un pozo de agua contaminado como la fuente causante del brote.

Si bien la cartografía topográfica y temática ya existía previamente, el mapa de John Snow fue el único hasta el momento, que, utilizando métodos cartográficos, no solo representaba la realidad, sino que por primera vez analizaba conjuntos de fenómenos geográficos dependientes

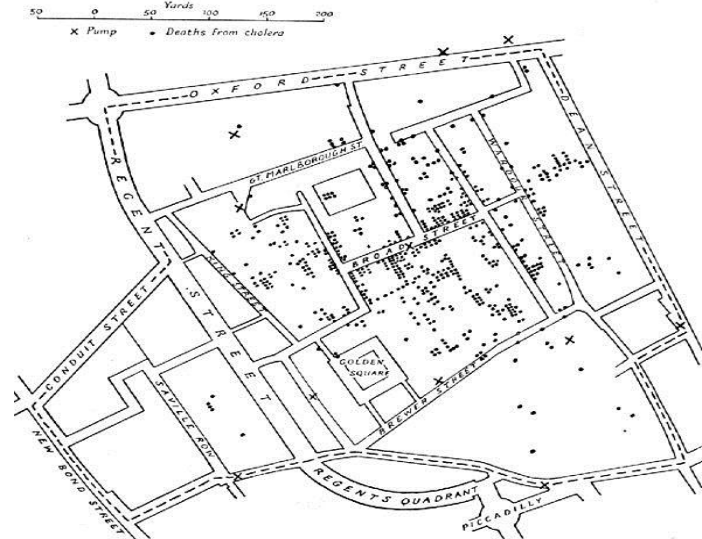


Figura 3-2 Mapa original del Dr. John Snow
Fuente: <http://es.wikipedia.org>

La primera experiencia relevante de los sistemas de información geográfica, la encontramos en el año de 1959, cuando Waldo Tobler define los principios de un sistema denominado MIMO (map in – map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En el establece los principios básicos para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado.

El primer Sistema de Información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá, al auspicio del Departamento Federal de Energía y Recursos. Este sistema denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), fue desarrollado a principios de los 60's por Roger Tomlinson, quien dio forma a una herramienta que tenía por objeto el manejo de los datos del inventario geográfico canadiense y su análisis para la gestión del territorio rural, el desarrollo de Tomlinson es pionero en este campo y por eso es considerado el padre del SIG.

Simultáneamente a los trabajos canadienses, se producen desarrollos en los Estados Unidos, en el seno del Harvard laboratory, en el año de 1964 ve la luz SYMAP, una aplicación que permitía la entrada de información en forma de puntos, líneas y áreas, lo cual corresponde a grandes rasgos el enfoque que hoy en día conocemos como vectorial.

En el año de 1969, utilizando elementos de una versión anterior de SYMAP, David Sinton también en el Harvard Laboratory, desarrolla GRID, un programa en el que la información es almacenada en forma cuadrícula, estos son los inicios de los sistemas de información geográfica raster.



Figura 3-3 Aspecto de un mapa generado con SYMAP

Fuente: <http://lazarus.elte.hu/hun/dolgozo/jesus/terinfo/symap.htm>

A principios de la década de los setentas, siendo ya claro que los SIG son herramientas con gran futuro, tiene lugar en Ottawa, Canadá, el primer simposio Internacional de Sistemas de Información Geográfica.

Los productos de Harvard Laboratory se habían vendido a precios módicos a otros investigadores para financiar su propio desarrollo, pero sin gran afán comercial. La incorporación de los SIG al mercado y la aparición de una industria basada en ellos aparecen poco después de inicio de estos.

En el año de 1969, Jack Dangermond, un integrante del propio Harvard Laboratory, funda junto a su esposa la empresa Enviromental Systems Research Institute (ESRI) pionera y líder del sector hasta hoy en día, la popularización de los SIF y su conversión en un elemento de consumo es debida también en gran medida a la labor del ESRI dentro del mercado y su línea original de productos.

En el año de 1981 ArcInfo, de la compañía ESRI se convierte en el primer SIG que alcanza el ámbito de los ordenadores personales

En 1985 aparece el primer SiG libre, GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) siendo aún la actualidad el referente dentro de esta área.

En 1987 se empieza a publicar el Internacional Journal of Geographical Information Systems.

En 1991 ArcView populariza el SIG como herramienta de escritorio, en el año de 1993 aparece el primer servidor de mapas Xerox PARC.

Por último respecto a su presencia social, en nuestros días los SIG han pasado de elementos restringidos para un uso profesional a ser elementos de consumo y estar presentes en nuestra vida diaria, ejemplo de ello es la aparición de servicios como Google Maps y Google Earth entre otras.

3.3 MODELO DE DATOS

Para trabajar con un SiG es necesario en primer lugar introducir la información geográfica en un sistema de información y realizar una modelización de la realidad, siendo los dos modelos de datos más empleados el vectorial y el raster.

Si se desea disponer de información de una amplia zona sin importar los límites de los objetos, se emplean los datos raster con los que se dispone de información continua. Sin embargo, si los límites de las entidades geográficas tienen gran importancia para la aplicación y se quieren recoger los elementos de forma individual, se elegirá un modelo vectorial.

En ambas estructuras de datos será necesario que queden reflejadas las relaciones espaciales de los elementos entre sí, lo cual se conoce en el área de las matemáticas como topología. Aplicando esta definición al área de la cartografía, sería la relación que cada objeto geográfico tiene con los de su entorno.

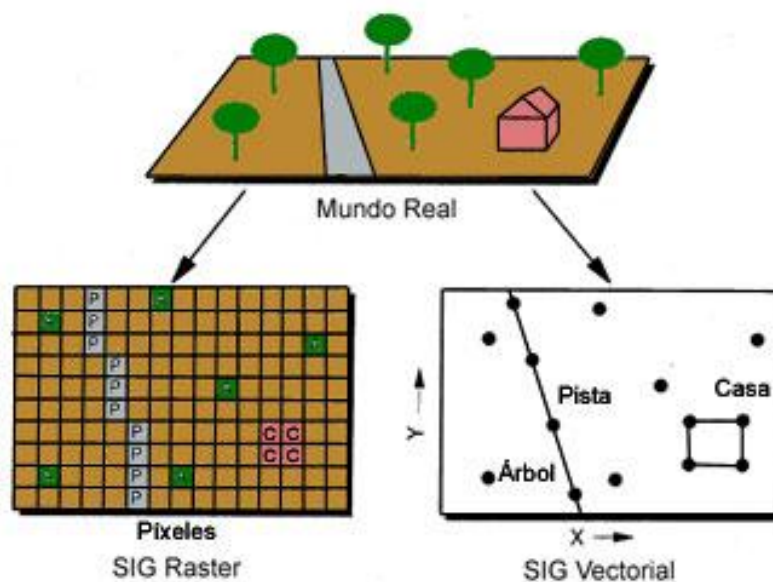


Figura 3-4 Representación de modelos raster y vectorial
http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm

3.4 EL MODELO RASTER

El modelo raster centra su interés más en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Para ello estructura el espacio en una serie de elementos discretos por medio de una retícula regular, generalmente compuesta por celdas cuadradas, también llamadas píxeles. Cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna. En el modelo raster no se recogen de forma explícita las coordenadas de cada una de las celdas, sino tan solo los valores de esta.

Una forma sencilla de entender lo que es un píxel es observando los cuadrados que podemos ver cuando ampliamos mucho una imagen con ArcGis, cuando las imágenes no tienen mucha calidad, efectivamente estos cuadros son los píxeles, y cuanto más pequeños sean mayor nitidez tendrá la imagen, aunque esto conllevara a una mayor utilización de memoria y de tiempo de manipulación, dado que cada píxel ocupa un determinado número de bits.

La representación de los elementos del mundo real se hace de la siguiente forma: un elemento puntual se representa mediante una celda, un elemento lineal mediante una secuencia de celdas alineadas y un elemento poligonal mediante una agrupación de celdas contiguas. Los límites entre los elementos geográficos no quedan registrados de forma explícita, pero se pueden deducir a partir de valores de las celdas. Por ejemplo: un lago puede representarse mediante un grupo de celdas colindantes que tienen el mismo valor temático; se trata, por tanto, de un modelo continuo que cubre todo el territorio.

Uno de los mayores inconvenientes que se asocian al modelo raster es la falta de exactitud a la hora de localizar los elementos. Teóricamente las celdas podrían ser tan pequeñas como se deseara hasta llegar a la misma exactitud que presentan las coordenadas X e Y en un sistema vectorial, pero se producirían unas necesidades en el almacenamiento y proceso de datos difíciles de alcanzar.

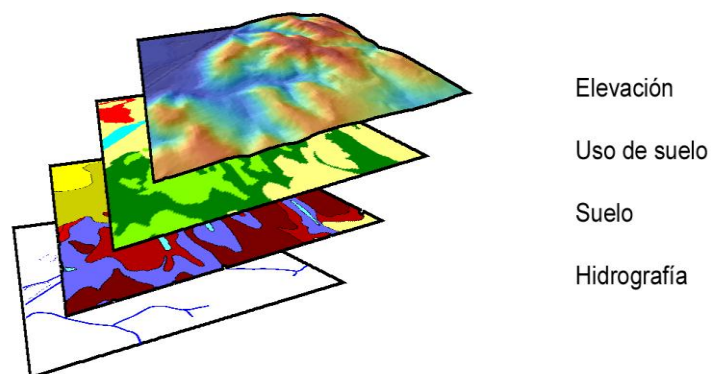


Figura 3-5 Capas en Sistemas de Información Geográficos
Fuente: Sistemas de información geográfica, Víctor Olaya

Una capa constituye un conjunto de celdas y sus valores asociados (relativos a una determinada variable). Dado que en cada celda se registra un único valor, si se quiere almacenar información relativa a distintas variables, se han de incluir

tantas capas como variables se consideren (por ejemplo hidrología, topografía, geología, altitud, uso de suelo, etc., etc...). En principio todas esas capas deben basarse en la misma retícula para facilitar las comparaciones entre capas celda a celda.

El formato raster permite representar también variables que presentan una variación continua sobre el espacio, es decir, superficies. El ejemplo más típico es el de mapa de altitudes, donde se le asigna a cada celda un valor, de forma que se puede conocer cómo varía la altitud por toda el área que cubre un mapa. Se pueden representar de esta forma superficies tridimensionales, que añade una tercera variable (z) a las dos coordenadas de cada localización (X e Y), para representar el valor de la variable cuantitativa y continua, en este caso la altitud; esto es lo que se conoce como modelo digital de elevaciones (MED).

3.5 EL MODELO VECTORIAL

Cuando se representan los fenómenos geográficos mediante puntos, líneas y polígonos, estamos utilizando el denominado modelo de datos vectorial. El modelo vectorial ha sido la base de la Cartografía analógica clásica puesto que resulta particularmente útil para representar entidades geográficas discretas, como edificios, carreteras o límites municipales.

Puntos, líneas, y polígonos son los elementos geométricos básicos y basan su representación en vértices y segmentos. Un vértice es el elemento vectorial más simple, y resulta del cruce de dos coordenadas X e Y, dependiendo sus valores de las características del sistema de referencia utilizado.


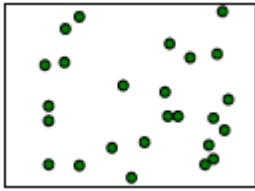




Los puntos se representan por un único vértice, que se define geoméricamente, como se ha señalado, por sus valores X-Y. Las líneas están formadas por uno o varios segmentos articulados por vértices con sus respectivas coordenadas.

A los vértices de los extremos les llamamos nodos y marcan el inicio y el final de las líneas y, en consecuencia el sentido de su dirección. Los polígonos son líneas cerradas donde los nodos de inicio y final coinciden, delimitando en su interior un área.

Los elementos vectoriales se convierten en objetos cuando su representación se asocia a entidades reales: una línea puede ser la representación del discurrir de un río. Podemos guardar determinados atributos de estas entidades reales, como el caudal o su longitud, en bases de datos y asociar, mediante identificadores, cada objeto a sus atributos.

Dado que representamos los objetos bajo un sistema de coordenadas, es posible deducir las relaciones topológicas que mantienen entre sí, tales como la proximidad, la conectividad o la inclusión. La variedad de formas existen para ordenar y almacenar informaciones geométricas, de atributos y topologías da lugar a la existencia de diferentes formatos.

Tabla 3-1 Entidades geométricas en el modelo de representación vectorial

| | ENTIDADES GEOGRÁFICAS | REPRESENTACIÓN |
|-----------|--|---|
| PUNTOS |  |  |
| LÍNEAS |  |  |
| POLÍGONOS |  |  |

3.6 MODELO DE DATOS RASTER VS VECTORIAL

Resulta obvio que las diferencias entre los modelos raster y vectorial son muy notables, y que cada uno de ellos posee sus propias ventajas y desventajas, la comparación entre ambos modelos resulta necesaria para hacer uso correcto de ellos, eligiendo en cada caso el más adecuado y combinándolos de manera óptima.

Una desventaja del modelo raster es que tiene su precisión limitada por el tamaño de la celda, las entidades menores que dicho tamaño de la celda no pueden capturarse, y la variación espacial que sucede dentro del espacio de la celda tampoco, asimismo existe una imprecisión en las formas.

El detalle con el que puede recogerse la forma de una entidad geográfica según el modelo vectorial es, en la práctica, ilimitado mientras que el modelo raster restringe las formas a ángulos rectos, ya que la unidad base es un cuadrado, por lo tanto el perímetro de una entidad geográfica estará compuesto por líneas horizontales o verticales exclusivamente y además su longitud y la superficie que encierra serán respectivamente múltiplos del tamaño de la celda y el área de dicha celda, esta es la principal razón por la cual, si el uso principal que se le va a dar a una capa es su representación gráfica, debe declinarse por el modelo vectorial.

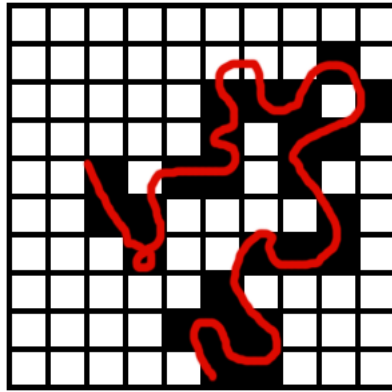


Figura 3-6 Imprecisión de forma en el modelo de representación raster
 Fuente http://volaya.github.io/librosig/Datos/Tipos_datos/Tipos_datos.html

El hecho de que dentro de una celda el valor de la variable recogida sea constante, da lugar a ambigüedades donde una celda está ocupada por dos valores distintos, pero solo puede asignársele uno de ellos, debiendo establecerse algún criterio sistemático para llevar esto a cabo.

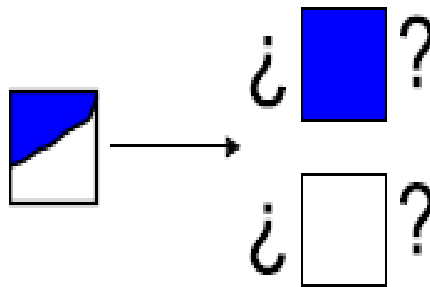


Figura 3-7 Ambigüedad en la asignación de valores en una celda modelo raster
 Fuente: *Sistemas de información geográfica, Víctor Olaya*

Hay que tener en cuenta, no obstante, que la precisión de la representación vectorial es del modelo pero no del dato, el cual depende de otros condicionamientos tal como la escala.

La regularidad y sistematicidad de las mallas raster hacen sencillo el implementar algoritmos de análisis, una capa raster se asemeja a una matriz, y por tanto aplicar herramientas y elementos matemáticos por el contrario la irregularidad espacial de las capas vectoriales hace difícil la implementación de los mismos algoritmos. Ya que las operaciones matemáticas son más complejas.

Más allá de las anteriores diferencias, lo importante es entender que no existe un modelo de representación idóneo sino que depende de muchos factores como: el tipo de variable a recoger o el tipo de análisis a realizar.

Por último, es importante tener en cuenta que existen procedimientos para convertir entre formato raster y vectorial, de forma que el disponer de datos en un modelo de representación particular no implica que debamos desarrollar nuestro proyecto sobre dichos datos directamente, sino que podemos efectuar una conversión.

3.7 UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Algunas de las funciones básicas, y más habitualmente utilizadas de un SIG son el almacenamiento, visualización, consulta y toma de decisiones en ordenamiento territorial y modelización de procesos atmosféricos.

El almacenamiento de datos espaciales implica modelar la realidad y codificar de forma cuantitativa este modelo.

La diferencia básica entre un sistema de información en sentido amplio y un SIG es que este último maneja datos espaciales. Esto se presenta en un espacio de cuatro dimensiones (3 espaciales y el tiempo), pero debido al peso que la tradición cartográfica tienen sobre los SIG, una de las formas prioritarias de presentación de los datos es una proyección sobre el espacio bidimensional definido mediante coordenadas cartesianas.

Una consulta a una base de datos implica, seleccionar el subconjunto de datos que el usuario necesita en función de un conjunto de criterios previamente definidos, por ejemplo, todos los municipios con una población mayor de 3,000 habitantes.

Un punto más allá de sofisticación sería la utilización de un SIG para resolver problemas de toma de decisión en planificación física, ordenamiento territorial, estudios de impacto ambiental etc. Mediante el uso de análisis espacial y álgebra de mapas

3.8 LOS DRONES EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Drones son vehículos aéreos no tripulados (VANT), es una aeronave que vuela sin tripulación, se define como un vehículo sin tripulación reutilizable, que es capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido

Hay una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características en el diseño de los VANT,. Históricamente los VANT eran simplemente aviones pilotados remotamente pero cada vez más se está empleando el control autónomo de los VANT. En este sentido se han creado dos variantes: algunos son controlados desde una ubicación remota, y otros vuelan de forma autónoma sobre

la base de planes de vuelo pre-programados usando sistemas más complejos de automatización dinámica.



Figura 3-8 Dron

Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=104>

Con un importante auge por su versatilidad y bajo coste, las aplicaciones son diversas:

- Gestión de recursos naturales
- Agua
- Agricultura
- Meteorología
- Minería
- Respuesta a emergencias o desastres
- Forestal
- Topografía
- Catastro

3.8.1 USO DE DRONES EN SIG EN TOPOGRAFÍA

Con los datos obtenidos a partir de los sensores se pueden crear mapas catastrales mediante la digitalización de las orto fotografías geo-referenciada. Esta tarea se puede realizar con AutoCAD, ArcGIS o cualquier otro SIG.

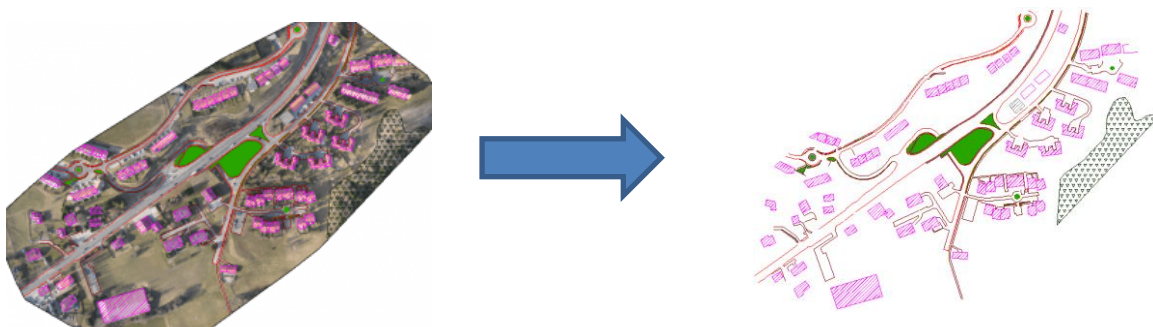


Figura 3-9 Uso de Drones en topografía

fuete: <http://mappinggis.com/2014/09/ejemplos-de-uso-de-drones-en-gis/>

3.8.2 USO DE DRONES EN GESTIÓN DE EMERGENCIAS

Ante un deslizamiento de tierras el uso de drones para la construcción de un modelo 3D cobra fundamental importancia para evaluar los riesgos de nuevos deslizamientos de tierra. Permite a geólogos y autoridades a identificar las zonas afectadas por el deslizamiento de tierras. Ayuda a evaluar rápidamente las zonas en peligro y a reparar las infraestructuras dañadas.

Mediante el uso de VANTS es posible llegar a zonas de difícil acceso, como montañas con alta variación de altitud.

Otras situaciones de emergencia que se pueden monitorizar con drones son los derrames de petróleo, inundaciones o daños de incendios.



Figura 3-10 Daños provocados por deslizamientos de tierra

Fuente: <http://mappinggis.com/2014/09/ejemplos-de-uso-de-drones-en-gis/>

3.8.3 USO DE DRONES PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES

Los proyectos relacionados con los recursos naturales siguen la pista de los cambios en el patrimonio histórico. Los drones son útiles para monitorizar las amenazas de las áreas protegidas, desde la caza furtiva o la deforestación.

En hidrología es posible evaluar la salud ecológica de las masas de agua mediante el seguimiento de la vegetación de las plantas, que es detectable por drones. De nuevo los drones pueden facilitar datos en zonas remotas o de difícil acceso. Para los científicos es muy caro y les requiere mucho tiempo probar y mapear las plantas acuáticas de forma manual. La evolución de la tecnología de aviones no tripulados permite el mapeo de las plantas acuáticas en una escala de 5 cm, lo que significa que las plantas potencialmente pueden ser identificadas a nivel de especie en una cuarta parte del costo del trabajo manual.

Otras aplicaciones en agua son el mapeo de tierras de regadío, de la superficie impermeable y en planificación de cuencas.

CAPÍTULO 4. MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL (M.E.D.)

4.1 MODELO

Es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades, de la definición anterior se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solo algunas propiedades, con el objeto de representar un sistema de menor complejidad. Los modelos tienen como objetivo conocer o predecir propiedades del objeto real.

Para que los modelos puedan decirnos algo sobre el objeto que representan, es necesario que se construyan estableciendo una relación con la realidad que debe ser simétrica, la existencia de esta relación simétrica permite que un resultado "C" relativo al modelo pueda traducirse en otro "C" relativo al objeto real.

Dado que el modelo representa la realidad con una cantidad menor de información, existe un error inherente en el proceso de modelización que puede ser reducido pero no eliminado. La reducción de error puede hacerse de dos formas

- Mayor precisión en la medida y mejor selección de los componentes; no implica mayor complejidad del modelo
- Mayor cantidad de componentes, partes e interrelaciones funcionales, implica mayor complejidad del modelo

4.2 MODELOS ANALÓGICOS Y MODELOS DIGITALES

Existe numerosas clasificaciones de modelos, pero para nuestro caso nos interesa una que los divide en modelos digitales y modelos analógicos. La diferencia básica entre los modelos digitales y los modelos analógicos reside en que los primeros están codificados con cifras, lo que entre otras cosas permite su tratamiento informático, los modelos digitales por lo tanto son modelos simbólicos y para construirlos, es necesario un proceso de codificación de la información, que permite una representación virtual manejable por medios informáticos.

Los modelos digitales presentan unas propiedades inherentes a su naturaleza numérica

- No ambigüedad: cada elemento del modelo tiene propiedades y valores específicos y explícitos.
- Verificabilidad: los resultados se construyen mediante pasos explícitos y concretos que pueden ser analizados uno a uno y comprobados en todas las fases del proceso.
- Repetibilidad: los resultados pueden ser comprobados y replicados las veces que se deseen

Por otro lado los modelos analógicos son modelos físicos, un ejemplo de modelo analógico es un mapa impreso, que se construye mediante un conjunto de

convenciones cartográficas relativamente complejas, que conducen a un resultado final claramente distinto del objeto representado. Mediante esta transformación se persigue hacer legibles propiedades tales como altitudes, distancias, localización física de objetos geográficos etc.



Figura 4-1 Mapa impreso México ejemplo de modelo analógico

Fuente: <http://www.zonu.com/fullsize1/2009-09-17-1403/Mapa-de-Mexico-1997.html>

Es necesario no perder de vista que un modelo no es más que una descripción aproximada que se construye mediante la aplicación de unos supuestos más o menos adaptados a la realidad pero que nunca pueden ser exactos.

4.3 EL ORIGEN DE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

Desde el siglo XVII la representación del relieve siempre ha tenido importancia relevante para conocer la información que existe acerca de los elementos en la superficie de la tierra, siendo de gran importancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los campos de ingeniería civil y ciencias de la tierra, en particular, el estudio de la forma del terreno y los elementos presentes en el mismo constituye un importante insumo para muchos usuarios como cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros y militares

El término *digital terrain model* tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares.

La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas xyz conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario. Puede observarse el uso del término MDT como sinónimo de MED, así como el escaso énfasis en el aspecto de la geo-referenciación.

El objeto de su trabajo fue acelerar el diseño de carreteras mediante el tratamiento digital de datos del terreno adquiridos por fotogrametría, planteándose una serie de algoritmos para la obtención de pendientes, áreas, etc.

Los programas de uso más general para el tratamiento de los MDT tuvieron que esperar algunos años más y, habitualmente, surgieron en un contexto SIG que incorporaba la información topográfica para el manejo de cartografía digital en términos más generales. El trabajo de mayor importancia fue desarrollado por el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis que, en 1967, presentó el SYMAP; este conjunto de programas de manejo de cartografía digital incorporaba, algoritmos de interpolación que permitían la generación de mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud distribuidos irregularmente.

El modelo digital de elevación desde su creación, ha constituido un medio para el conocimiento y representación del terreno y para lograr análisis de los elementos presentes en el mismo mediante el uso de equipo y software especializado para tal fin.

Además es posible derivar o generar información a partir de los modelos digitales de elevación que nos posibilita que tengamos más datos de apoyo para el cumplimiento de objetivos, toma de decisiones y desarrollo de proyectos relacionados con el relieve

4.4 MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Los MED pueden describirse de forma genérica de la siguiente forma:

$$z = \zeta (x, y)$$

Donde z es la altitud del punto situado en las coordenadas X y Y , y ζ la función que relaciona la variable con su localización geográfica. Dado que la superficie está formada por un número infinito de puntos no es posible su modelización sin cierta pérdida de información.

En la versión digital sería posible presentar de forma explícita, al menos teóricamente, la ecuación anterior, sin embargo, la complejidad del relieve hace que su representación matemática mediante funciones no tenga más que un significado simbólico.

De forma general, la unidad básica de información en un MED es un valor de altitud z , al que acompañan los valores correspondientes de x e y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referencia espacial. Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

El diseño de estas interrelaciones es lo que configura las diferentes opciones en la estructura de datos, cuya elección es trascendental pues condiciona completamente el futuro manejo de la información, mientras que los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (curvas de nivel para la representación de la superficie del terreno).

Los MED disponen de alternativas más variadas, en todas ellas la altitud se describe básicamente mediante un conjunto finito y explícito de cotas. El valor propio de un punto de localización arbitraria será, en su caso estimado por interpolación a partir de los datos de su entorno.

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la representación de sus datos: vectorial y raster, de los cuales los más representativos son básicamente cuatro, dos de ellos son vectoriales: *isopletas* o contornos (*contours*) y red irregular de triángulo (*TIN Triangulated irregular network*)

Los otros dos son raster: matrices regulares (*URG, uniform regular grids*) y matrices jerárquicas escalables (*en estructuras de tipo quadtree*). Los Modelos de Elevación Digital proveen información muy valiosa y precisa sobre las alturas, pendientes y dimensiones del terreno.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud la cual depende de la aplicación o no de tratamientos de corrección de los datos tras su adquisición ya que algunos métodos dejan zonas distorsionadas sobre las líneas costeras a causa de la espuma de las olas, agujeros cuando existían nubes durante la adquisición satelital etc. Y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, es decir, la distancia entre dos puntos adyacentes del MED las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos

4.4.1 MODELO VECTORIAL DE CONTORNOS

La estructura básica es el vector, compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (x,y) que describe la trayectoria de líneas isométricas, coincidiendo por tanto con las curvas de nivel del mapa topográfico convencional. El número de elementos de cada vector es variable y la reducción de éste a un único elemento permite incorporar cotas puntuales sin introducir incoherencias estructurales.

Una curva de nivel concreta queda definida, por tanto, mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados para garantizar la exactitud del modelo, la localización espacial de cada elemento es explícita conservado los valores individuales de coordenadas, el caso más sencillo de este tipo de modelo está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud.

4.4.2 MODELO VECTORIAL REDES DE TRIÁNGULOS IRREGULARES (TIN)

Una estructura de datos cada vez más utilizada es la que se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: triangulated irregular network, TIN. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos.

Los TIN pueden considerarse como una estructura derivada de otra anterior de puntos o líneas. Aunque la distribución original puede ser cualquiera (incluso puntos distribuidos aleatoriamente), es frecuente partir de una base de isohipsas (modelo vectorial) para generar la red de triángulos. Estos están internamente organizados en función de su vecindad mediante un conjunto de información bastante complejo que hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas.

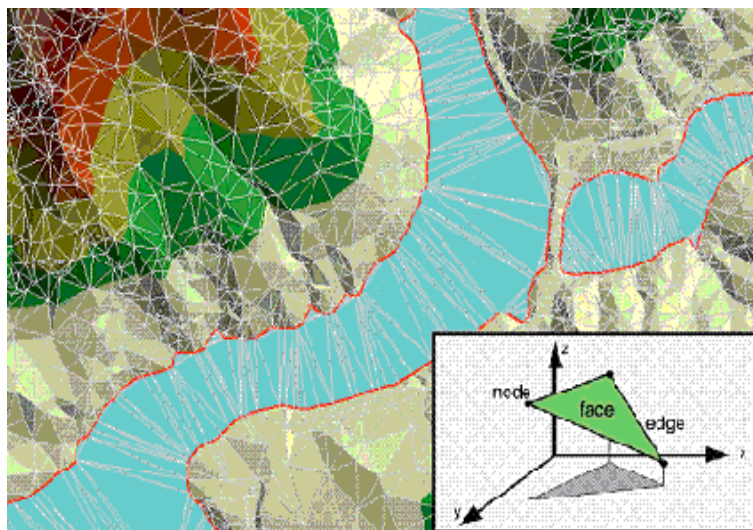


Figura 4-2 Modelo digital de elevación en formato TIN

Fuente: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/printBooks_topics.cfm?pid=22

4.4.3 MODELO RASTER MATRICES REGULARES

Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda (aunque habitualmente se utiliza un valor puntual, asociado a cada nudo de la retícula o punto medio de la celda, con lo que esencialmente se construye un modelo vectorial de puntos). La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equi-espaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas. Las matrices de altitudes suelen ser generadas por interpolación a partir de un modelo previo de contornos o por métodos fotogramétricos.

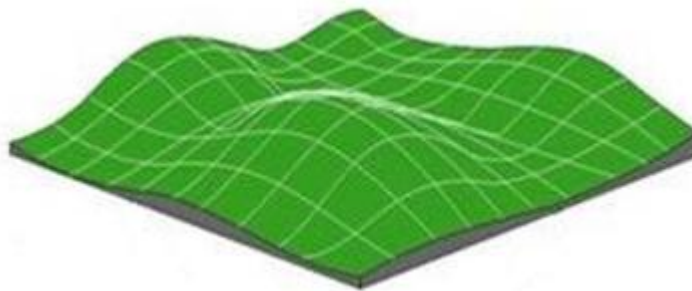


Figura 4-3 Modelo digital de elevación en formato raster

Fuente: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesMED.aspx>

4.4.4 MODELO RASTER MATRICES DE RESOLUCIÓN VARIABLE

El interés de las matrices de resolución variable reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices regulares (su resolución espacial prefijada), manteniendo, en principio, sus principales ventajas: la sencillez conceptual y operacional. En este tipo de matrices los elementos pueden ser, bien datos elementales (como en las matrices regulares), bien sub-matrices con un nivel de resolución diferente. La estructura final es un árbol jerárquico y dinámico de sub-matrices con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel. Se trata de una estructura análoga a los cuadrantes, utilizados ocasionalmente en el tratamiento de variables categoriales, este tipo de estructura está apenas en desarrollo y por lo mismo aun casi no es utilizada.

4.5 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

La captación de la información altimétrica constituye, lógicamente el paso inicial en el proceso de construcción del MED, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos manipulable por medios informáticos. Numerosos autores han coincidido en que esta fase inicial es la más costosa (en términos de tiempo y trabajo) de todo el proceso de manejo de los MED. Se trata de la fase de mayor transcendencia ya que la calidad de su resultado es el principal factor limitante para todos los tratamientos que se realicen posteriormente.

Tras la captación de los datos, éstos deben ser estructurados de forma adecuada para el manejo por parte de las aplicaciones informáticas, lo cual puede realizarse de formas variadas, aún dentro del mismo esquema general (matricial, vectorial, etc.). A continuación analizaremos las principales alternativas que existen en la actualidad para realizar estas operaciones, hasta llegar al resultado de esta fase.

4.6 MÉTODOS DE GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Los métodos para la generación de los Modelos Digitales de Elevación pueden dividirse en dos grupos:

Métodos directos. Estos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, en los cuales podemos citar:

- La toma directa de datos por medio de levantamientos topográficos con estación total o con GPS.
- Uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser.

Métodos indirectos. Cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un modelo digital de elevación, en los cuales podemos citar:

- La digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática (mediante escáner y vectorización) o manual (uso de tableta digitalizadora o en pantalla).
- Restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

4.6.1 TECNOLOGÍA LIDAR (ACRÓNIMO EN INGLES “DETECCIÓN Y MEDICIÓN A TRAVÉS DE LA LUZ

LIDAR es la combinación de tecnologías diseñadas para la obtención de coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), de puntos del terreno mediante un telémetro láser montado en un avión. A partir de estos datos llamados “Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno” se pueden elaborar modelos digitales de elevación de alta resolución sub-métricos, tanto del terreno como de la superficie del mismo (objetos naturales o artificiales).

Comparado con los métodos tradicionales la exactitud, mejor detalle y los tiempos de respuesta en la obtención de los resultados (oportunidad) son variables a considerar al momento de elegir la tecnología LIDAR como fuente de obtención de datos de elevación. Los modelos generados mediante esta tecnología tienen una cobertura territorial disponible correspondiente a la escala cartográfica 1:10,000 y 1:20,000 y pueden tener una resolución de 1 a 15 metros, con exactitud de 15 a 90 centímetros dependiendo de las características de planeación y ejecución del vuelo para la captación de los datos

Los modelos digitales de elevación de superficie (MDS) y de terreno (MDT) LIDAR, resultan particularmente útiles en el análisis de las áreas susceptibles de inundación, en virtud del gran nivel de detalle que ofrecen.

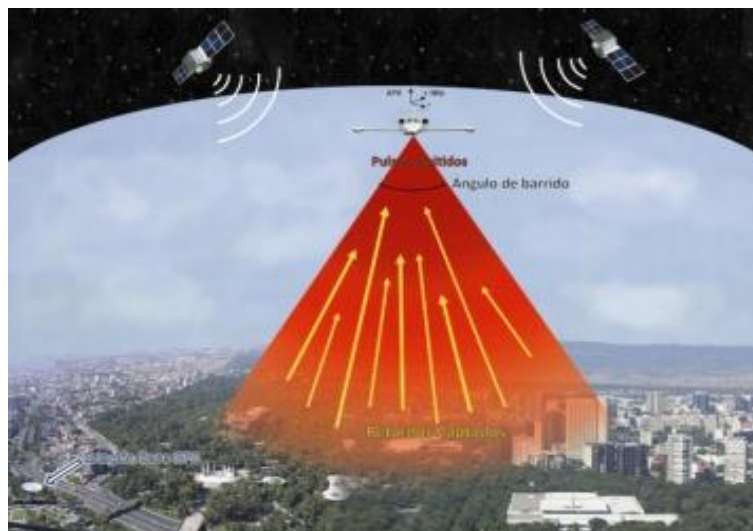


Figura 4-4 Componentes que intervienen en la Tecnología LIDAR

Fuente: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesMED.aspx>

En los últimos años se han desarrollado sistemas de localización geográfica conocidos como GPS (siglas de su denominación en inglés: global positioning system). Estos métodos utilizan un conjunto de satélites de referencia y, mediante métodos de triangulación, permiten obtener valores de las tres coordenadas espaciales para un lugar localizado sobre la superficie terrestre.

Este método es muy preciso, pero presenta limitaciones que reducen su utilidad. Entre ellas, las dos principales son la necesidad de acceder físicamente al lugar de medida y el tiempo relativamente elevado que se precisa para realizar una toma de datos fiable. A estas dos circunstancias, deben añadirse algunos problemas secundarios relativos a la necesidad de condiciones favorables para las medidas (acceso visual directo y simultáneo a un mínimo de cuatro satélites, poca cubierta vegetal sobre la antena receptora entre otros). Estas limitaciones convierten al método GPS más en un recurso de apoyo que en el sistema básico de captación de datos.

Finalmente, las estaciones topográficas más avanzadas pueden generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital. Algunos sistemas de información geográfica incorporan herramientas que permiten el tratamiento e incorporación de los datos en este tipo de formato. A pesar de su utilidad, el método tiene problemas similares al anterior ya que la recogida de información exige la presencia física sobre el terreno.

4.6.2 MÉTODOS INDIRECTOS RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DE CORRELACIÓN CRUZADA.

Como se ha indicado anteriormente, es más frecuente utilizar métodos indirectos para la generación de los MED. Las causas principales son que con estos métodos no se necesitan acceder físicamente a la totalidad de la zona de estudio, pues utilizan documentos pre-existentes, y que la generación de datos se hace de

forma relativamente rápida, cuestión básica cuando el volumen de información es muy elevado.

La técnica de correlación cruzada de imágenes se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitalizadas. En este método se extraen sub-imágenes homólogas digitales de ambas fotografías, izquierda y derecha, que subsecuentemente se correlacionan por medio de su información radiométrica (los valores de la escala de grises), para así determinar áreas homólogas.

De esta manera el proceso de correlación proporciona el ajuste necesario del cual proporcionará valores de elevación para una serie de puntos de densidad irregular. Los modelos generados por este método pueden ser del tipo superficie y del terreno con una resolución de 15 metros, exactitud de 3 metros y la cobertura territorial representada en el modelo es la correspondiente a la escala cartográfica 1:20,000.

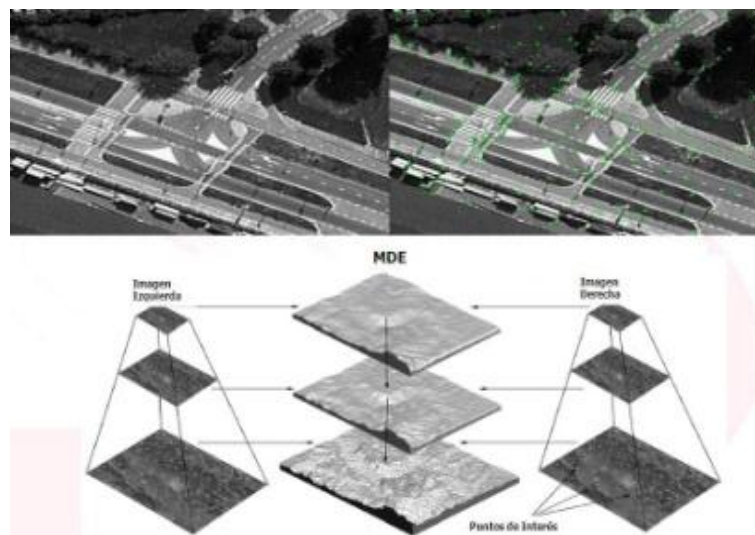


Figura 4-5 Método fotogramétrico de correlación cruzada de Foto

Fuente:<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesMED.aspx>

4.6.3 MÉTODOS INDIRECTOS: DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS

Los métodos fotogramétricos son utilizados generalmente por organismos estatales o por empresas especializadas. El elevado coste de los aparatos necesarios para la restitución hace difícil que pequeños equipos puedan abordar la construcción de los MED por esta vía. La opción alternativa es la digitalización de los mapas topográficos pre-existentes, lo cual puede realizarse bien de forma manual (mediante un tablero digitalizador), o bien automáticamente (mediante sensores ópticos de exploración). Existen dos variantes básicas en función del formato del resultado, vectorial o raster.

En la primera, el cabezal se sitúa al inicio de una línea y realiza el seguimiento de la misma de forma automática, generando directamente una salida vectorial. Este proceso presenta problemas en los casos en que las líneas se interrumpen o se

cruzan: cotas en medio de las curvas de nivel, caminos o carreteras que las cortan, etc., por lo que precisa de un operador que intervenga para solucionar todas las situaciones conflictivas.

La digitalización mediante scanners puede generar también salidas en formato raster cuando el barrido se hace de acuerdo con un esquema matricial. La salida digital es una matriz de valores de gris, de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) en los dispositivos sensibles al color o, simplemente, de blanco y negro. La generación de esta matriz es un proceso simple pero constituye una información que no es aprovechable directamente para la construcción del modelo digital.



Figura 4-6 Escáner de tambor

Fuente: Sistemas de información geográfica, Víctor Olaya

Para que una imagen procedente del escaneo de un documento impreso tenga plena validez y utilidad dentro de un SIG, es necesario añadirle información sobre la localización en el espacio del área representada en dicho documento, a este proceso se le llama geo-referenciación

4.7 USOS DE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

Puesto que las actividades humanas se asientan casi en su totalidad sobre la superficie terrestre, es importante estudiar los fenómenos asociados a ellas. De este hecho se justifica que los Modelos de Elevación Digital sea una de las capas de mayor importancia de las que podemos incorporar dentro de un análisis. Puesto que nos encontramos dentro del marco de los Sistemas de Información Geográfico centraremos la atención en la utilización de los MED como fuente de información.

Los Modelos de Elevación Digital sirven para determinar la configuración de las superficies del terreno y que a partir de estas se puedan conocer otros aspectos

tales como, alturas, pendientes, secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación, volúmenes de tierra y cuencas etc.

Los Modelos Digitales de Elevación son ampliamente utilizados en aplicaciones relacionadas con el uso y manejo de recursos naturales, de las cuales pueden distinguirse grandes categorías de aplicaciones que utilizan los modelos como son geodesia y fotogrametría, ingeniería civil, planeación y manejo de recursos naturales, ciencias de la tierra, en aplicaciones militares, cartografía especializada, prevención y atención a desastres naturales, entre otras

4.8 APLICACIONES MILITARES

El terreno, es uno de los componentes más importantes en el análisis del ambiente militar en escala local y mediana. Los usos militares de los modelos de elevación digital, incluyen operaciones de planeación de sitio similares a la de ingeniería civil: análisis del terreno para manejo de campo de batalla, intervisibilidad entre puntos, análisis de tráfico, guía de misiles y redes de comunicación y animación para simuladores de vuelo para entrenamiento de pilotos.

4.8.1 INTERVISIBILIDAD ENTRE DOS PUNTOS

EL cálculo de la intervisibilidad entres dos puntos es una aplicación que utiliza el método de levantamiento de perfiles, como base para una etapa posterior de análisis, la solución al problema si dos puntos están conectados por una línea visual consiste en la construcción del perfil topográfico que los une y el análisis posterior de los puntos intermedios para comprobar si su altitud intercepta la línea visual.

4.9 MANEJO Y PLANEACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Este campo, el de mayor uso de los Modelos Digitales de Elevación, involucra disciplinas tales como planeación urbana y ambiental, teledetección, ciencias del suelo, agricultura, meteorología y climatología. Aplicaciones típicas serían, entre otras: estudios de impacto ambiental, prevención de desastres, localización de sitios industriales, corrección geométrica y auxiliar en la clasificación de imágenes de satélite, estudios de rentabilidad, desarrollo de estrategias de cosecha, modelos de flujo de viento, dispersión de contaminantes, modelos de insolación e irradiación.

4.9.1 ANÁLISIS DEL OCULTAMIENTO TOPOGRÁFICO

La existencia de zona de sombras es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local. El que un punto esté en sombra puede deberse a dos circunstancias; auto ocultamiento y ocultamiento por el relieve circundante. Se pueden ocupar los MED para calcular los índices de radiación para cada punto.

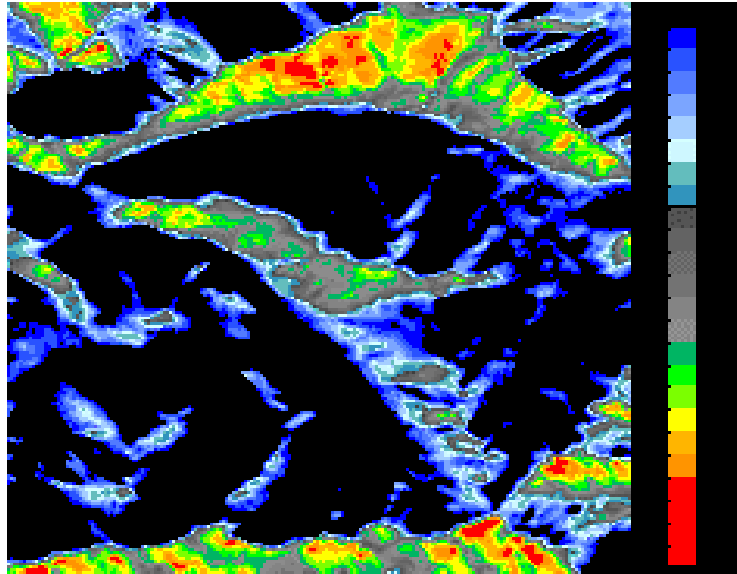


Figura 4-7 Índices de radiación correspondientes a un MED
Fuente: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>

4.10 GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA

En éstos campos, el propósito principal es el de producir modelos de alta calidad para otras aplicaciones como ingeniería civil, y cartografía, además de emplearse en la captura de datos fotogramétricos, determinación del geoide, métodos de control de calidad, como fuente de comprobación de mediciones del terreno, edición de datos del terreno, producción de orto-fotografías, cartografía topográfica.

Los MED son la aplicación más utilizada para producir mapas de relieve sombreado dentro de la exploración geotérmica, con el fin de identificar rasgos lineales pues simulan la forma en que se vería una superficie topográfica irregular, el uso de estos modelos ha permitido identificar numerosas fallas y estructuras geológicas que permanecieron ocultas para otras técnicas de búsqueda, la importancia económica, científica y social de estos resultados es de enorme importancia, dado que las fallas y fracturas geológicas son rasgos de gran

impacto social por el potencial impacto destructivo que pueden tener sobre la infraestructura física y económica.

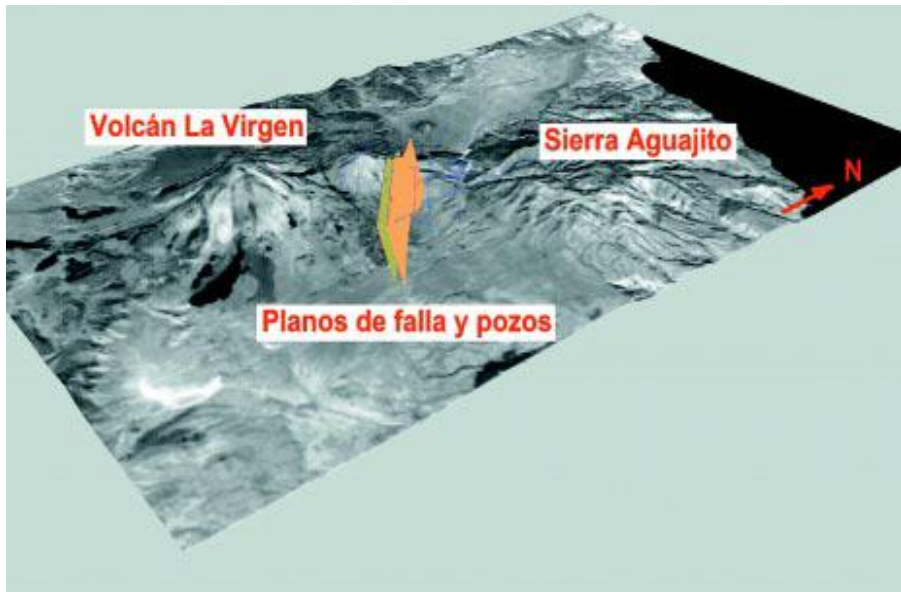


Figura 4-8 Representación tridimensional de la zona geotérmica Las Tres Vírgenes, B.C.S
Fuente: Modelos digitales de elevación del terreno: uso en la geología estructural

4.11 INGENIERÍA CIVIL

Los Modelos Digitales de Elevación pueden ser usados, en ingeniería civil, en aplicaciones tales como en el diseño para la construcción de infraestructura diversa, minas a cielo abierto, el cálculo de perfiles (secciones de perfil) y los cálculos de volúmenes (llamado también de “corte y relleno”). Son usados en aplicaciones tales como diseño de carreteras, presas y otro tipo de infraestructura.

4.11.1 CÁLCULO DE PERFILES

La realización de perfiles topográficos es una aplicación del cálculo de valores puntuales de altitud, el problema se descompone habitualmente en los siguientes pasos.

Se define los puntos iniciales y final del segmento rectilíneo sobre el que se levantará el perfil topográfico, se fija el número de puntos del perfil, se calculan las coordenadas (x,y) de cada punto de perfil y se estima por interpolación la altitud z en cada punto (x,y).

4.11.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Uno de los fenómenos principales que tiene lugar sobre la superficie terrestre es el movimiento de flujos. El MED es una herramienta de primer orden para un análisis exhaustivo de estos fenómenos hidrológicos.

Las direcciones de flujo definen el comportamiento hidrológico de cada celda como unidad aislada. Este comportamiento viene condicionado directamente por las celdas circundantes, ya que es la relación entre las alturas de cada una ellas con la celda central la que indica la dirección de flujo.

Dicha dirección está fundamentada en el principio básico y evidente de que el agua en su recorrido se mueve siempre hacia el menor potencial posible, esto es, hacia la dirección de máxima pendiente.

Existe dos problemas que se presentan a la hora de asignar dirección de flujo: la presencia de zonas llanas y la existencia de depresiones, ambos elementos hacen imposible el análisis hidrológico, siendo necesario corregirlas previamente

4.11.3 EXTRACCIÓN DE REDES DE DRENAJE

La extracción de redes de drenaje es una de las tareas principales del análisis hidrológico, el objetivo de este proceso es definir, de entre las celdas del MED, cuáles forman parte de los cauces y cuáles no. En aquellas que forman parte de los cauces, se asume que existe por tanto un flujo encauzado.

Para llevar a cabo este análisis se utiliza el propio MED y una capa de información adicional, sobre la cual se establece una condición que permite el trazado de los cauces.

El proceso de formación de un cauce depende de numerosos factores tales como la precipitación, o las características del suelo entre otras, pero en última instancia es el relieve quien condiciona la definición de la red de drenaje.

4.11.4 EL MODELO DE CAUDALES MÁXIMOS

La generalización del trazo de líneas de flujo permite calcular la extensión del área subsidiaria para cada punto del modelo. El proceso consiste en generar una línea de flujo para cada punto del MED y actuar de forma que cada elemento del modelo adquiere el valor del número de líneas de flujo que pasan por él.

Este proceso implica que el valor final de un punto del modelo es proporcional a su área subsidiaria, es decir, al número de puntos que drenan hacia él, desde la zona de mayor altitud. La mayor parte de los puntos tendrán valores relativamente bajos, especialmente los situados, en las zonas de cumbre o crestas. En cambio, los flujos convergerán en los fondos de los valles y el valor irá aumentando

progresivamente aguas abajo hasta alcanzar el valor máximo en el punto que ejerce de sumidero de la cuenca.

La principal limitación de este tipo de modelización se debe a la reducción de todo el movimiento hídrico al escurrimiento superficial, sin considerar los procesos de retención de agua e infiltración, sin embargo si se cuenta con datos de información geológica y de vegetación sería posible complementar el modelo.

CAPÍTULO 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1 OBTENCIÓN DE LOS MED

Existen diferentes sitios web disponibles, donde se puede obtener modelos de elevación digital, entre los cuales están el de la NASA, CGIAR y el INEGI entre otros. Estos datos son un insumo importante para realizar un análisis hidrológico como se verá más adelante.

5.1.1 DESCARGAR MED DE LA NASA

Un importante sitio para descargar MED 30*30 es el que ofrece la Nasa en ECHO/REVERB. El MED se puede obtener siguiendo los siguientes pasos.



Paso 1. Ir a la siguiente dirección <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> y Crear un usuario. Dar click en el botón “Sign in” localizado en la parte superior derecha de la web, se abrirá la siguiente ventana dar click en “REGISTER” y llenar el formulario.

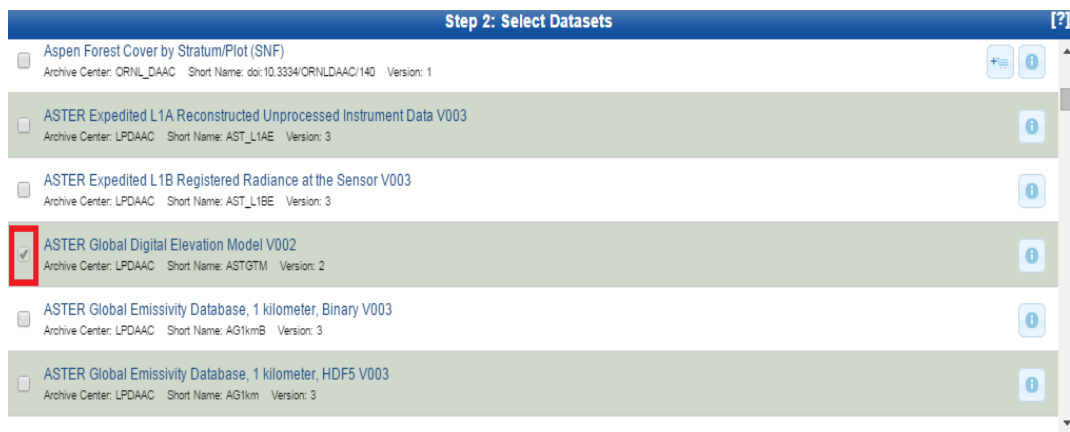
Paso 2. Una vez que ya se tiene nombre de usuario y contraseña, ya se puede descargar los MED. Desde los menús desplegables indicados, se activan las opciones “Bounding Box” y “mapa”, las cuales permitirán seleccionar el lugar del que se requiera solicitar el MED de interés.



Paso 3. En el visor que aparece, realizar zoom hasta tener una buena vista del área de la que se requiera el MED. Una vez hecho esto, con click sostenido dibujar un recuadro sobre el área de interés.



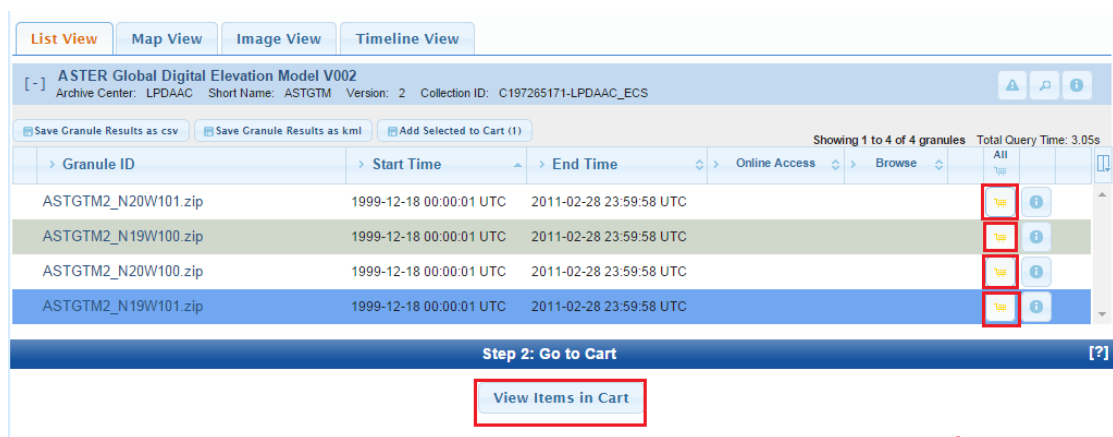
Paso 4. Una vez seleccionado el lugar, buscar el dataset “ASTER Global Digital Elevation Model V002”, en el listado alfabético inferior



Paso 5. Lo siguiente es hacer click en el botón “Search for granules”. Mediante esta función, el sistema de descargas buscará las hojas del MDT existentes en la zona seleccionada.



Paso 6. En la ventana siguiente dar click en el icono con forma de carrito de compra para añadir el pedido, posteriormente dar click en el botón “View items in Cart” y finalmente en “Order”



Paso 7. A continuación se pedirá aceptar las condiciones de uso al que se van a destinar los datos, aceptar y dar click en submit order

Ordering 4 items from "ASTER Global Digital Elevation Model V002"

Order Options

Distribution Options

Media Type: Htp Pull
Htp Pull Media Format: File

Data Usage

Description: The following selection is requested to understand how data are utilized in the context of societal benefit areas defined by the Group on Earth Observation (GEO).

Data Usage: **Water**

ASTER GDEM Policy Agreements

I agree to redistribute the ASTER GDEM "only" to individuals within my organization or project of intended use or in response to disasters in support of the GEO Disaster Theme.

When presenting or publishing ASTER GDEM data, I agree to include "ASTER GDEM is a product of METI and NASA."

Because there are known inaccuracies and artifacts in the data set, please use the product with awareness of its limitations. The data are provided "as is" and neither NASA nor METI/ERSDAC will be responsible for any damages resulting from use of the data.

4 items [Expand Item List](#)
[Remove All Items From Order](#)

Do not remove items in this order from the shopping cart!

[Back](#) [Cancel Order](#) [Submit Order](#)

Paso 8. A continuación se mostrará el resumen del pedido y la dirección de correo electrónico al que se ha enviado, indicando “Your submitted order information is:” en la parte superior derecha de la página.

Order Receipt
[?]

Your submitted order information is:

Order ID: 58FD0CC8-5EAB-FC1A-2419-10739A76AA4A ([Click to track](#))

Order status: PROCESSING

Submitted on: Wed Jan 28 2015 18:34:13 GMT-0600 (Hora estándar central (México)) (GMT-6:00)

Receive notifications: When orders reach a final state

Notifications will be sent to santillan.ei@gmail.com with further information.

← Return to Cart
Rerun Dataset Search
Start New Search →

Paso 9. Se recibirán tres correos en la dirección email que se registró: “Reverb-support”, “Support” y “LPDAAC” este último es donde se encuentra el enlace al FTP desde donde se podrá descargar el pedido en formato *.ZIP.

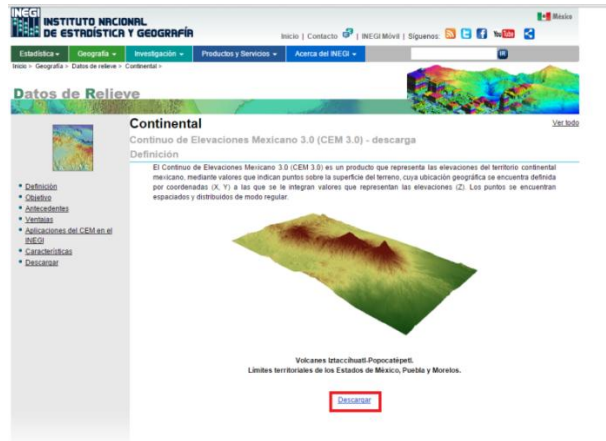
```
ORDERID: 0306930122
REQUESTID: 0303228871
USERSTRING:
FINISHED: 01/28/2015 18:34:48

MEDIATYPE: HTTP
MEDIAFORMAT: FILEFORMAT
HOST: e4ftl01.cr.usgs.gov
DIR: /PullDir/030322887111111
Pull Download Links:
http://e4ftl01.cr.usgs.gov/PullDir/030322887111111/
Download ZIP file of packaged order:
http://e4ftl01.cr.usgs.gov/PullDir/030322887111111.zip
EXPR: 02/07/2015 18:34:48
MEDIA 1 of 1
MEDIAID:
```

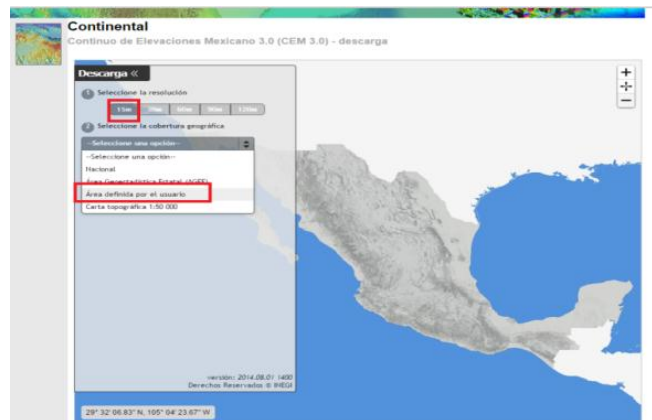
5.1.2 DESCARGAR MED DEL INEGI

Otro sitio para descargar Modelos De Elevación Digital, para México es <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevacion.es.aspx> en este sitio se encuentra el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) que es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano. Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular.

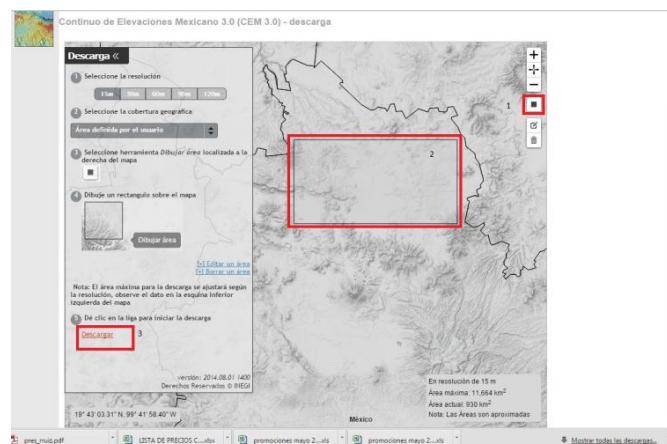
Paso 1. Ir a la siguiente dirección <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevacion.es.aspx> y dar click en descargar.



Paso 2. Seleccionar la resolución 15m y en la parte de selección cobertura geográfica dar click en Área definida por el usuario.



Paso 3. Dar click en el botón con forma de cuadro localizado en la parte superior derecha, inmediatamente seleccionar el área de nuestro interés y finalmente dar click en descargar y guardar el archivo.

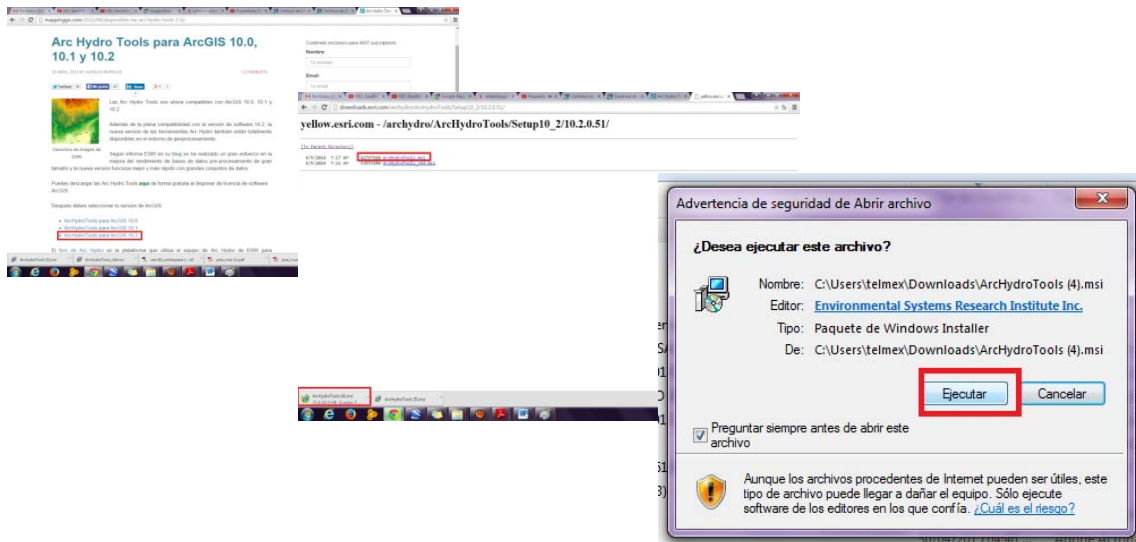


5.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

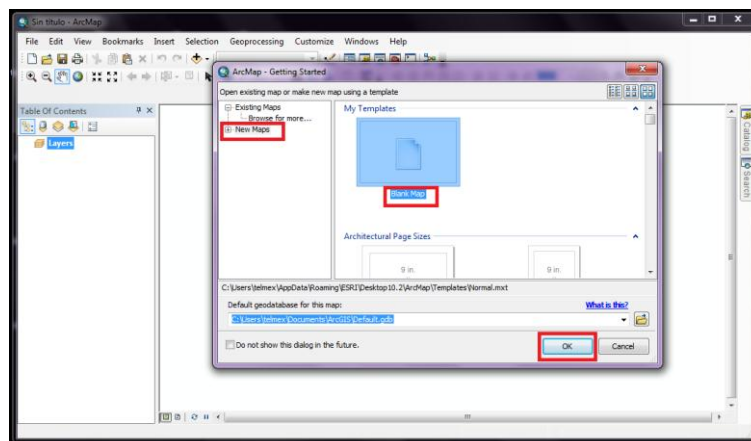
Una vez que se ha obtenido el modelo de elevación digital, ya sea de INEGI o de RECHERB ECHO NASA, se procederá a delimitar la cuenca y algunas de sus características morfo-métricas como son área, perímetro y pendiente entre otras.

Para ello habrá que auxiliarse de un programa llamado Arcmap versión 10.2. Lo primero que se necesita antes de empezar, es descargar una extensión para este programa que se llama Arc Hydro

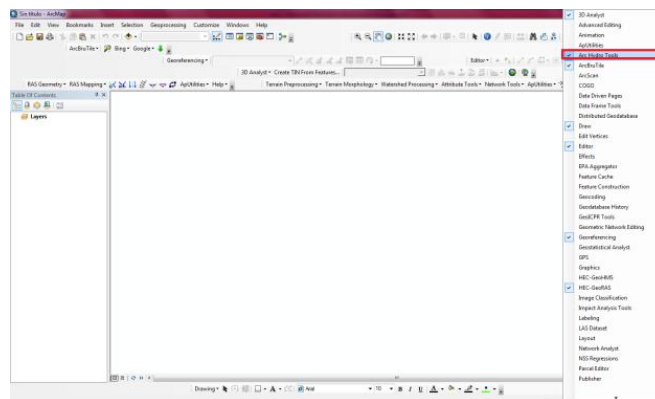
Para ello habrá que dirigirse a la siguiente dirección <http://mappinggis.com/2012/04/disponibles-las-arc-hydro-tools-2-0/> y seleccionar la versión de Arc map compatible, para este caso 10.2 y dar click en el archivo ArcHydroTools.msi (ya que el sistema operativo del ejemplo es 32 bits) y ejecutar el archivo



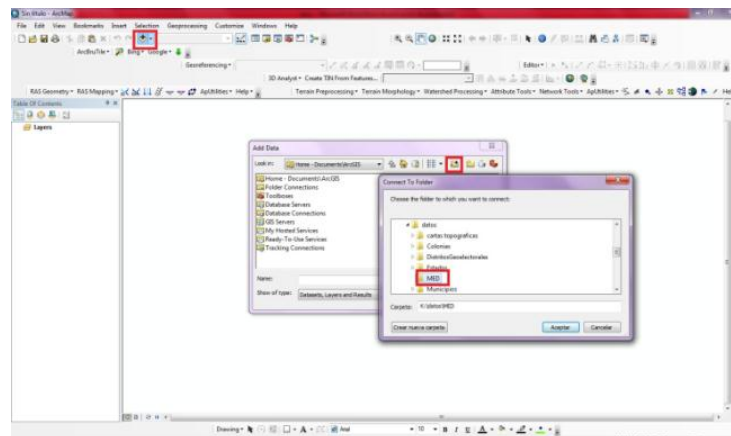
Paso 1. Abrir ArcMap 10.2 y dar click en new map



Paso 2. Una vez abierto ArcMap 10.2 se procede a agregar la extensión que se descargó previamente (Archydro), para ello en la barra de herramientas dar click derecho y seleccionar.



Paso 3. Conectar el folder donde se tiene el MED, para ello dar click en el botón Add Data, aparecerá un cuadro en el cual es necesario buscar el botón Connect To Folder (folder con signo más) y buscar la carpeta en la que se guardó el MED que se bajó de internet.



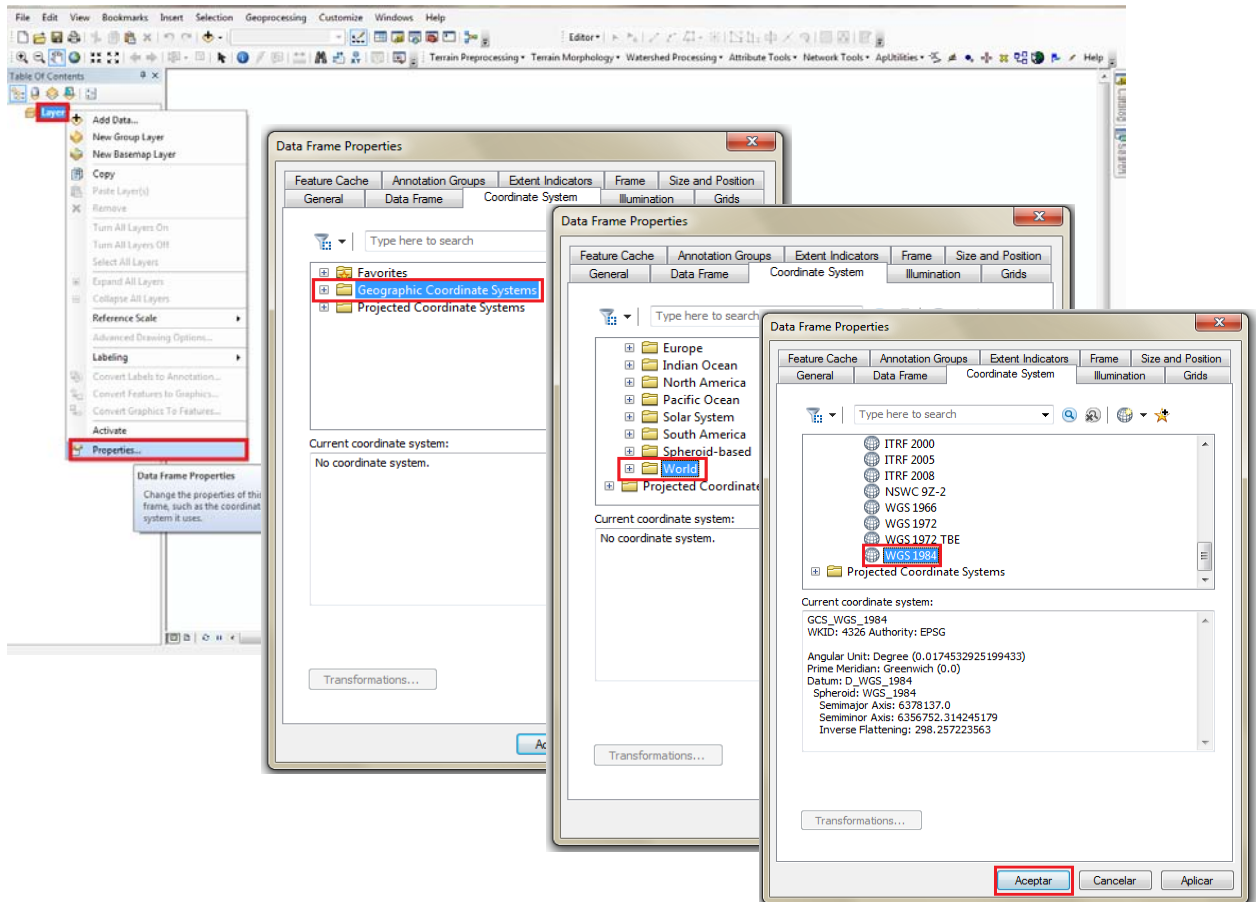
Paso 4. Colocar el sistema de coordenadas en el que se va a trabajar, para ello es necesario saber el sistema de referencia en el que está el MED. Para el caso de los MED que son bajados de INEGI, el datum corresponde a ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80, en coordenadas geográficas.

Pero como se vio en el punto 2.9.3 Considerando que las realizaciones recientes del WGS84 y los ITRF son consistentes en el orden de 1 centímetro, para aplicaciones cartográficas (representación en escalas 1:50,000 y menores) las posiciones obtenidas con GPS de manera autónoma pueden asumirse equivalentes a ITRF2008 y viceversa. Por lo tanto se usara el Datum WGS84

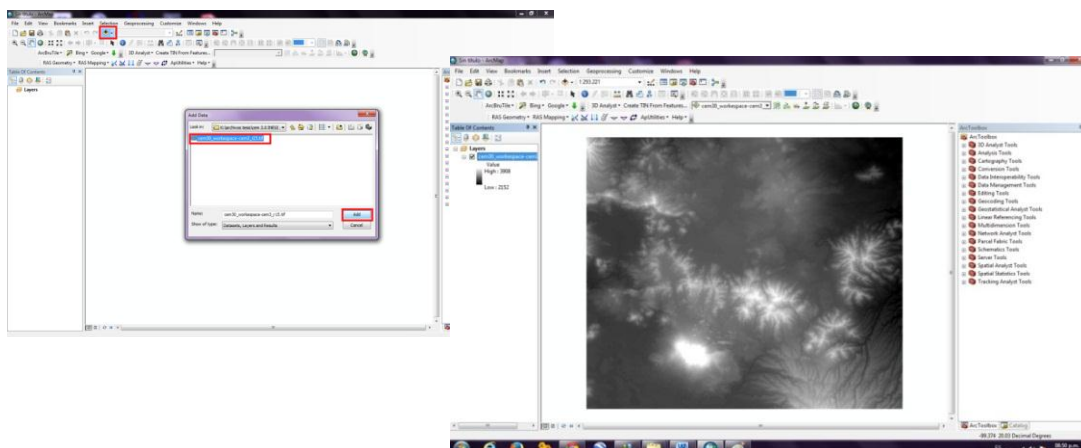
Para ello ir a Table of Contents dar click dercho Layers, aparecerá una nueva ventana, seleccionar la opción de abajo Properties, se abrirá la ventana de Data Frame Properties, seleccionar la pestaña Coordinate System, inmediatamente dar

click en la carpeta de Geographic Cordinated System, elegir World, y finalmente WGS1984 y dar click en aceptar.

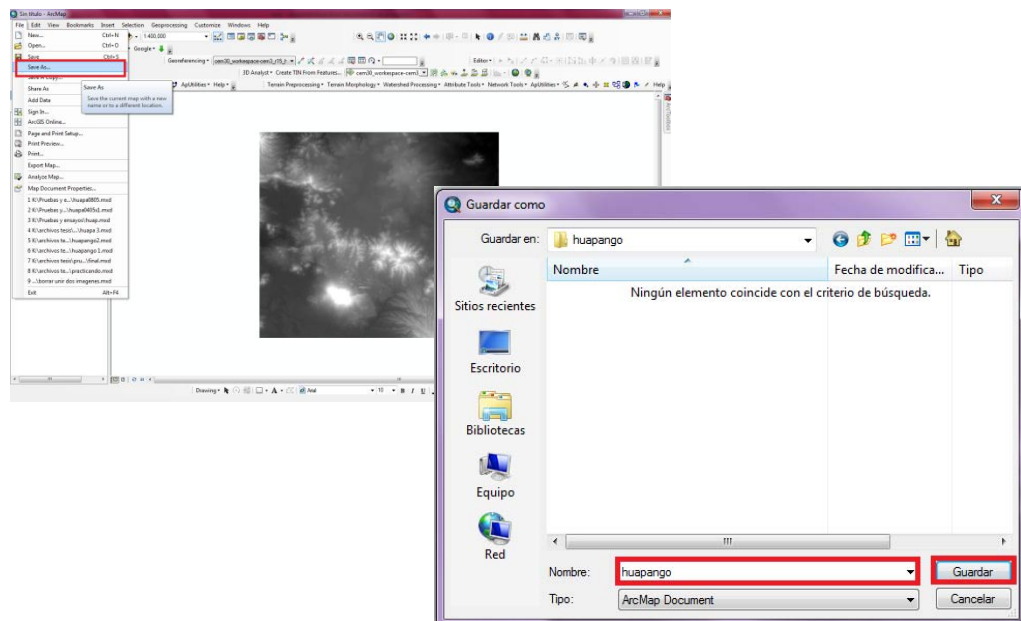
El área de trabajo estará en el Datum WGS84 y todas las capas que se creen estarán en esta Datum.



Paso 5. Agregar el raster que se descargó de INEGI o de RECHERB. Para ello dar click en el icono con forma de rombo y signo más, nos aparecerá una ventana, buscar el archivo que se bajó de la página de INEGI o RECHERB anteriormente y dar click en el botón add, se cargará el contorno de nuestra área de estudio

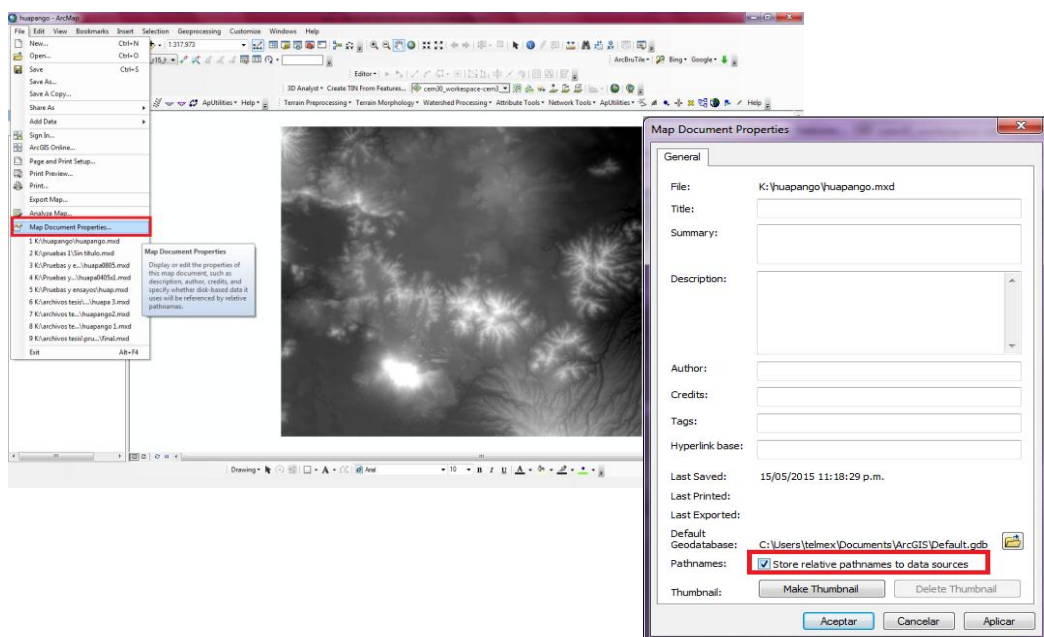


Paso 6. Guardar el proyecto, para ello ir a file y dar click en save as, aparecerá la ventana de guardar como, seleccionar la ubicación donde se guardará el proyecto, esto es similar a como se guarda cualquier documento.



Es preferible fijar la ruta de bases de datos y capas que se guarden de manera relativa, esto permite a una capa y a sus datos asociados a moverse a cualquier unidad de disco, sin tener que reparar los enlaces de datos de la capa en el documento.

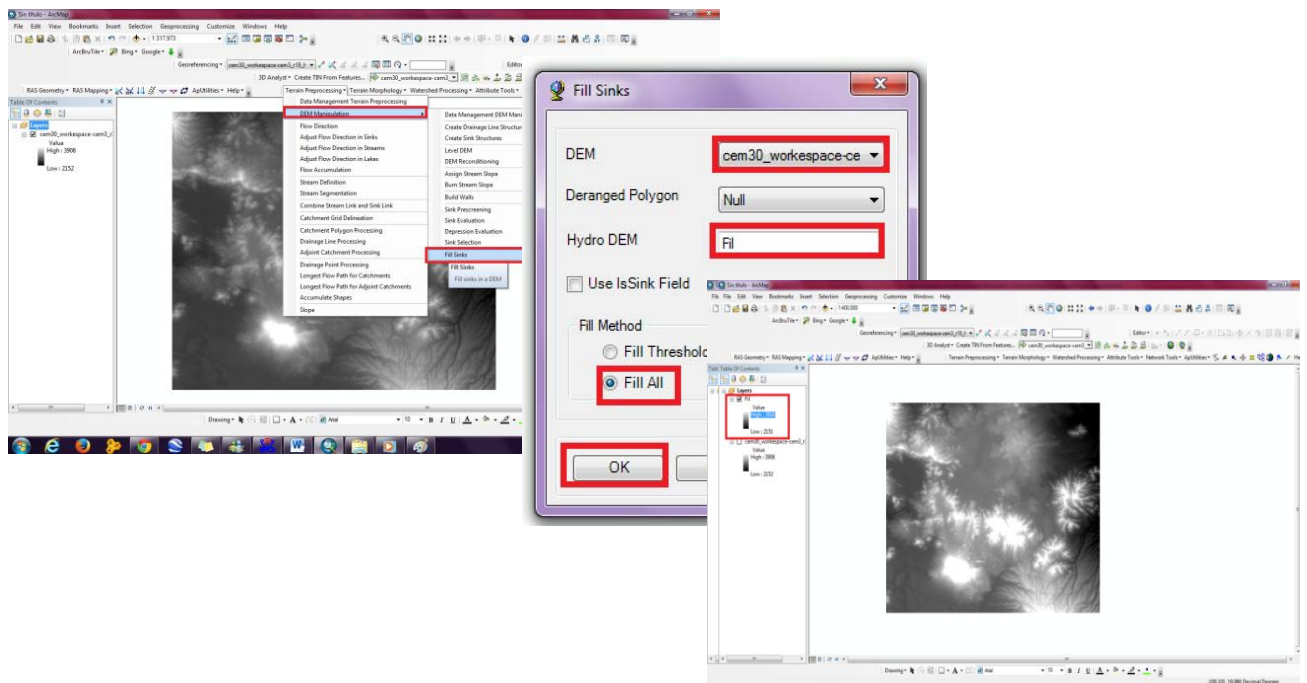
Para ello ir a file y dar click en Map Document Properties, aparecerá la ventana de Map Document Properties activar la opción de Store relative pathnames to data sources y dar click en aceptar.



Paso 7. Una vez cargado el MED y seleccionada la ubicación del proyecto, se procede a hacer un pre-procesamiento del terreno, llenando todos los posibles puntos donde no hay posibilidad de salida del agua, para ello se hará uso de la extensión Archydro, dar click en Terrain preporcesing, luego en DEM Manipulation y finalmente en Fill Sinks, enseguida aparecerá la ventana de Fill Sinks la cual se tiene que llenar con los siguientes datos

- DEM: Seleccionar el MED que se bajó de Internet
- Hydro DEM: (Fil) es el nombre que se le dará al nuevo raster por defecto
- Fill Metho: Seleccionar (Fill All) para que llene todos los huecos y dar click en OK

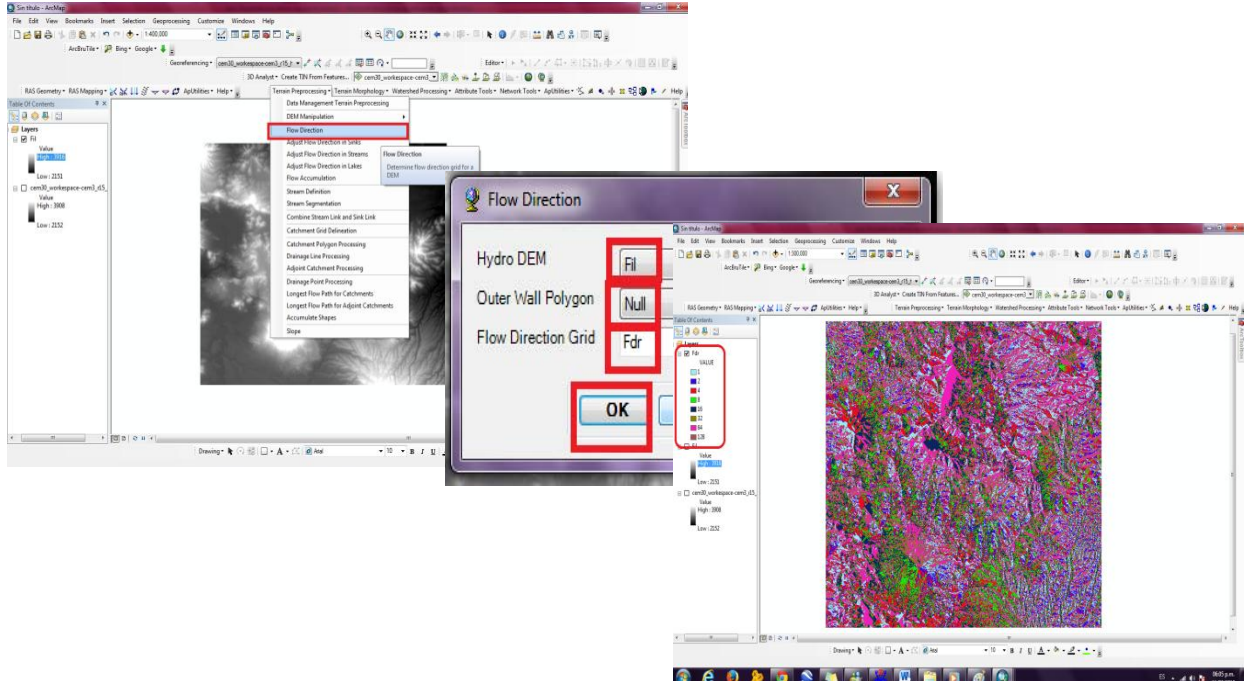
El resultado será un raster que luce igual que al anterior pero con la diferencia que en este nuevo raster el agua siempre tendrá un lugar hacia donde fluir



Paso 8. Una vez llenados los posibles puntos de estancamiento del agua se procederá a detectar las direcciones de flujo de cada celda para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Flow direction, aparecerá la ventana de Flow Direction la cual se llenara con la siguiente información.

- Hydro DEM: Indicar el DEM al cual se le llenaron los posibles estancamientos en este caso (Fil)
- Outer wall Polygon: dejar el que viene por defecto (Null)
- Flow Direction Grid: (Fdr) es el nombre que se le dará al nuevo raster por defecto dar click en OK

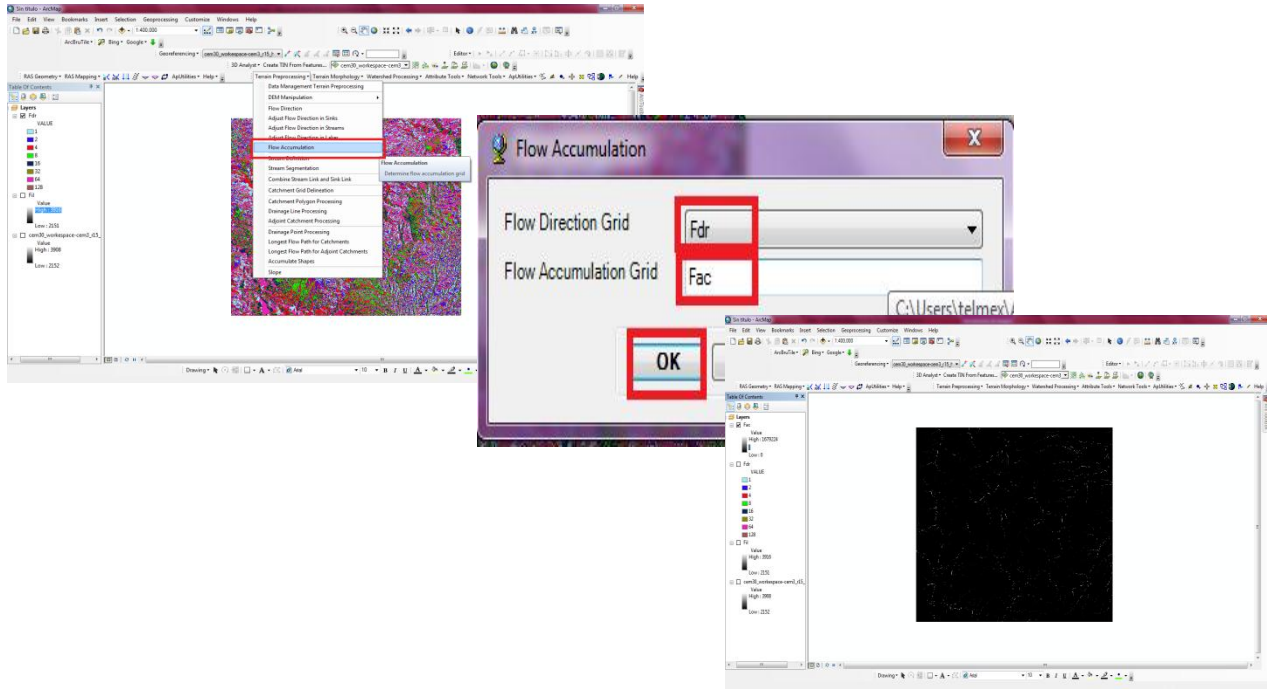
El resultado será un raster, en el que el código de colores de cada pixel corresponde a las posibles 8 direcciones que sigue el flujo de agua hacia sus celdas vecinas.



Paso 9. Una vez que se ha determinado las direcciones de flujo, se procederá a calcular como se acumula dicho flujo, para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Flow Accumulation, aparecerá la ventana de Flow Accumulation la cual se llenará con la siguiente información.

- Flow Direction Grid: Indicar el mapa de direcciones. En este caso se denomina (Fdr)
- Flow Accumulation Grid: Dejar el nombre por defecto al archivo de salida (Fac) y dar click en OK

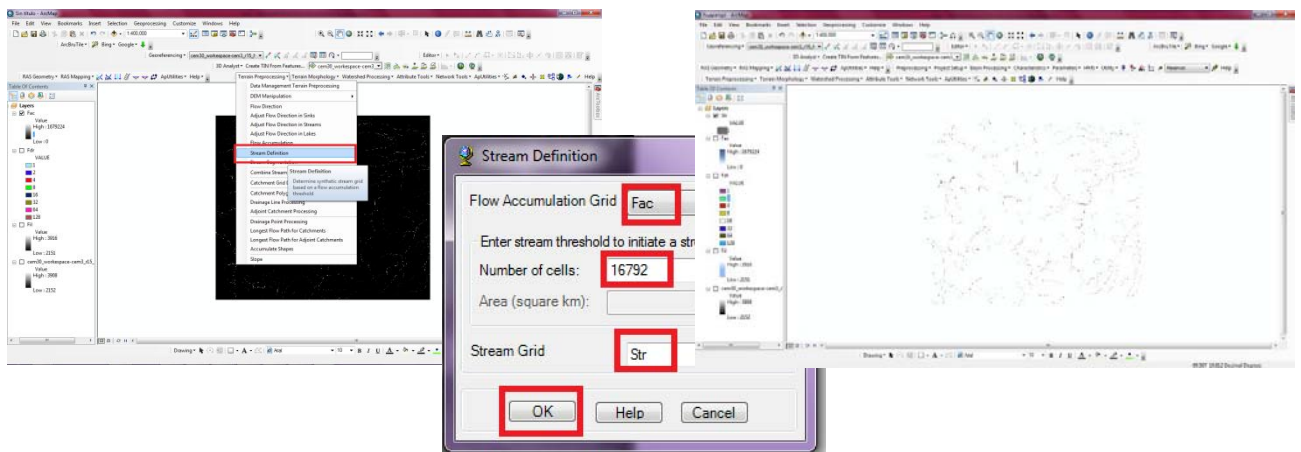
El resultado será un raster, con información de como fluirá el agua a lo largo de la superficie, cada celda tiene un valor que le dice al programa la cantidad de celdas aguas arriba que llegan a drenar a ese punto en particular.



Paso 10. Una vez que se ha determinado el raster de acumulación de flujo es necesario determinar el raster de la red de drenaje, para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Stream definition, aparecerá la ventana de Stream Definition la cual se llenará con la siguiente información.

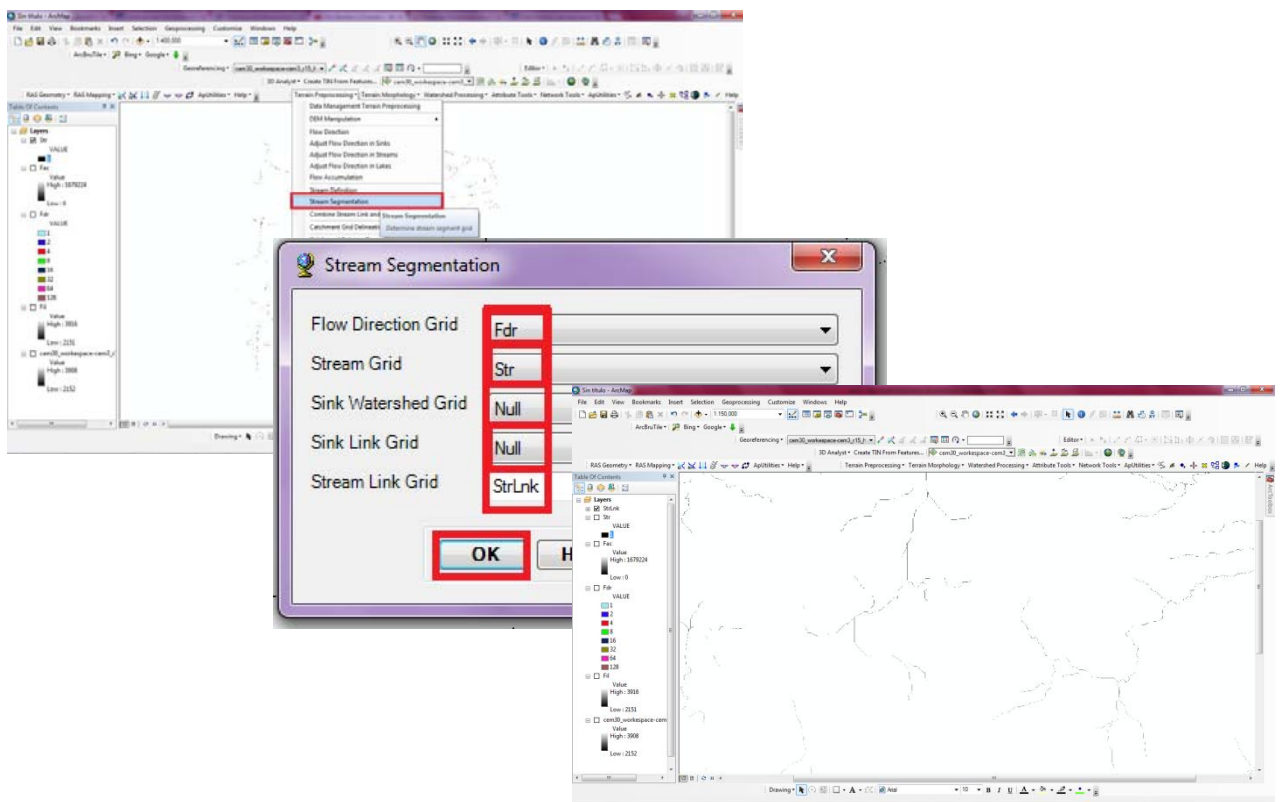
- Flow accumulation Grid: Introducir el nombre del raster de acumulación de flujo. que se denomina (Fac)
- Number of cell: Dejar las que vienen por defecto
- Stream Grid: Dejar el nombre del archivo de salida por defecto. El cual es (Str) y dar click en OK

El resultado será un raster con los posibles cauces.



Paso 11. Una vez que se ha determinado los posibles cauces, se procederá a individualizarlos para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Stream Segmentation, aparecerá la ventana de Stream Segmentation la cual se llenará con la siguiente información

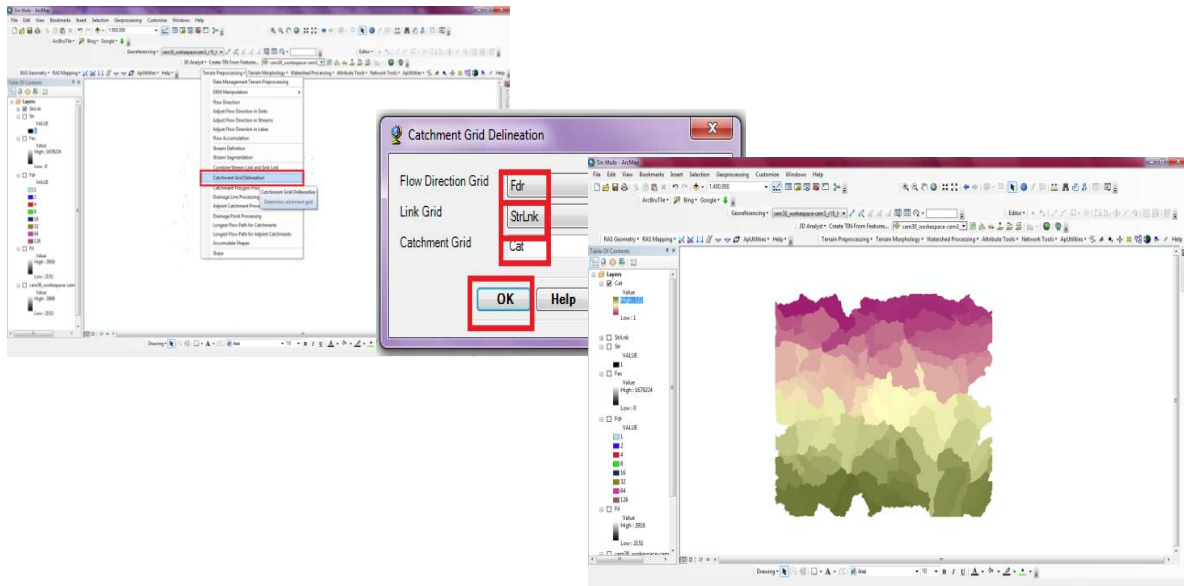
- Flow Direction Grid: Raster de dirección de flujo. En este caso (Fdr)
- Stream Grid: Indicar el raster de corrientes creado. Para el ejemplo es (Str)
- Sink Watershed Grid: (Null)
- Sink Link Grid: (Null)
- Stream Link Grid: Dejar el Nombre del archivo de salida por defecto, en este caso será (StrLnk).



Paso 12. Una vez que se ha individualizado los cauces, se procederá a delimitar las cuencas, para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Catchment Grid Delineation, aparecerá la ventana de Catchment Grid Delineation la cual se llenará con la siguiente información

- En Flow Direction Grid: Raster de dirección de flujo, en este caso (Fdr)
- En Link Grid: (StrLnk)
- Catchment Grid: Dejar el nombre del archivo de salida por defecto, en este caso será (Cat).

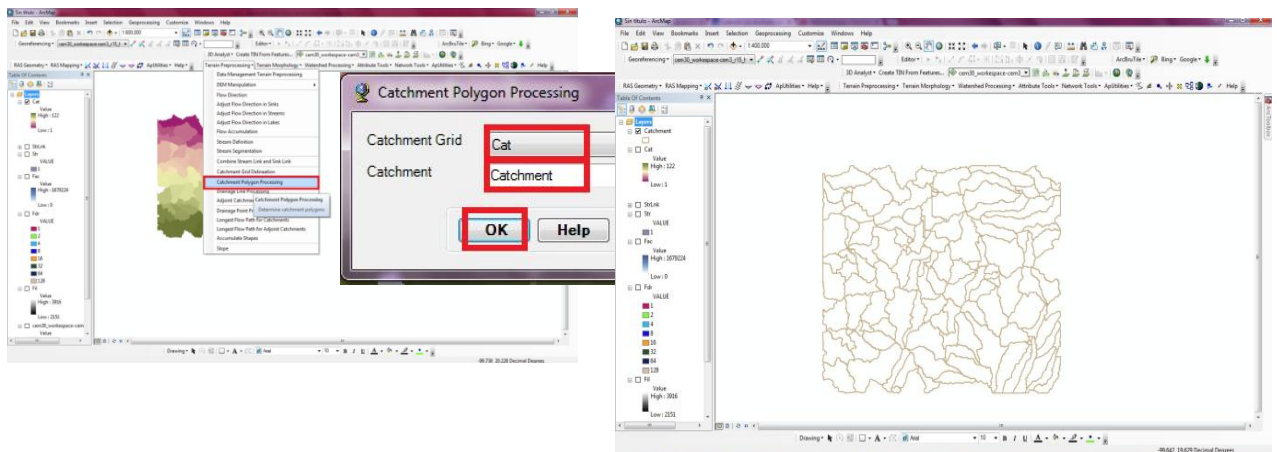
El resultado será un raster con las áreas de captación definidas



Paso 13. Una vez que se ha obtenido las cuencas en formato raster, se deben convertirlas a polígonos, para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Catchment Polygon Processing, aparecerá la ventana de Catchment Polygon Processing, la cual se llenará con la siguiente información

- En Catchment Grid: Seleccionar el raster de cuencas que se ha calculado en el paso 11 y que se denominó (Cat).
- Catchment: Introducir el nombre con el que se guardara el shape de cuencas, en este caso se dejó el nombre por defecto (Catchment)

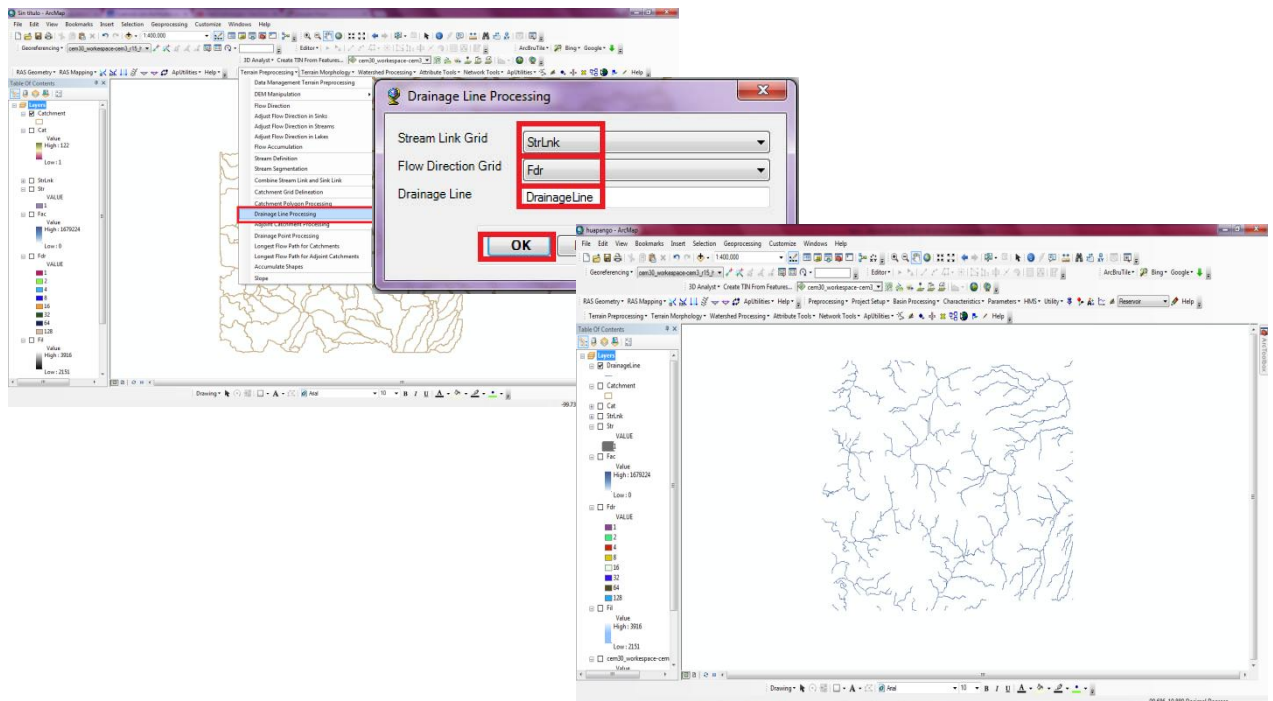
El resultado será una capa en formato polígono con las áreas de captación definidas



Paso 14. Ahora se procederá a convertir los cauces en polilíneas para ello dar click en Terrain Preprocessing seguido de Drainage Line Processing, aparecerá la ventana de Drainage Line Processing, la cual se llenará con la siguiente información

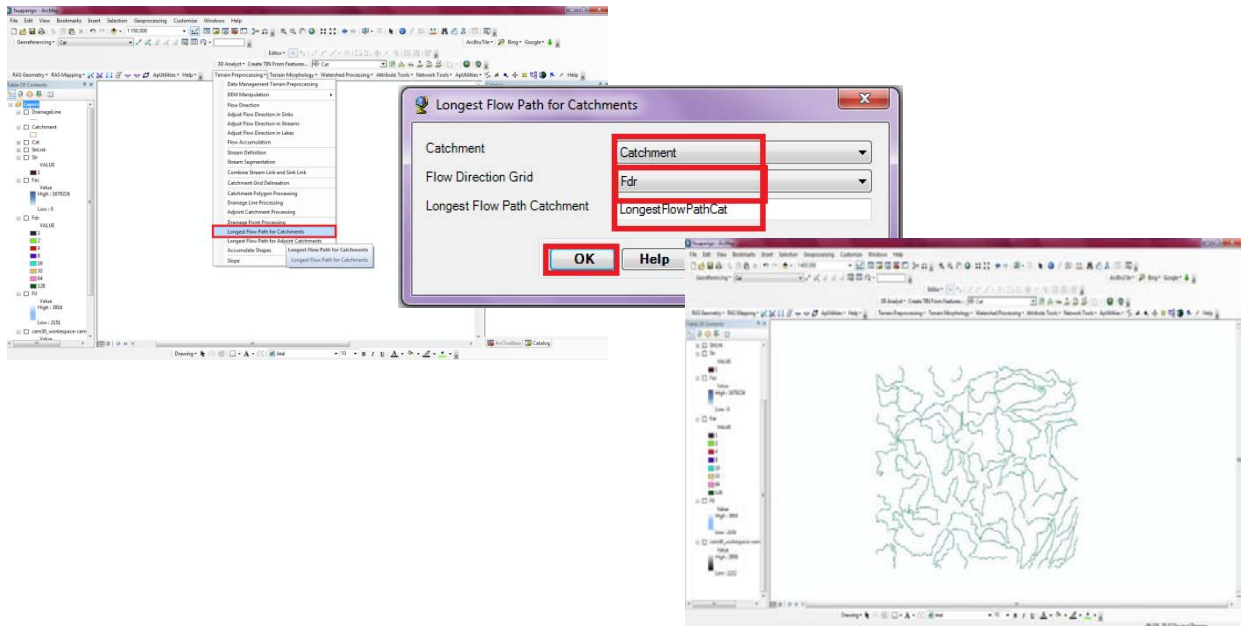
- Stream Link Grid: Introducir el raster drenaje segmentado que fue calculado en el paso 11 y que denominó (StrLnk)
- Flow Direction Grid: Seleccionar la dirección de flujo calculado en el paso 8 y cuyo nombre es (Fdr)
- Drainage Line: Introducir el nombre con el que se quiere guardar el shape de drenajes, en este caso se usó el nombre por defecto (DrainageLine)

El resultado será una capa con los cauces en formato poli-línea

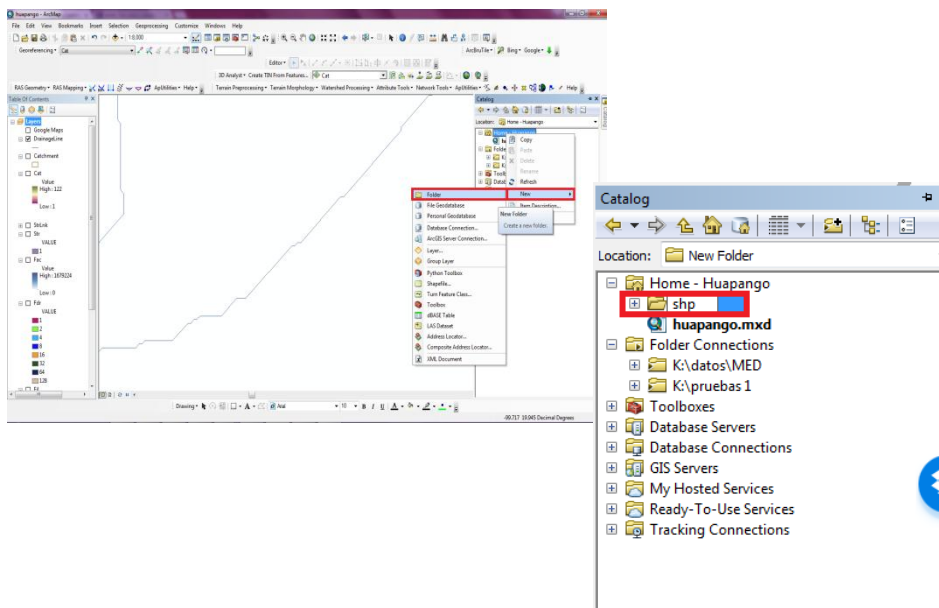


Paso 15 Generar las rutas más largas de flujo asociados a las cuencas. Para ello se selecciona Terrain Preprocessing, seguido de Longest Flow Path for Catchments, aparecerá la siguiente ventana. Tener paciencia en este paso, el programa puede demorar algunos minutos.

- Catchment: Introducir el raster de las cuencas que para el ejemplo que venimos realizando es (Catchment)
- Flow Direction Grid: Ingresar el raster de dirección de flujo (Fdr)
- Longest Flow Path Catchment: (LongestFlowPathCat).



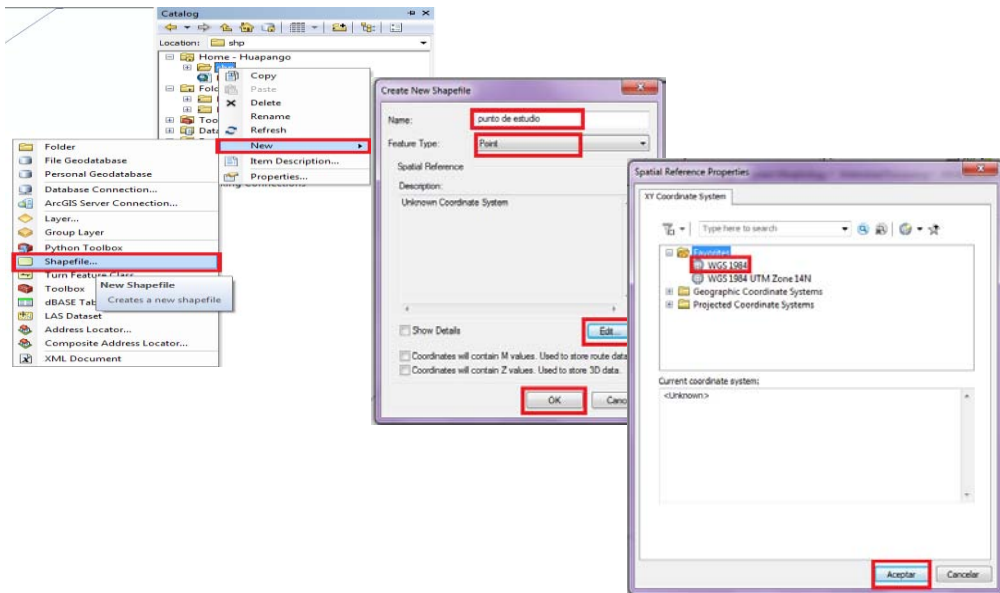
Paso 16. Crear el punto a partir del cual se quiere generar el área de la cuenca, es decir nuestro punto de estudio, primero es necesario crear un shapefile para dibujar este punto. Para ello ir a catalog, damos click derecho con el mouse en Home-Huapango, elegir la opción new y luego folder y darle el nombre de su preferencia, para este ejemplo se usara shp



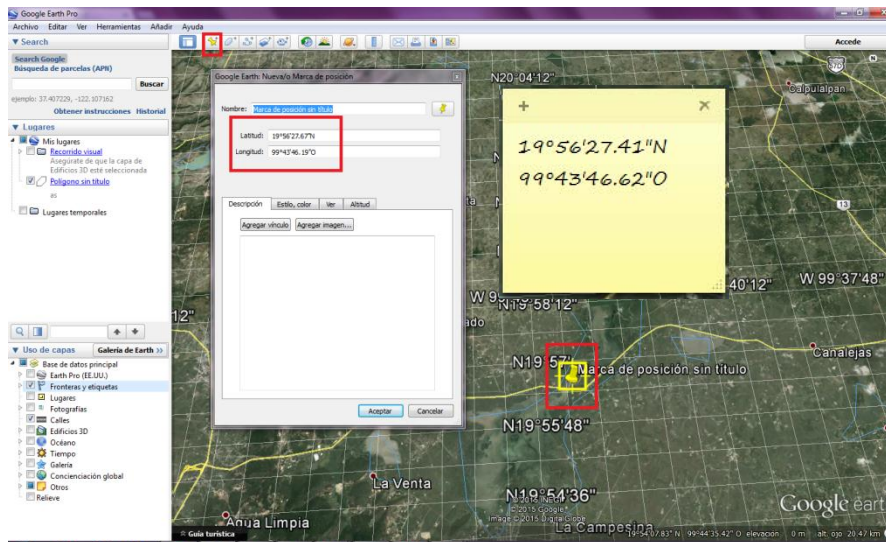
Una vez que se ha creado la carpeta dar click izquierdo en está, elegir la opción new y luego la opción shapefile, aparecerá la ventana de Create New Shapefile, la cual se llenará con la siguiente información

- Name: El nombre con el que se llamará el shape para el ejemplo se usará (punto de estudio)

- Feature Type: El tipo de elemento que se podrá trabajar en este shapefile serán puntos (Point)
- Edit: Nos abrirá una nueva ventana de Spatial Reference Properties, seleccionar WGS1984, se regresará a la ventana anterior y dar ok

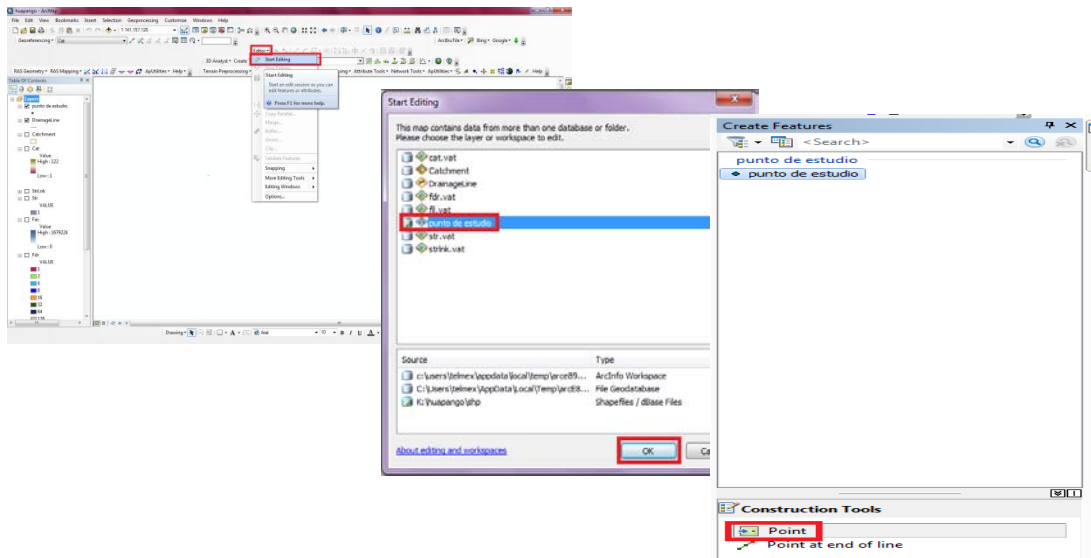


Una vez creado el shapefile se procede a ubicar el punto de estudio, para esto es necesario usar Google Earth, dar click en el botón de marcar posición y ubicar la tachuela en el punto de estudio deseado, copiar la latitud y la longitud en notas

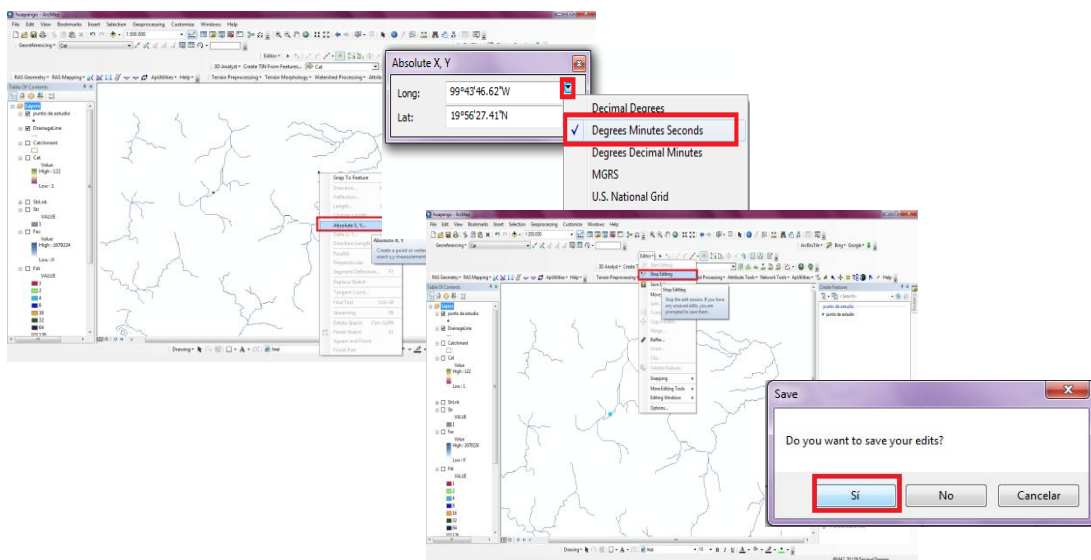


Una vez que se tiene las coordenadas geográficas del punto, ir de nuevo a arcmap, y dar click izquierdo en editor y acto seguido en Start Editing se abrirá la

ventana de la capa que se quiere editar, se selecciona punto de estudio y en la ventana de Create Features, seleccionar la opción Points



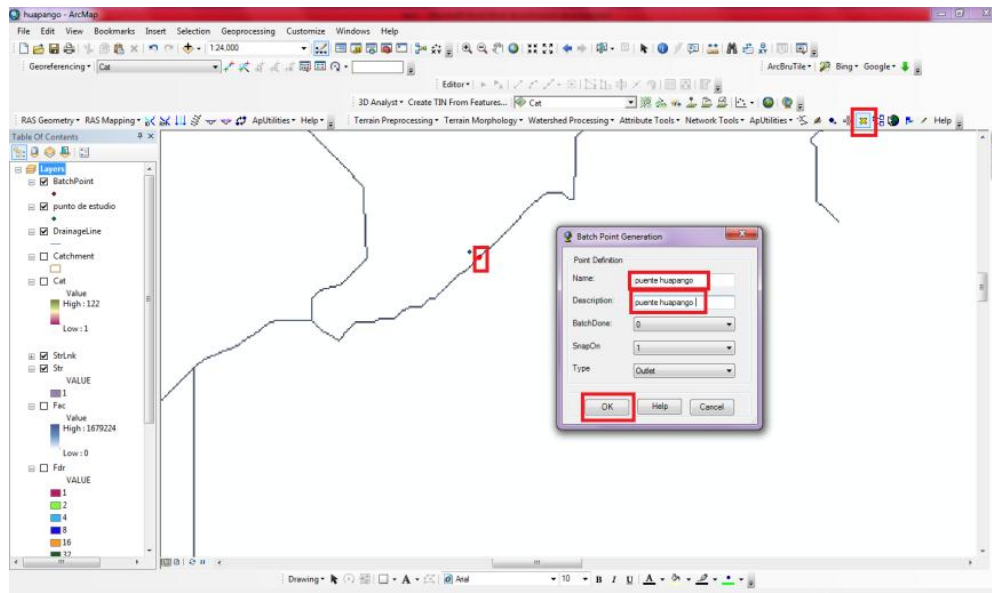
En seguida colocar el cursor en el área de trabajo y dar click derecho, se desplegará una lista de opciones, elegimos Absolute X,Y, se abrirá una nueva ventana en la cual se copiarán las coordenadas obtenidas previamente es importante asegurarse de marcar la opción grados minutos y segundos y recordar que Oeste es West por lo tanto es importante poner W al final de la longitud, se da click en Enter con el teclado, ir de nuevo a Editor, seleccionar la opción Stop Editing, aparecerá la ventana de Save y dar click en si



Paso 17. Crear punto de Salida de la cuenca (es aquel punto a partir del cual se quiere generar el área de la cuenca aguas arriba), para ello dentro de la herramienta Arc hydro dar click en el botón de Batch Point Generation (tache

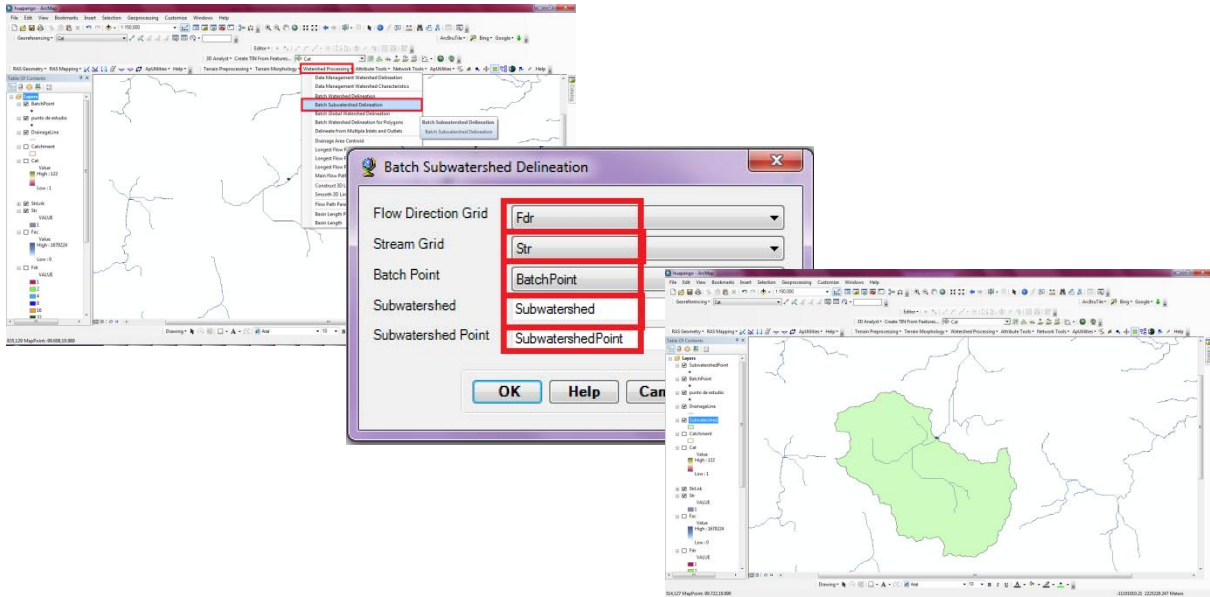
amarillo) y dar click lo más cerca posible de un cauce y de nuestro punto de estudio localizado en el paso anterior, se abrirá la ventana de Batch Point Generation la cual se llenará con la siguiente información.

- Name: Nombre que se le dará a el punto, para el ejemplo (puente huapango)
- Description: Por simplicidad dejar el nombre (puente huapango)
- BatchDone: 0 este número indica que aún no se ha realizado ningún proceso previo en este punto
- SnapOn: 1 con lo cual se indica que situé el punto sobre el cauce más cercano
- Type: Outlet y dar click en OK



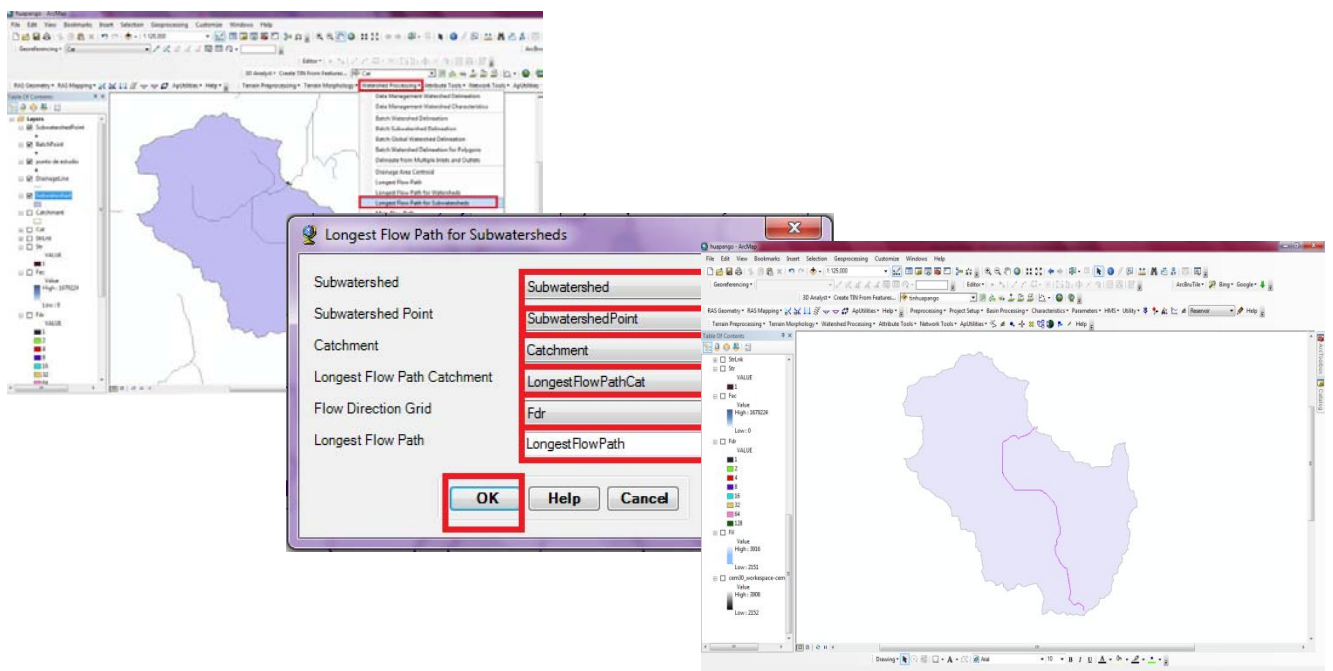
Paso 18. Generar el área de la cuenca, a partir del punto de interés es decir el punto de salida localizado en el paso anterior para ello dar click en Watershed Processing seguido de Batch Subwatershed Delineation, aparecerá la ventana de Batch Subwatershed Delineation, la cual se llenara con la siguiente información

- Flow Direction Grid: (Fdr)
- Stream Grid: (Str)
- Batch Point: (BatchPoint)
- Subwatershed: (Subwatershed)
- Subwatershed Point: (Subwatershed Point)



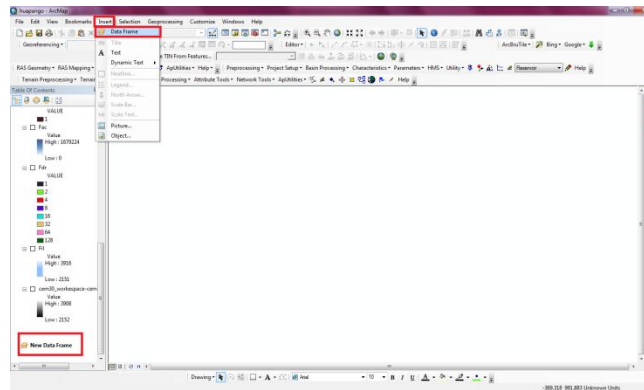
Paso 19. Generar la longitud más larga de flujo de una cuenca, para ello ir a Watershed Processing y seleccionar Longest Flow Path for Subwatershed, se abrirá la ventana de Longest Flow Path For Subwatersheds, la cual se llenará con la siguiente información

- Subwatershed: Subcuencas generadas con Batch subwatershed Delineation (Subwatershed)
- Subwatershed point: Puntos de concentración de las subcuencas generados con Batch subwatershed Delineation (SubwatershedPoint)
- Catchment: (Catchment)
- Longest Flow Path Catchment: (LongestFlowPathCat)
- Flow Direction Grid: Raster de dirección de flujo (Fdr)
- Longest Flow Path: (LongestFlowPath1)

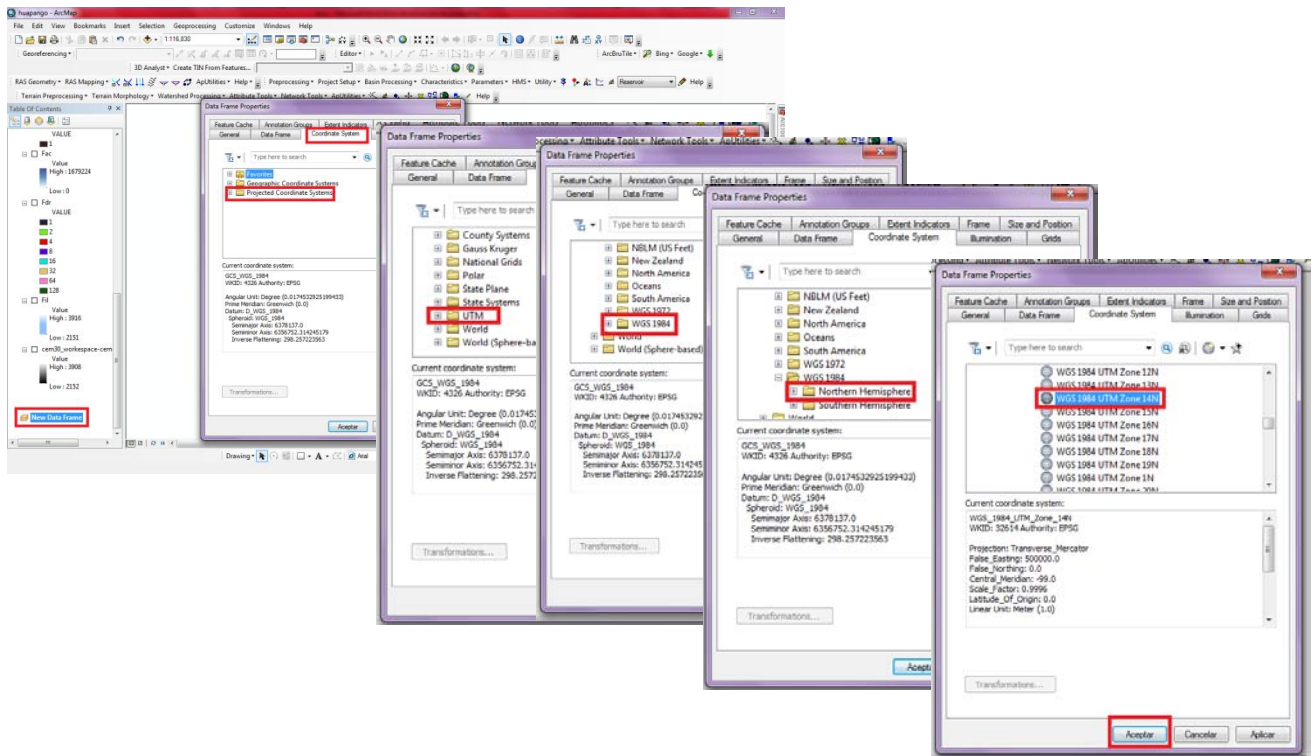


5.3 OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO MÉTRICAS DE LA CUENCA

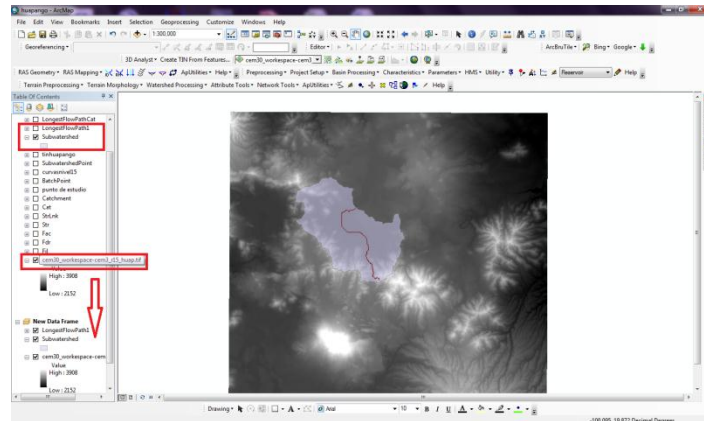
Paso 1. Agregar un Data Frame, para ello en la barra de herramientas ir a Insert dar click en Data frame, aparecerá el nuevo Data Frame en la tabla de contenidos (guardar los cambios., cerrar y volver a abrir el archivo).



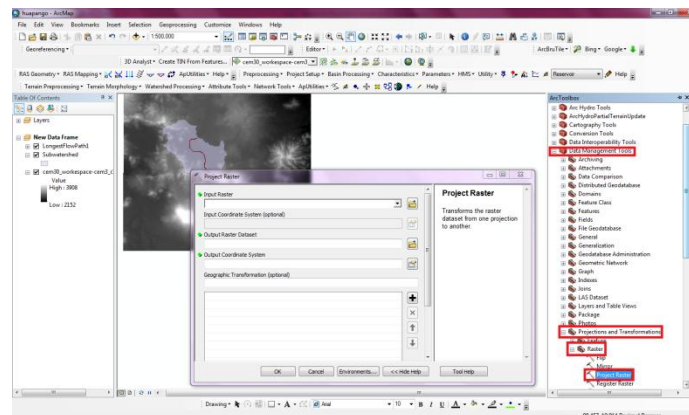
Paso 2. Se coloca el sistema de coordenadas en el cual se va a trabajar en el nuevo data frame, en este caso se usará el sistema de coordenadas UTM, ya que al calcular distancias es el que presenta menos errores con el programa, para ello dar click izquierdo en el nuevo data frame, se abrirá la ventana de Data Frame Properties, seleccionar la pestaña de Coordinate System y dar click en la carpeta de Projected Coordinate System, elegir UTM, después WGS 1984 y enseguida Northern Hemisphere y finalmente zona 14 y dar click en aceptar, posteriormente en el cuadro de Project Raster dar OK



Paso 3. Pasar los raster y shapes que se van a ocupar a este nuevo data frame, los cuales para este ejemplo serán el dem original (raster) que se bajó de INEGI (cem30_workspace-cem3_r15 (huapango)), el shape del cauce (LongestFlowPath1) y el shape de la cuenca (Subwatershed), para ello, se seleccionan uno por uno con click derecho y se arrastran hasta el nuevo data frame



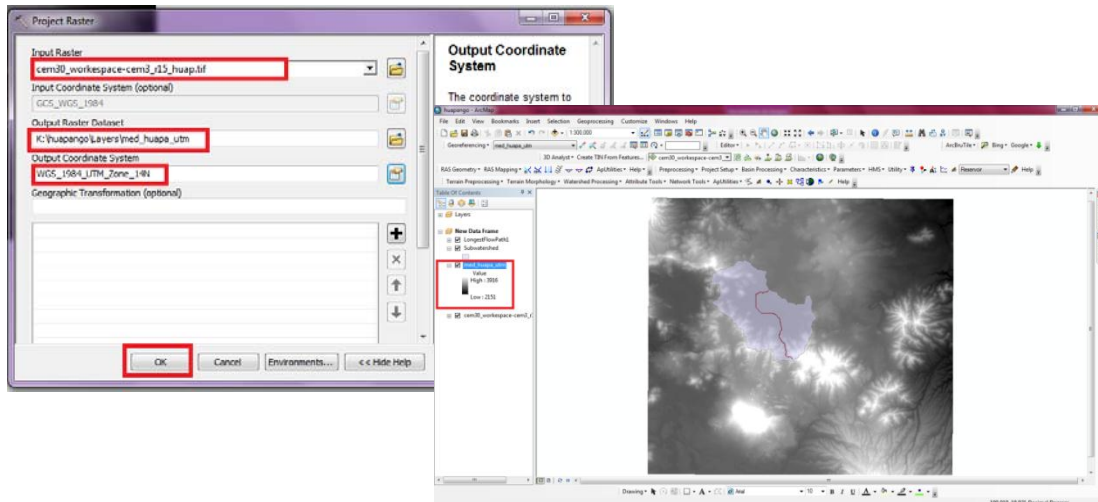
Paso 4. Proyectar el DEM (raster) en coordenadas UTM para eso dar click en ArcToolbox y desplegar Data Management tools, para posteriormente desplegar Projections and Transformations y a continuación Raster y finalmente Project Raster, con lo cual se abrirá la ventana de Project Raster



Se prosigue a llenar la ventana de la siguiente manera:

- Input Raster: Seleccionar el MED que se bajó de INEGI,
- Input Coordinate System (optional): Se llenará por default con el sistema de referencia del MED
- Output Raster Dataset: Seleccionar la ubicación y nombre del nuevo raster, es importante seleccionar una ubicación fácil de recordar.(K:\huapango\Layers\med_huapa_utm)
- En Output coordinate System: Para el caso de México, Desplegar Projected Coordinate Systems, elegir UTM y luego WGS 1984 y finalmente zona 14 y dar click en aceptar, y luego en el cuadro de Project Raster dar OK

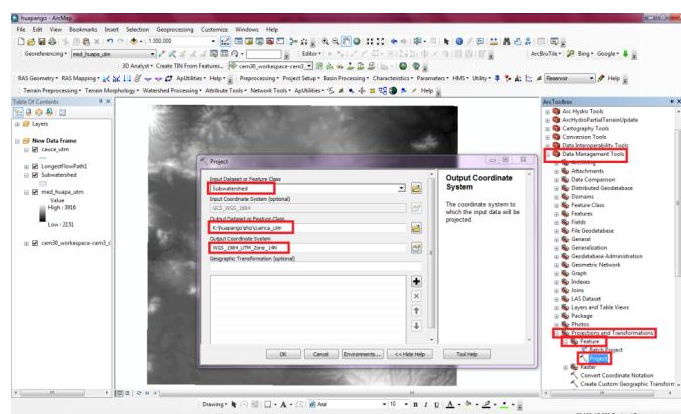
Se agrega un nuevo raster el cual está listo para hacer algunos procesos



Paso 5. Calcular el área y perímetro de la cuenca, para ello lo primero que se necesita es proyectar el shape de Subwatershed en coordenadas UTM, para ello ir al arctoolbox y seleccionar Data Management Tools, en seguida buscar Projections and Transformations y como es un shape seleccionar Features, dar click en Project y se abrirá la ventana de Project, la cual se llenará con la siguiente información

- Input DataSet or Feature Class: Shape que se quiere proyectar en coordenadas UTM ((Subwatershed))
- Input Coordinate System(Optional): se llena por defecto con el sistema que tiene nuestra shape
- Output DataSet or Feature Class: Ubicación y nombre con el que se quiere guardar la nueva shape de salida (K:/huapango/shp/cuenca_utm)
- Output Coordinate System: Elegir el sistema en el cual se quiere proyectar la shape en este caso utm (WGS_1984_UTM_Zone_14) y dar click en OK

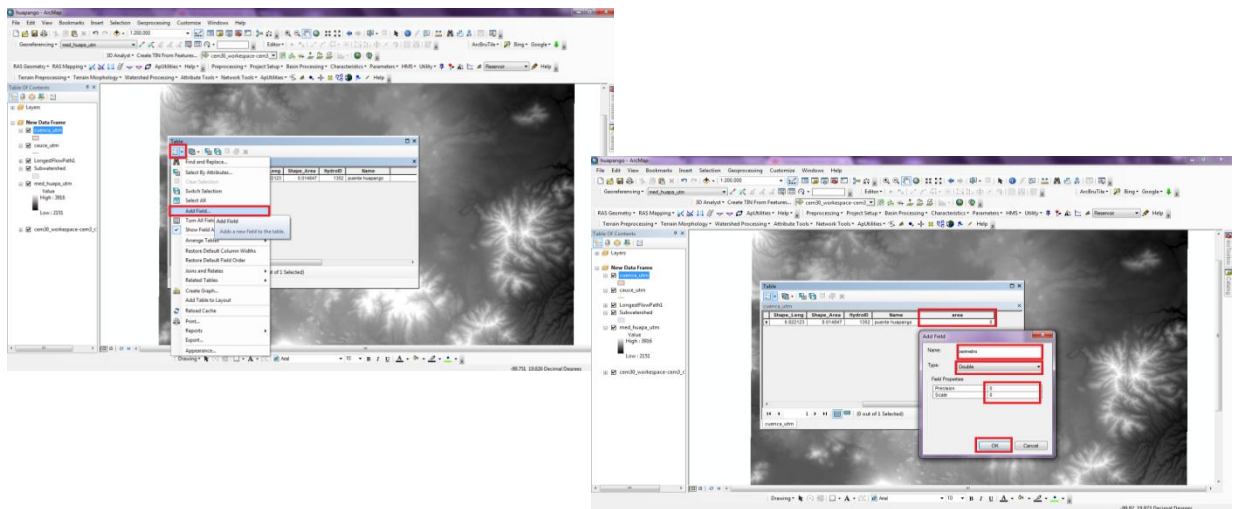
El resultado será una nueva shape proyectada en coordenadas UTM, la cual aparecerá en la tabla de contenidos



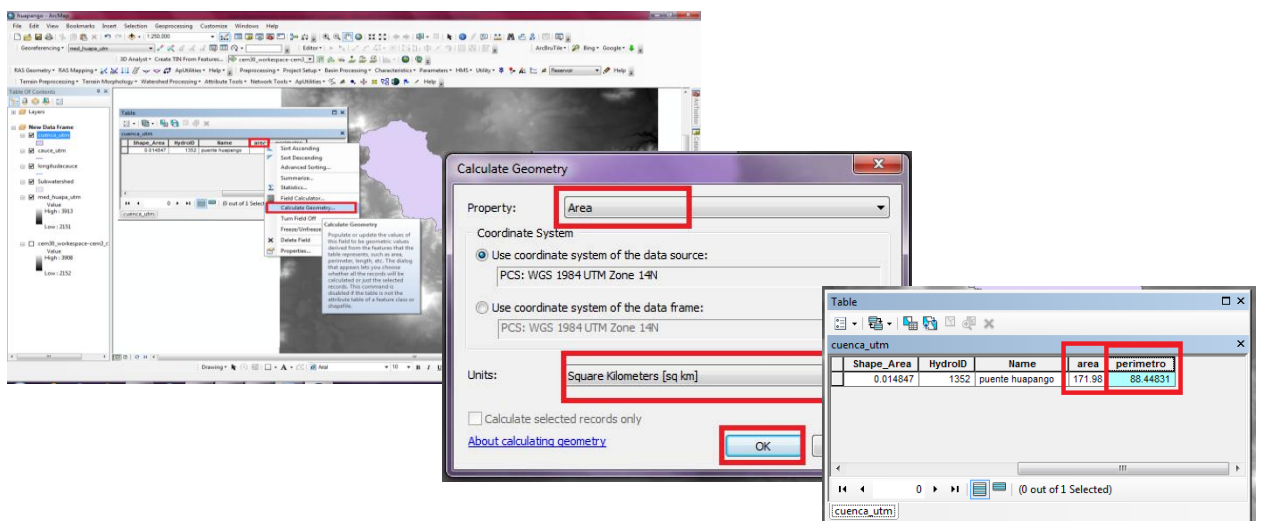
Una vez que se tiene la shape (cuenca_utm) en la tabla de contenidos, dar click derecho sobre está y se dirigirá a Opent Attribute Table, se abrirá la ventana de table, dar click en el botón Table Option y seleccionar Add Fiel, se abrirá la ventana de Add Field la cual se llenará con la siguiente información.

- Nombre: área
- Type: Double
- Presicion: Valor por defecto (0)
- Scale: Valor por defecto (0) y dar OK

Hacer lo mismo para perímetro, se agregará dos campos nuevos en la tabla área y perímetro

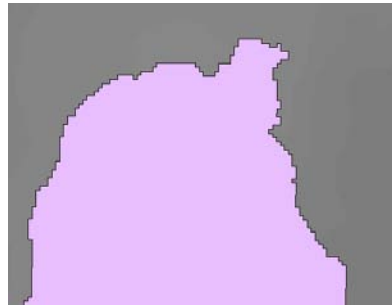


Ahora calcular los valores del área, para ello dar click derecho en el campo área, elegir la opción Calculate Geometry, se abrirá la ventana de Calculate Geometry, en Propriety, elegir área y las unidades en Square Kilometer, dar ok, devolverá el área en ese campo, hacer algo similar para el perímetro.



Área: 171.98km² y Perímetro: 88.44km

Como se puede observar el perímetro difiere mucho del obtenido por el método tradicional, esto se debe a que los datos raster están en celdas y al momento de crear la cuenca, se crearon ángulos muy cerrados, como se observan en la siguiente figura, mismos que serán necesario suavizar, de lo contrario puede producir errores de hasta un 25% más en la longitud, respecto a la longitud verdadera



Paso 6. Suavizar ángulos cerrados del perímetro de la cuenca, para ello dar click en Arctoolbox y desplegar Cartography tools, para posteriormente desplegar Generalization y finalmente Smooth Polygon, con lo cual se abrirá la ventana de Smooth Polygon, la cual se llenará con la siguiente información.

- Input Features: Seleccionamos la capa que se quiere suavizar (cuenca_utm)
- Output Feature Class: Nombre y dirección donde se quiere guardar la nueva capa (K:\huapango\shp\smooth_cuenca_1.shp)
- Smothing Algorithm: Paek
- Smothing Tolerance: 200, meters y dar click en OK

El resultado será una nueva capa de la cuenca con el contorno suavizado, abrir la tabla de atributos de esta nueva capa y recalcular el área y el perímetro para actualizar las medidas

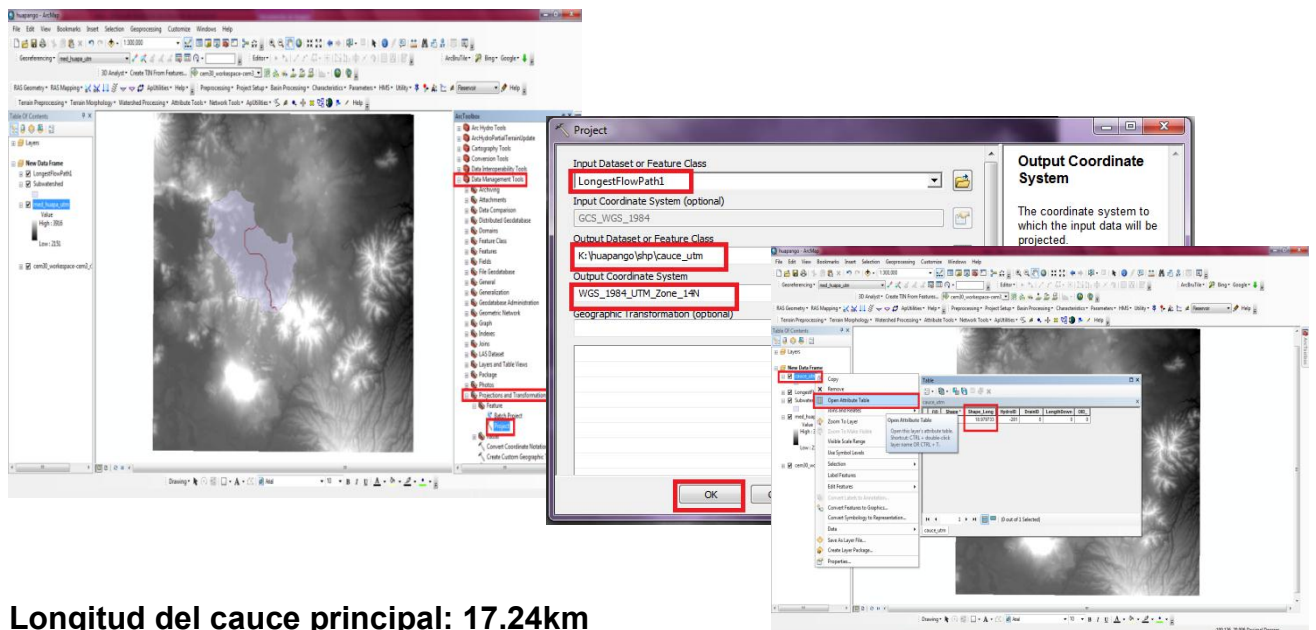
| Shape_Area | HydroID | Name | area | perimetro |
|------------|---------|-----------------|------------|-----------|
| 0.014847 | 1139 | puente huapango | 171.988344 | 67.264266 |

Área: 171.99 km² y Perímetro: 67.26km

Paso 7. Calcular la longitud del cauce principal de la cuenca, para ello se necesita proyectar el shape de LongestFlowPath1 en coordenadas UTM, para ello ir al arctoolbox y seleccionar Data Management Tools, en seguida buscar Projections and Transformations y como es un shape seleccionar Features dar click en Project y se abrirá la ventana de Project, la cual se llenará con la siguiente información

- Input DataSet or Feature Class: Shape que se quiere proyectar en coordenadas UTM (LongestFlowPath1)
- Input Coordinate System(Optional): Se llena por defecto con el sistema que tiene la shape
- Output DataSet or Feature Class: Ubicación y nombre con el que se quiere guardar la nueva shape de salida (K:/huapango/shp/cauce_utm)
- Output Coordinate System: Elegir el sistema en el cual se quiere proyectar la shape en este caso utm (WGS_1984_UTM_Zone_14) y dar click en OK

El resultado será una nueva shape proyectada en coordenadas UTM, la cual aparecerá en la tabla de contenidos, dar click derecho sobre está y se dirige a Open Attribute Table, en el campo de Shape_leng, hacer algo similar a como se calculó el perímetro en el paso 5, para obtener la medida del cauce principal



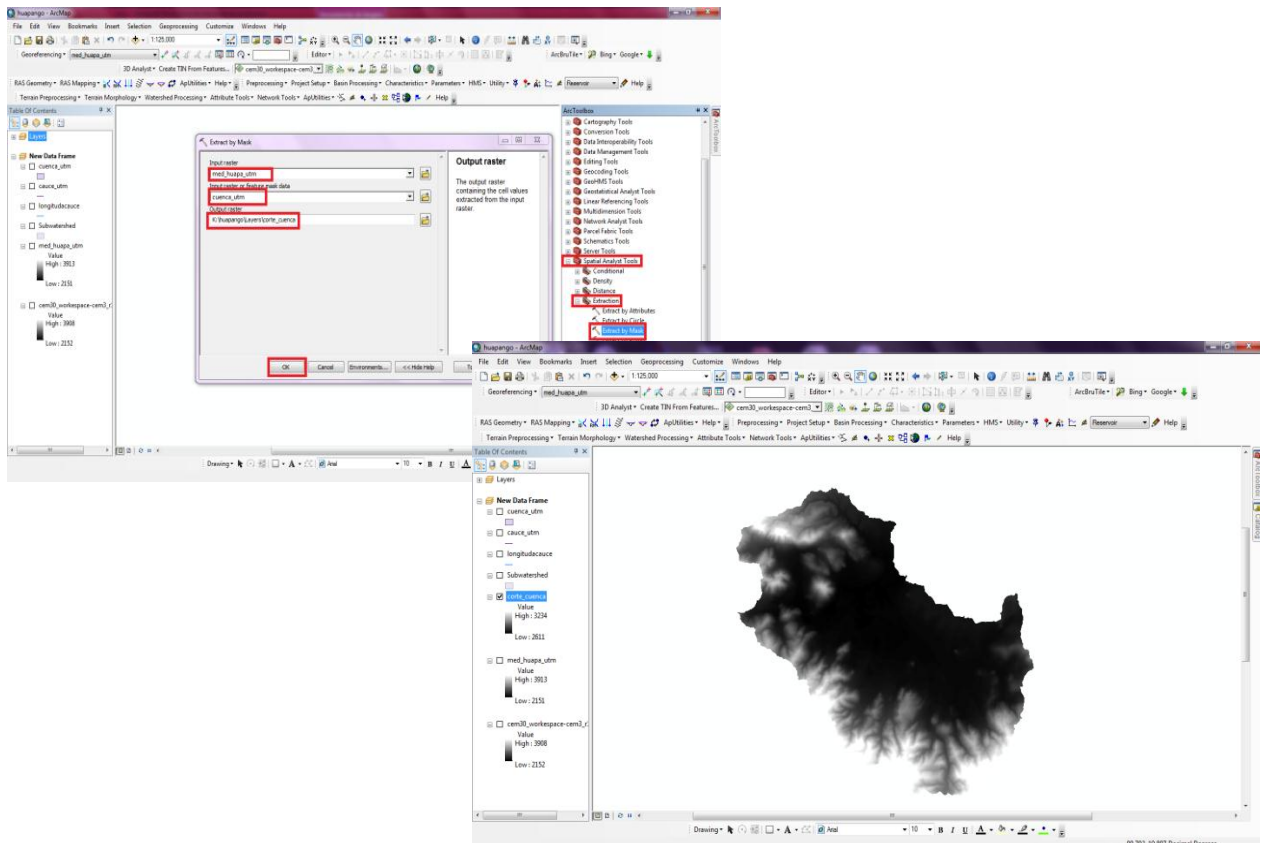
Longitud del cauce principal: 17.24km

Paso 8. Calcular la pendiente media de la cuenca, para esto primero se necesita cortar el DEM proyectado en UTM a la forma de la cuenca para esto ir a ArcToolbox, seleccionar Spatial Analyst Tools, en seguida Extraction y finalmente Extract by Mask, con lo cual se abrirá la ventana de Extract by Mask la cual se llenará con la siguiente información.

- Input raster: Raster proyectado en coordenadas UTM (med_huapa_utm)

- Input raster or Feature mask data: Shape proyectado en coordenadas UTM con el que se quiera cortar el raster (cuenca_utm)
- Output raster: Nombre y dirección del nuevo raster cortado(K:\huapango\Layers\ corte_cuenca)

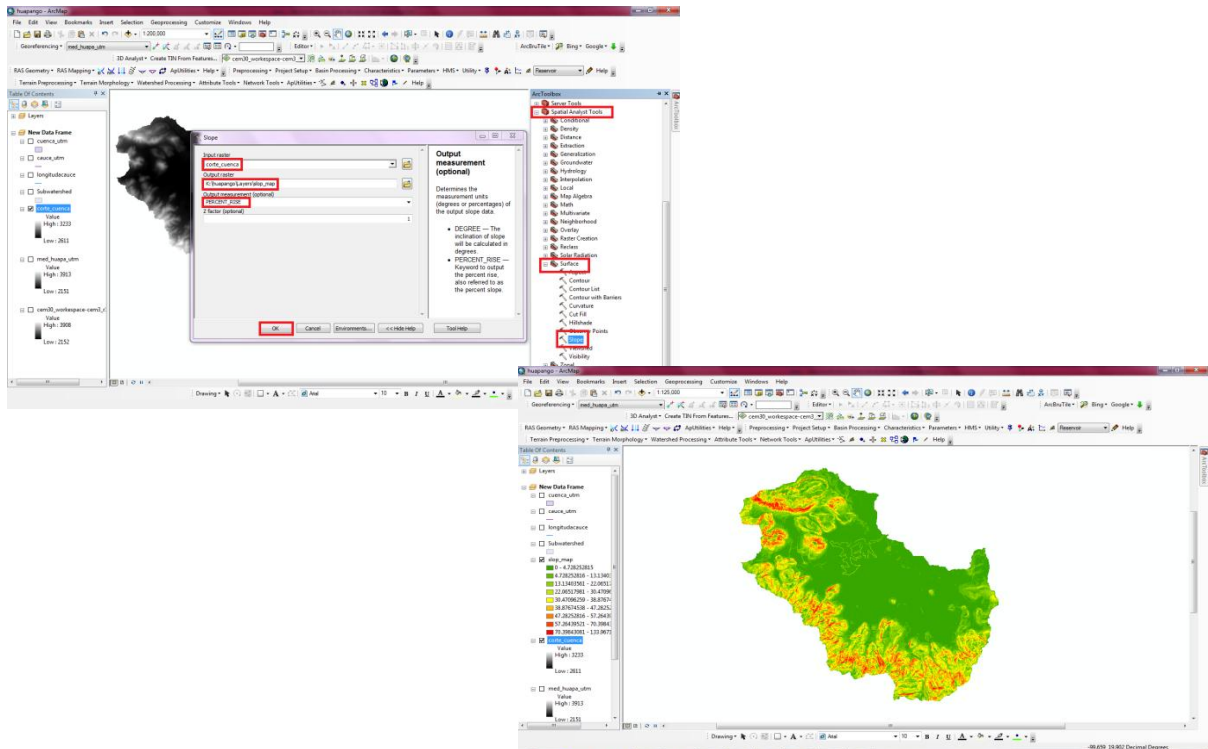
El resultado será un MED pero solo del área de interés



Una vez que se tiene el corte se procede a hacer un mapa de pendiente para ello ir a Spatial Analyst Tools, enseguida Surface y finalmente Slope , con lo cual se abrirá la ventana de Slope la cual se llenará con la siguiente información

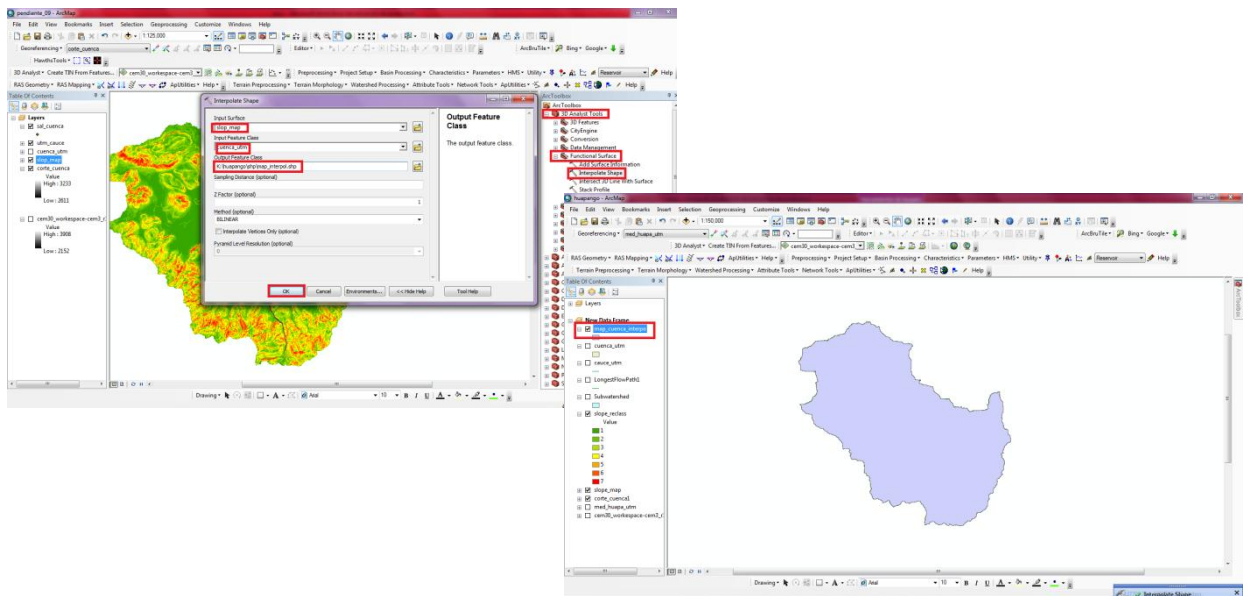
- Input raster: El corte del DEM (corte_cuenca)
- Output raster: Nombre y dirección donde se guardará el nuevo raster creado (K:\huapango\Layers\slope_map)
- Output measurement(optional): PERCENT_RISE

El resultado será un raster de pendientes en porcentaje



Una vez que se tiene el mapa de pendiente se procede a interpolar este mapa con la cuenca para crear un shape de pendientes interpolado para ello ir a 3D Analyst Tools, enseguida Funtional Surface y finalmete Interpolate Shape, con lo cual se abrirá la ventana de Interpolate Shape, la cual se llenará con la siguiente información.

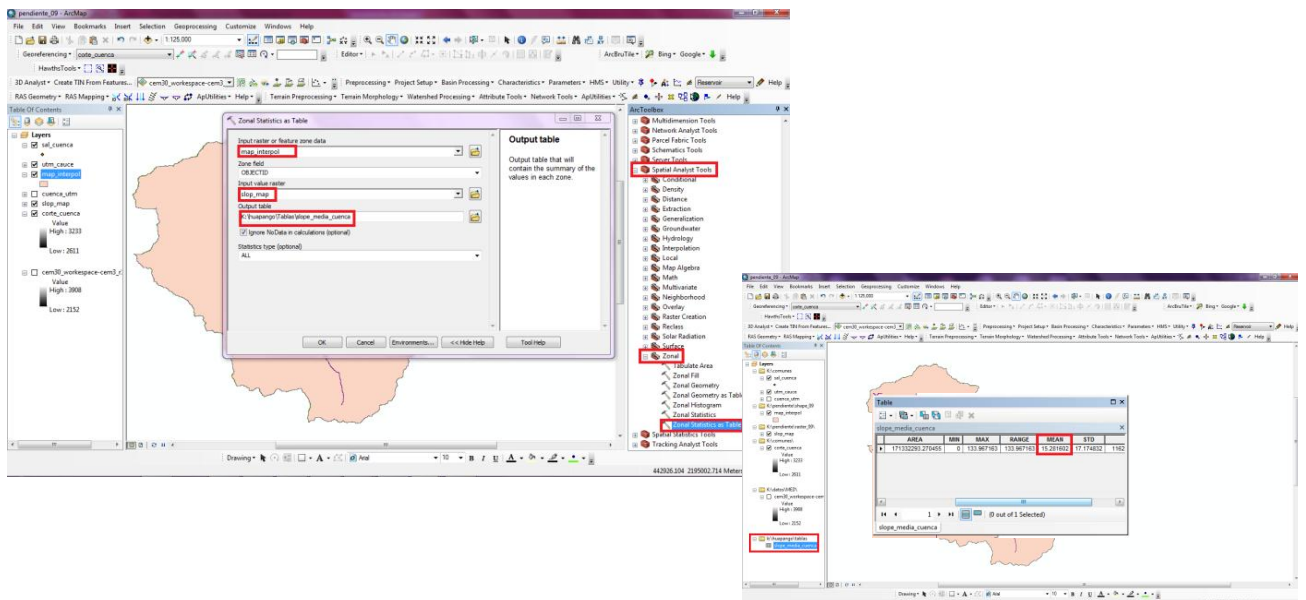
- Input Surface: Raster de pendientes (slope_map)
- Input Feature Class: Shape del que se quiere la pendiente (cuenca_utm)
- Output Feature Class: Nombre y ubicación del shape de salida (K:\huapango\shp\map_interpol.shp) y dar OK



Una vez que se tiene el shape interpolado, se procede a obtener la pendiente media de la cuenca, para ello ir Spatial Analyst Tools, enseguida zonal y finalmente Zonal Statistics as Table, con lo cual se abrirá la ventana de Zonal Statistics as Table, la cual se llenará con la siguiente información

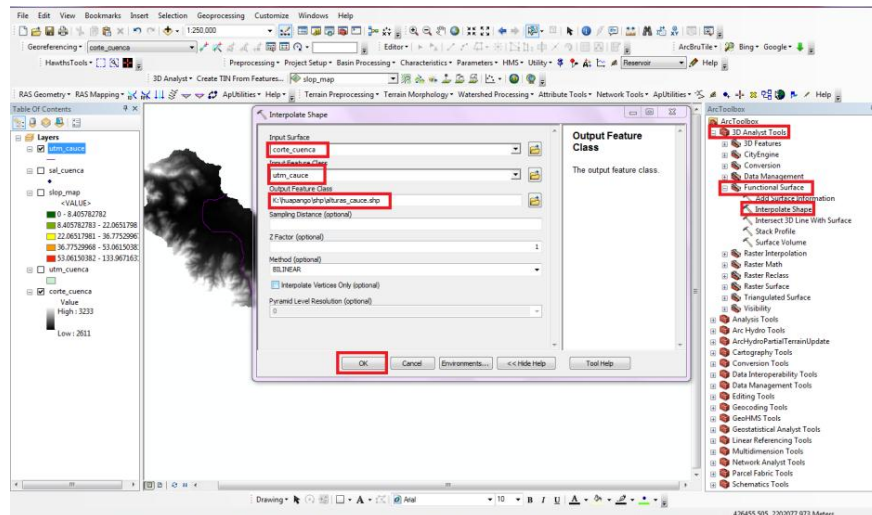
- Input raster or Feature zone data: Shape de la Cuenca y la pendiente interpolada (map_interpol)
- Input value raster: Raster de pendiente (slope_map)
- Output table: Nombre y ubicación de la tabla (K:\huapango\Tablas\slope_media_cuenca) y dar OK

Aparecerá una tabla dar click derecho sobre está, y enseguida dar click en open, el campo que tiene el nombre de MEAN es la pendiente media de la cuenca %

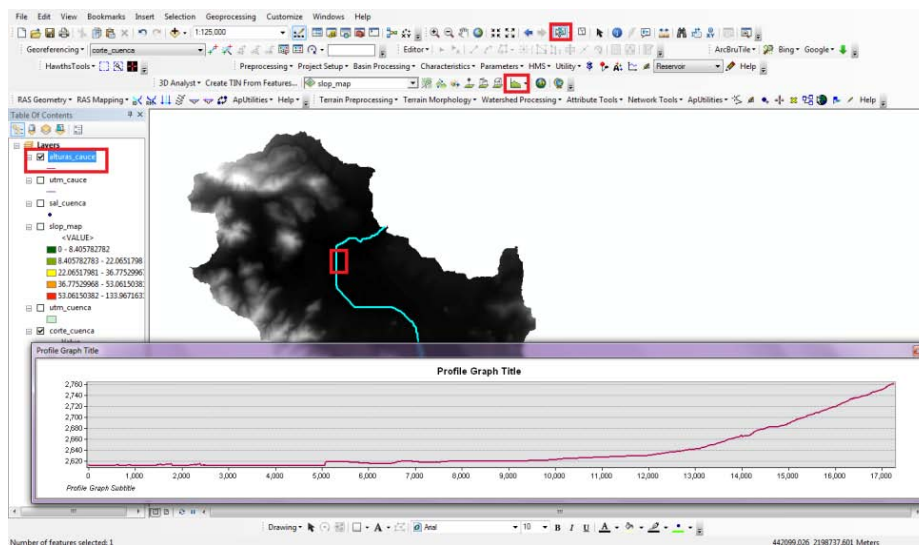


Paso 9. Crear el perfil longitudinal del cauce para ello se interpolara el shape del cauce (utm_cauce) con el modelo de elevación digital (corte_cuenca), para obtener un shape de (alturas_cauce), ir a 3D Analyst Tools, enseguida Funtional Surface y finalmente Interpolate Shape, con lo cual se abrirá la ventana de Interpolate Shape, la cual se llenará con la siguiente información

- Input Surface: Dem (corte_cuenca)
- Input Feature Class: Shape en el que queremos las alturas (utm_cauce)
- Output Feature Class: Nombre y ubicación del shape (K:\huapango\shp\alturas_cauce.shp) y damos OK

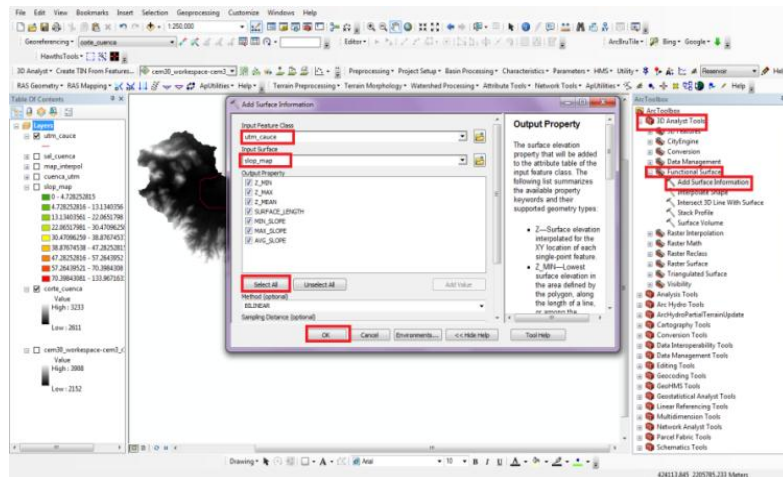


Una vez que se tiene el shape del cauce interpolado con las alturas, se procede a crear el perfil longitudinal del cauce. Para ello con la ayuda de la herramienta Select Features, seleccionar el shape creado anteriormente y dar click en el botón Profile Graph, con lo cual se creará el perfil longitudinal del cauce



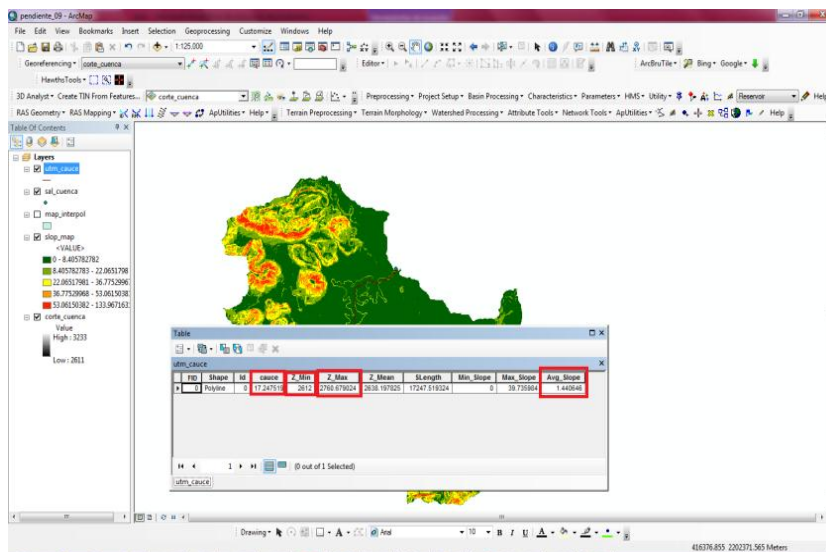
Paso 10. Calcular la pendiente media del cauce, para esto será necesario hacer uso del shape del cauce y del med de la cuenca (corte_cuenca), para agregar información de superficie a la tabla de atributos de shape del cauce, para ello ir a 3D Analyst Tools, enseguida Funtional Surface y finalmente Add Surface Information, con lo cual se abrirá la ventana de Add Surface Information, la cual se llenará con la siguiente información

- Input Feature Class: (utm_cauce)
- Input Surface: (corte_cuenca), Select All y dar click en OK



Una vez que se ha agregado los nuevos campos a la tabla de atributos del shape del cauce de la cuenca, el resultado será la pendiente promedio de todas las celdas del cauce.

También se procederá a aplicar la fórmula de la pendiente media del cauce, utilizando las cotas de los dos extremos del cauce



Pendiente: 1.44%

$$s = \frac{H}{L} = \frac{2760.70 - 2612}{17247.52} = 0.00862 = 0.86\%$$

Donde:

- S=pendiente del tramo del cauce
- H=desnivel entre los extremos del tramo del cauce
- L=longitud horizontal del tramo del cauce

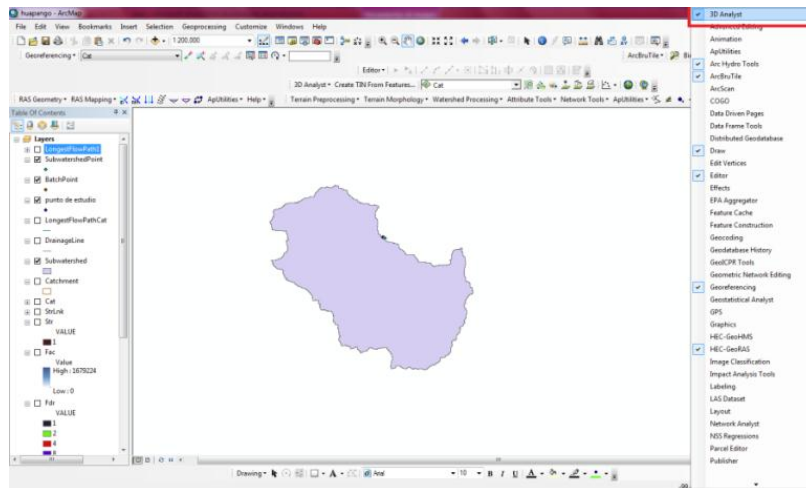
Tabla 5-1 Tabla comparativa de los resultados obtenidos con MED y Arcmap contra los resultados obtenidos usando métodos tradicionales.

| | METODO TRADICIONAL | ARCMAP |
|--------------------------|--------------------|--------|
| PERIMETRO(Km) | 64.09 | 67.26 |
| AREA (Km2) | 174.75 | 171.99 |
| LONGITUD CAUCE (Km) | 17.25 | 17.24 |
| PENDIENTE MEDIA CAUCE % | | |
| TAYLOR | 0.1922% | |
| | | 1.44% |
| PENDIENTE MEDIA CUENCA % | | |
| HORTON | 10.14% | 15.28% |
| NASH | 13.07% | |

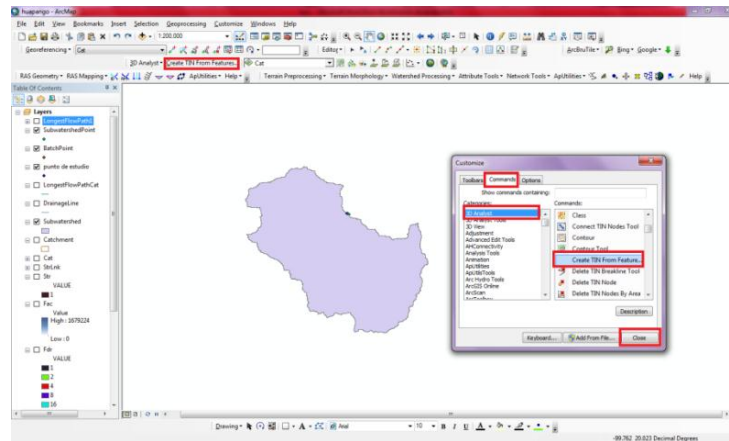
5.4 GENERACIÓN DE UN TIN A PARTIR DE LOS MED

Una vez que se ha obtenido las características físicas de la cuenca y para darle una mejor presentación al proyecto, se procede a crear un TIN.

Paso 1. Se procede a agregar una herramienta que no viene por default llamada 3D Analyst, para ello en la barra de herramientas dar click derecho y seleccionar.



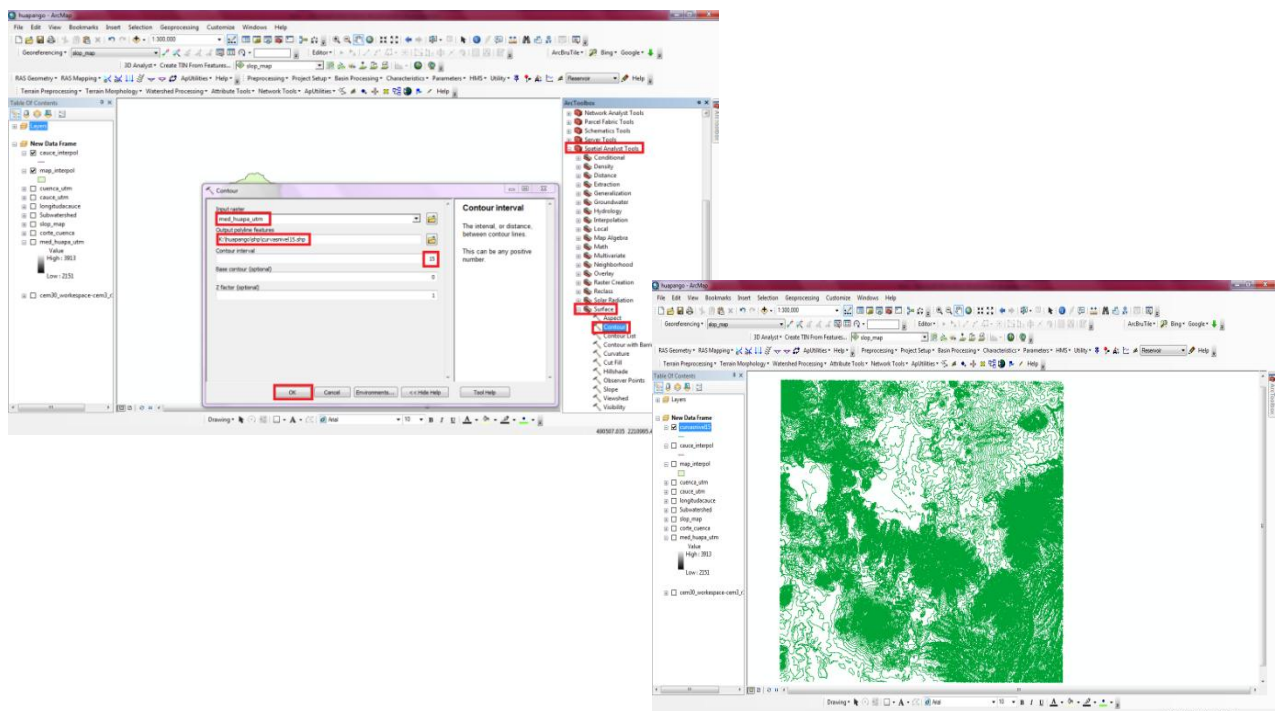
Paso 2. De nuevo ir a la barra de herramientas, dar click derecho ir abajo de todas las opciones en Customize dar click y seleccionar comando, estará activada 3D Analyst en la parte izquierda, buscar Create Tin from Features se selecciona y se arrastra al lado de 3D Analyst



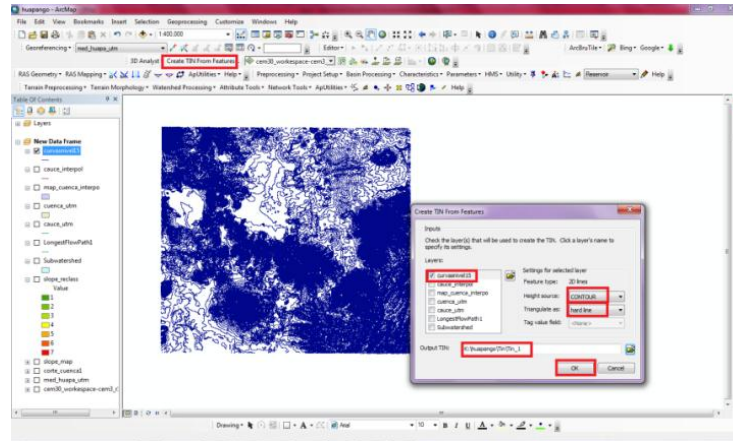
Paso 3. Creación de curvas de nivel con equidistancia de 15m, para ello dar click en Arctoolbox y desplegar Spatial Analyst Tools, para posteriormente desplegar Surface y a continuación Contour, se abrirá la ventana de Countur la cual se llenará con la siguiente información

- Input Raster: Seleccionar el raster proyectado en utm (med_huapa_utm)
- Output Polyline features: Seleccionar una dirección y nombre fácil de recordar (K:\huapango\shp\curvasnivel15.shp)
- Coutour interval: A cada 15
- Base Countour y Z factor: Dejar los valores que vienen por default y dar click en ok

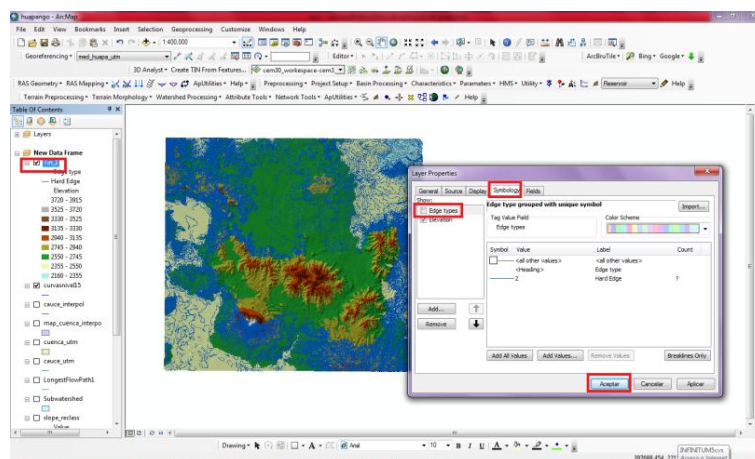
El programa extraerá curvas de nivel a cada 15m



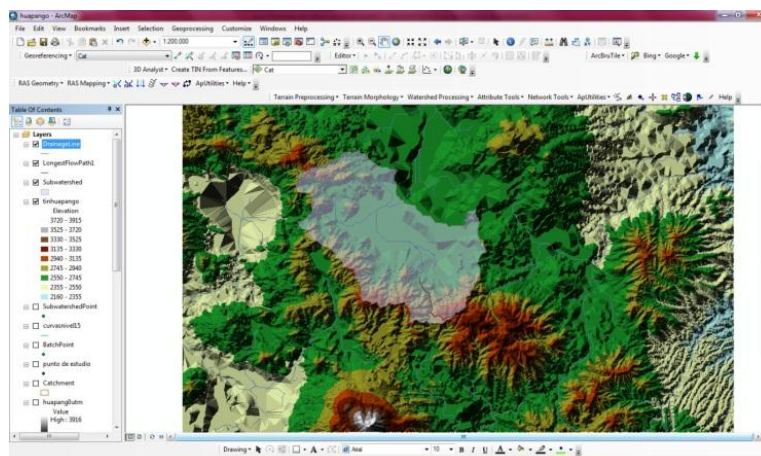
Paso 4. Creación del TIN, para ello echar mano de las herramientas agregadas en el paso 1 y 2, Create Tin From Features, activar el shape con las curvas a cada 15 m, elegir la opción counturs ya que ahí está la información de las alturas, elegir una ubicación fácil de recordar (K:\huapango\Tin\Tin_1) y dar click en OK



Eliminar líneas azules del TIN que estorban para esto dar doble click en TIN, se abrirá la ventana de Layer Properties ir a Simbology y desmarcar la opción Edge Types y dar click en aceptar

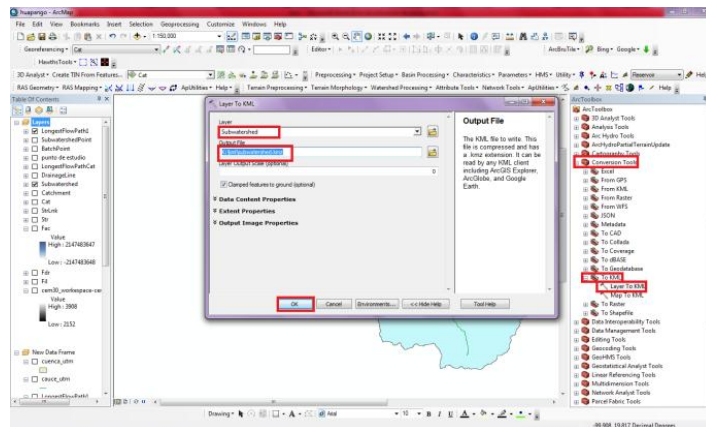


Modelo digital de elevaciones triangular con la cuenca

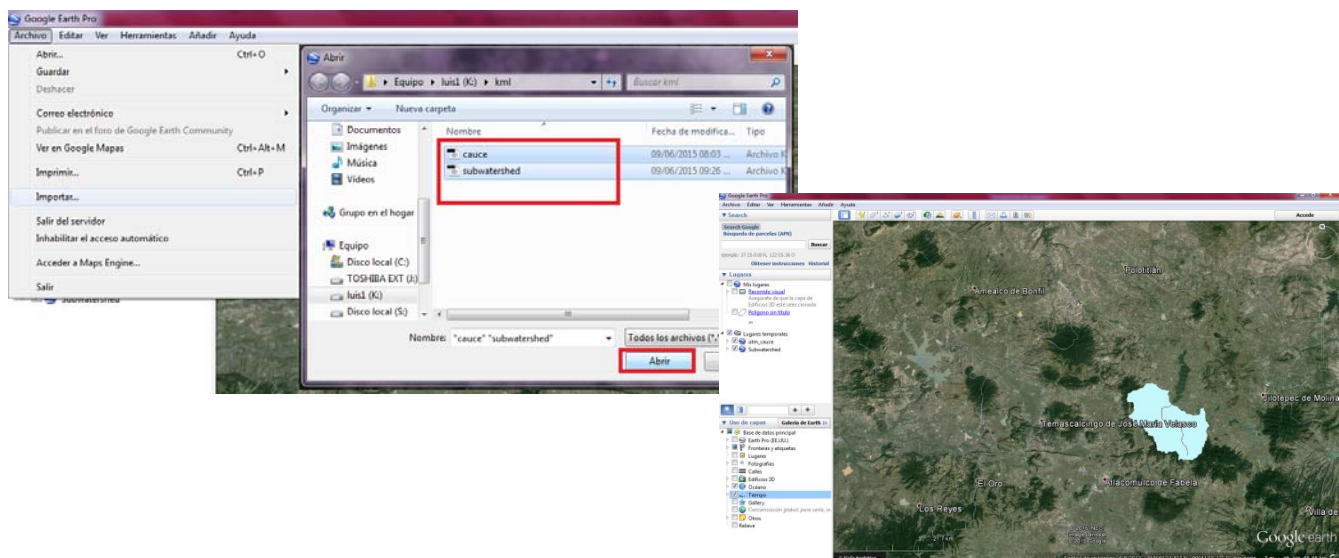


También se puede exportar los shapes files a google earth, para ello dar click en Arctoolbox y desplegar Conversion Tools, para posteriormente desplegar To Kml y a continuación Layer to Kml , se abrirá la ventana de Layer to Kml la cual se llenará con la siguiente información

- Layer: Seleccionar el shape que se quiera proyectar en google earth (Subwatershed)
- Output File: seleccionar una dirección y nombre fácil de recordar (K:\kml\subwatershed.kmz) y dar click en OK



Ir a google earth, en la barra de herramientas desplegamos el menú archivo y damos click en importar y se seleccionan las capas que se quieran proyectar en Google Earth



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El uso de los Modelos de elevación digital y los sistemas de información geográficos, son herramientas que nos permiten obtener, desde curvas de nivel hasta mapas de pendiente, perfiles longitudinales, líneas de drenaje y delimitación de cuencas hidrográficas solo por citar algunos de ellos que se realizaron durante el presente trabajo, sin embargo hay que mencionar que solo es una mínima parte de lo que se puede hacer con la ayuda de los MED los cuales se pueden obtener de forma gratuita desde internet (de páginas como INEGI) la cual es una fuente muy importante y confiable de información.

La generación de curvas de nivel a partir de un modelo de elevación digital, se pudo observar en el capítulo 5, es importante mencionar que estas curvas se pueden generar con equidistancias a partir de 1 metro.

La generación de perfiles longitudinales dentro del programa Arc Map 10.2 es una excelente herramienta que nos permitió obtener el perfil del cauce de manera inmediata, punto 5.3 paso 8, además es importante mencionar que este gráfico se puede exportar como imagen y los datos tabulares a una hoja de Excel.

También fue posible la generación automática de las líneas de drenaje naturales de la región, (punto 5.2 paso 11).

La delimitación de una cuenca hidrográfica y el cálculo de los parámetros físicos de esta, es uno de los usos y ventajas que tienen los modelos de elevación digital, haciéndolo mucho más rápido y preciso. Pero se debe recordar que el éxito y el uso adecuado de cualquier cálculo que se realice a nivel informático, está en el poder entender los conceptos y que se tenga la capacidad de hacerlos y entenderlos de forma manual.

Ya que esta tarea hecha de la forma tradicional, como se pudo observar en el capítulo uno es bastante laboriosa y tediosa. Y aunque los CAD han sido de gran ayuda, para dibujar y medir algunas características como áreas y longitudes, básicamente se tiene que hacer los mismos pasos que como si fuera sobre la carta topográfica, con todo lo que esto implica por ejemplo al momento de trazar el parteaguas y medir las distancias sigue siendo una tarea bastante laboriosa y otras como el conteo de las intersecciones de las curvas de nivel, con la cuadrícula en el método de Horton se tienen que seguir haciendo de la forma tradicional sin que el CAD nos pueda ayudar de alguna manera.

Por esto, el uso de los modelos de elevación digital debe considerarse información geográfica esencial, para el estudio de la forma del terreno y uso sostenible del territorio nacional.

Es por ello, que es de suma importancia el aprendizaje de estas nuevas tecnologías, que nos facilitan el trabajo en prácticamente cualquier disciplina, en las que la altura topográfica y la rugosidad del terreno, son parámetros

importantes, lo cual hace que su difusión y conocimiento sean prioritarios para todos los involucrados en estas disciplinas.

RECOMENDACIONES

Los Modelos de Elevación Digital y los Sistemas de Información Geográfica, han sido desarrollados con el fin de hacer más rápida, precisa y económica la obtención de datos referidos al relieve del terreno, así como su posterior procesamiento de los mismos, en áreas como la ingeniería, impacto ambiental entre otras. Por ello, la importancia del manejo y conocimiento de este tipo de herramientas, que nos facilitan el trabajo y nos dan un plus dentro de nuestra formación universitaria.

Ante esta situación y la escasez de personal técnico especializado en Modelos de Elevación Digital y Sistemas de Información Geográficos y el aumento de la demanda laboral, debemos ver esto como una ventana de oportunidad, para la formación de usuarios expertos que sean capaces de obtener el máximo rendimiento de los MED y SIG.

Es por ello la necesidad de implementar la asignatura de Sistemas de Información Geográfica, en el plan de estudios de la carrera de ingeniería civil ya sea como optativa u obligatoria, así como cursos y diplomados que respondan a las demandas que el mercado laboral está presentado.

BIBLIOGRAFÍA

BREÑA PUYOL AGUSTÍN FELIPE Y JACOBO VILLA MARCO ANTONIO, Principio y fundamentos de la hidrología superficial, UAM, México, 2006,289pp

HERRERO ANA, SANCHÍS FRANCISCA Y LÍTER CARMEN, Geografía y Cartografía Renacentista, Ediciones Akal ,Madrid España,1992,64pp

KORTE GEORGE B. The GIS book : a practitioner's handbook, OnWord Press,Santa Fe, NM, 1992,166 pp

LERMA GARCIA, JOSE LUIS,Fotogrametría moderna : analítica y digital, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España,2002,550 pp

MORENO JIMENEZ ANTONIO, Sistemas y análisis de la información geográfica: manual de aprendizaje con ArcGIS, 2ª edición. Alfaomega, México, 2008, 895 pp

NIEVES LANTANA ZARZOSA Y M. AMAPARO NUÑEZ ANDRÉS, Sistemas de información geográfica: prácticas con Arcview, 1ª edición Alfaomega, México, 2004 ,223pp

OLAYA VICTOR, Sistemas de Información Geográfica, Creative Common, 2011,911pp

ORDOÑEZ CELESTINO Y R MARTÍNEZ-ALEGRÍA, Sistemas de Información geográfica. Aplicaciones practicas con IDRISI32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. Alfaomega, México,2003, 248 pp

VICTORIA ANDRADE, Elementos de geografía física y política: Editorial Trillas México, 2000, 208 página

VIGUERAS MUÑOZ LUIS POMPOSO, Apuntes de hidrología, México, 2013,25pp

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>

http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle

<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//007000000013000000>

<http://carto1mexico-velazquez.blogspot.mx/2013/03/los-metodos-de-representacion.html> (proyecciones conicas)

http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas_utm.html

http://es.getamap.net/mapas/mexico/mexico/_huapango_presade/

<http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/como-calcular-la-pendiente-media-de-una-cuenca-hidrografica/>

http://hidrologia.usal.es/Complementos/Medida_pendiente.pdf

<http://mappinggis.com/2014/09/ejemplos-de-uso-de-drones-en-gis/>

<http://sigyury.blogspot.mx/2014/02/los-drones.html>

<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=104>

<http://www.naturalresourcesgis.com/selevation.html>

<http://acolita.com/suavizar-polilineas-y-poligonos-en-arcgis-smooth/>