



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

CÁLCULO DEL FACTOR EROSIVO Y APORTE DE SEDIMENTOS
CONSIDERANDO ALTURAS DE PRECIPITACIÓN PUNTUALES Y TRENES DE
LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO APATLACO EN EL ESTADO DE MORELOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SIXTA HINNDI MENDOZA PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. LILIA REYES CHÁVEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MAYO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval

Secretario: Dr. Rodolfo Silva Casarín

Vocal: Dra. Lilia Reyes Chávez

1 er. Suplente: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

2 d o. Suplente: M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria.

TUTOR DE TESIS:

DRA. LILIA REYES CHÁVEZ

FIRMA

CONTENIDO

Introducción	I
Sistemas de Información Geográfica aplicados a la caracterización de cuencas	1
1.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	2
1.1.1 <i>Software</i> para Sistemas de Información Geográfica	3
1.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)	8
1.2.1 Tipos de Modelos Digitales de Elevación.....	11
1.2.2 Continúo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0	15
1.2.3 Obtención de un Modelo Digital de Elevación (MDE).....	17
1.3 ArcGIS Aplicado a Hidrología	27
2 Manejo de Datos Climatológicos e Hidrométricos	28
2.1 Datos Climatológicos	29
2.1.1 Clima Computarizado (CLICOM)	31
2.1.2 Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III).....	33
2.1.3 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) y Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESIME's)	38
2.2 Técnicas de Interpolación de variables climáticas	44
2.2.1 Método de Thiessen	46
2.2.2 Método de la Interpolación Polinomial	46

2.2.3	Método de la Interpolación de la distancia inversa.....	48
2.2.4	Interpolación Multicuadrática	51
2.2.5	Interpolación Óptima.....	52
2.2.6	Método de Kriging	58
2.2.7	Técnica de regresión Lineal.....	67
2.3	Datos Hidrométricos	68
2.3.1	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)	69
2.4	Técnicas de normalización para datos hidrométricos.....	83
2.5	Relleno y extensión de un registro.....	83
2.5.1	Criterios de la mejora en la estimación de la media y la varianza	87
3	Edafología	90
3.1	Suelo	91
3.1.1	Perfil y horizontes del suelo	92
3.1.2	Propiedades físicas del suelo	95
3.2	Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, <i>World Reference Base for Soil Resources (WRB)</i>	99
3.1	Usos de Suelo	103
3.2	Procesos Erosivos (Estimación del potencial erosivo)	105
3.2.1	Degradación del Suelo	105
3.3	Conservación, protección y restauración de suelos	116

3.4	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	116
4	Aplicación	121
4.1	Descripción del área en estudio.....	122
4.2	Análisis de datos climatológicos	128
4.2.1	Cantidad y calidad de la información climatológica.....	130
4.2.2	Rellenado de datos.....	135
4.2.3	Análisis de frecuencias de eventos extremos máximos	143
4.2.4	Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (i-d-Tr)	144
4.2.5	Trenes de lluvia	159
4.2.6	Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	162
5	Conclusiones, Recomendaciones y Futuras Líneas de Investigación	184
	Referencias	189
	ANEXOS	200

INTRODUCCIÓN



La degradación de los recursos naturales es un problema grave que exige una atención prioritaria para el desarrollo sustentable de una nación. De la degradación del suelo se derivan los procesos erosivos, caracterizándose por ser rápidos en comparación con la velocidad de formación del suelo.

De los procesos de degradación, la erosión hídrica es la más importante ya que afecta la capacidad de las tierras para la producción de alimentos, además de generar azolves o sedimentos en ríos, lagos, lagunas y presas disminuyendo sustancialmente la calidad del agua y la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos; así mismo es un detonante de la inestabilidad de laderas.

La erosión hídrica afecta el 11.9 % de la superficie del país de la cual el 56.4 % se encuentra en nivel ligero, 39.7 % en nivel moderado, 3.7 % en fuerte y 0.2 % en extremo (SEMARNAT, 2013b).

Al existir una estrecha relación entre la degradación, los usos y tipos de suelo es necesario mencionar que el 35 % de la superficie nacional degradada se debe a las actividades agrícolas y pecuarias (17.5 % cada una de ellas), 7.4% a la pérdida de la cubierta vegetal (deforestación) y el resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales (SEMARNAT, 2013b).

Los peligros naturales asociados a la erosión hídrica provocan gran impacto económico y social principalmente en zonas de escasos recursos debido a su alto grado de vulnerabilidad; la falta de planeación y un sistema deficiente de alerta temprana ha causado numerosas pérdidas humanas en los últimos años en México y el mundo.

En el pasado mes de septiembre en la República Mexicana se tuvo la presencia de dos fenómenos meteorológicos; por el Pacífico Nororiental “Manuel” y en el Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe “Ingrid”, los cuales provocaron decenas de muertos, y millonarias pérdidas económicas.

Las zonas de afectación abarcaron casi la totalidad del territorio nacional, uno de los casos más relevantes fue el desastre ocurrido el 15 de septiembre del año 2013 a la población de La Pintada en el municipio de Atoyac de Álvarez en la región de la costa grande del estado de Guerrero, cuyo deslizamiento del cerro provoco en pocos minutos la pérdida de aproximadamente el 50 % de la comunidad, Figura I.1.



Figura I.1. Deslizamiento de alud en la comunidad de La Pintada en el municipio de Atoyac de Álvarez, Guerrero provocado por la precipitación del huracán Manuel el domingo 15 de septiembre de 2013. (Noticias Terra, 2013).



Figura I.2. Flujo de lodo en la colonia La Aurora en el municipio de Teziutlán, Puebla provocado por la precipitación extraordinaria asociada a la depresión tropical número 11 el 5 de octubre de 1999. (Alcántara).

En octubre de 1999 se presentaron precipitaciones extraordinarias asociadas a la depresión tropical número 11 originada en el Golfo de México, estas ocasionaron cientos de deslizamientos de laderas en la Sierra Norte de Puebla; en la colonia la Aurora del municipio de Teziutlán, Puebla se originó un movimiento de ladera rotacional, esto es, inicio como un deslizamiento y posteriormente se convirtió en flujo de lodos a consecuencia de la saturación del suelo, provocando la muerte de más de 100 personas y numerosas pérdidas económicas, Figura I.2.

Otro evento asociado con el flujo de lodos considerado el más importante en el país, fue el ocurrido en el estado de Chiapas en el año 2007. Los primeros días de noviembre se presentaron lluvias intensas asociadas al frente estacionario número 4 y la tormenta tropical Noel registrando un acumulado de 1 077 mm de lámina; el día 4 de noviembre la ladera derecha del río Grijalva se deslizó cayendo en el cauce del río, el impacto provocó una ola de entre 15 y 50 m de altura desapareciendo la comunidad de Juan de Grijalva en el municipio de Ostuacán; el movimiento de 55 millones de m³ generó un tapón de 800 m de longitud, 300 m de ancho y 80 m de altura obstaculizando el flujo entre las presas de Peñitas y Malpaso; este fue un problema prioritario para el gobierno federal ya que era urgente reestablecer el cauce del río de una de las principales cuencas del país, Figura 3.



Figura I.3. Deslizamiento de la ladera derecha del río Grijalva en el estado de Chiapas a causa de las lluvias intensas asociadas al frente estacionario número 4 y la tormenta tropical Noel el 4 de noviembre de 2007. (Arvizu, 2009).

Por lo anterior, se vuelve necesario el estudio de la energía cinética junto con el poder erosivo de la lluvia sobre el tipo de terreno donde precipita para intentar establecer zonas de riesgo en función del grado de degradación que esta variable pueda ocasionar.

El objetivo de este trabajo es calcular los valores del factor erosivo de la lluvia, necesarios para el cálculo del aporte de sedimentos en la cuenca, valor que permitirá establecer el nivel de degradación de la misma.

La aplicación del trabajo se limita a la subcuenca del río Apatlaco (RH18Fd) perteneciente a la Región Hidrológica Balsas (RH18) localizada en la región del Eje Neovolcánico clasificada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) como potencial en deslizamiento de laderas.

En el capítulo uno se exponen los antecedentes generales que dieron origen a los Sistemas de Información Geográfica (SIG); en particular se menciona el software ArcGIS 10.1 y las aplicaciones que lo conforman. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son estructuras básicas utilizadas para el análisis geográfico por lo cual se enfatiza en su definición, características, tipos existentes, y sitios para obtener esta información.

En el capítulo dos se indican las bases de datos utilizadas para obtener las series históricas de información hidrométrica y climatológica, así como la manera en que se presentan los datos. También se detallan las técnicas de interpolación para datos climatológicos necesarias para conocer la estimación puntual de un evento con la menor incertidumbre posible; y las técnicas de normalización, relleno y extensión de registros para datos hidrométricos.

El suelo es un recurso que se encuentra presente en el desarrollo de todas las actividades antropogénicas, dada su importancia, en el capítulo tres, se describen las funciones que desempeña, su estructura y sus propiedades físicas; se mencionan los procesos erosivos que provocan mayor afectación; y se presenta la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, por ser el criterio empírico más utilizado para cuantificar el material sólido que se pone en movimiento como producto de la erosión hídrica, así como la obtención de sus factores.

En el capítulo cuatro se describe la zona de estudio; se realiza el análisis de precipitaciones, se construyen las curvas intensidad-duración- periodo de retorno (i-d-Tr), se determinan los trenes de lluvia para longitudes de tres a 10 días, se obtiene el factor

erosivo, aporte de sedimentos y el nivel de pérdida de suelo para la subcuenca en estudio considerando alturas de precipitación puntuales y trenes de lluvia.

En el capítulo cinco se escriben las conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación.

Como apoyo a este trabajo, en el Anexo A se muestran los pasos para caracterizar una cuenca utilizando el *software* ArcGIS 10.1 y los conceptos básicos necesarios para iniciar en el uso de los SIG.

En el Anexo B se presenta una breve descripción de cada uno de los grupos de suelo de referencia de acuerdo con *IUSS* Grupo de Trabajo *WRB* (2007).

En el Anexo C se describen las coberturas del suelo mexicano clasificadas en la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000 Serie V elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que incluye la vegetación existente hasta el año 2012.

En el Anexo D se mencionan las obras utilizadas para el control de la erosión hídrica basadas en una perspectiva de cuenca.

1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS A LA CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta indispensable para el estudio, análisis y desarrollo de tecnología por medio de modelos que representan la realidad. Por tal motivo es necesario conocer qué son, cómo se conforman y la manera en cómo deben ser utilizados. Un Modelo Digital de Elevación (MDE) es fundamental en el análisis y procesamiento en SIG por lo cual se enfatiza en su definición, características, tipos existentes, y sitios para obtener esta información.

Siendo la hidrología una rama de gran interés se han desarrollado herramientas específicas que facilitan el análisis de los recursos hídricos, en el Anexo A se muestran los pasos para caracterizar una cuenca utilizando el *software* ArcGIS 10.1 y los conceptos básicos necesarios para iniciar en el uso de los SIG.



1.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son la evolución de la cartografía a los sistemas digitales, desde los años 60's cuando aparecen los primeros *software* que permiten asociar bases de datos con figuras hasta como se conocen actualmente.

El primer SIG funcional fue el SIG-Canadá, estructurado principalmente en polígonos y utilizado en el manejo de bosques; creado por: Roger Tomlinson, John Herring (creador de INTERGRAPH) y Jack Dangermount (creador de ESRI).

Las técnicas utilizadas por los SIG han cambiado a lo largo del tiempo. Inicialmente se manejó un modelo orientado a registros en el cual las figuras contaban con un registro individual sin poder asociarse entre sí; para los 70's comenzó a utilizarse el modelo orientado a capas basado en la topología y el principio de la naturaleza de los datos geográficos: "Todo elemento geográfico tiene posición absoluta, posición relativa, figura geométrica y atributos" (Giraldo, 2008), este modelo aun es utilizado ya que es la técnica más comercial; para 1985 se crea el modelo orientado a objetos donde todo se conforma de partes y las partes se integran para formar objetos.

Un Sistema de Información Geográfica tiene la capacidad de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar información referenciada espacialmente, con el objetivo de representar mediante capas temáticas, Figura 1.1, un modelo de la realidad en el que es posible editar datos, crear mapas, administrar cualquier tipo de información y obtener nueva información como resultado del geoprocésamiento en *software* para SIG.

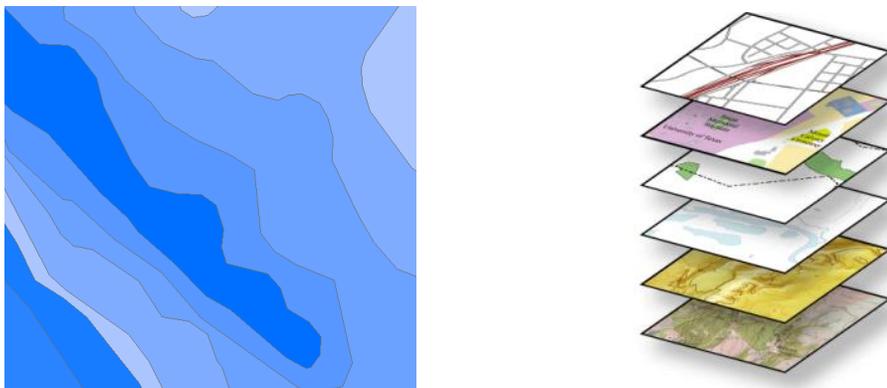


Figura 1.1. Representación de capas temáticas en un Sistema de Información Geográfica. (ArcGIS 10.1, 2013).

La información se organiza en capas temáticas donde cada una contiene un tipo de información geográfica específica (geodatos), cada capa se almacena de forma independiente para facilitar su manipulación y se representan mediante algunas estructuras de datos como: clases de entidad (*Feature class*), cuadrículas (*raster*), atributos e información descriptiva.

Un conjunto de capas temáticas forman un mapa SIG interactivo que es la interfaz de usuario principal donde se maneja la información geográfica. Un mapa SIG es una ventana interactiva a toda la información geográfica, datos descriptivos y modelos de análisis espacial (ArcGIS 10.1, 2013) con la que es posible transmitir grandes cantidades de información de una forma organizada mediante tablas de atributos, gráficos, fotografías vínculos, entre otros.

Una estructura fundamental de datos utilizados en los SIG son los *raster* que pueden contener datos de relieve agrupados en Modelos Digitales de Elevación (MDE), en el subcapítulo 1.2 se explican sus características y los tipos más utilizados hoy en día.

1.1.1 **Software para Sistemas de Información Geográfica**

Elementalmente un SIG está conformado por una base de datos, un mapa y un *software* que permite interrelacionar, manipular, analizar y compartir la información espacial para generar resultados utilizados en el desarrollo de tecnología con aplicación en diferentes campos del conocimiento.

Existe *software* distribuido bajo licencia de código abierto que puede ser obtenido de manera gratuita en internet, y otros de carácter comercial de elevado costo. Algunos ejemplos se mencionan a continuación:

GRASS. Es un *software* gratuito desarrollado por *Open Source Geospatial Foundation* con el objetivo de crear una herramienta para procesar sistemas de información de manera eficiente en el ámbito académico y gubernamental.

Gv SIG. También distribuido de forma libre, está conformado tal que es compatible con las estructuras de datos SIG; diseñado en un ambiente Java para sistemas operativos Linux Windows y Mac OS X.

MapMaker. Creado por Eric Dudley para ser un *software* SIG de fácil uso en ambiente Windows, consta de dos versiones sin costo MapMakerPopular y MapMaker Gratis y una comercial MapMaker Pro.

GeoMedia. Intergraph Seguridad, Gobierno & Infraestructuras (SG&I) desarrollan este SIG que permite conjuntar, editar y crear bases de geodatos aunado a la posibilidad del desarrollo para mejorar la función del sistema.

MapObject. Trabaja en ambientes como Visual Basic, Delphi y Visual C++; para visualizar mapas en tiempo real en los que es posible realizar análisis utilizando bases de datos interrelacionadas.

Global Mapper. Es un sistema desarrollado por *Blue Marble Geographics* de bajo costo con una interfaz amigable que cuenta con una amplia gama de herramientas para procesar, analizar, diseñar, crear conjuntos de geodatos entre otras muchas aplicaciones.

AutoDesk World. Permite fácilmente integrar mapas a la base de datos con la posibilidad de crear y editar diseños, analizar datos y filtros de selección, así como personalizar interfaces.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizara el *software* para SIG ArcGIS 10.1 descrito someramente a continuación.

1.1.1.1 ArcGIS Enviromental Systems Research Institute (ESRI)

ArcGIS es un completo sistema comercial desarrollado por *Enviromental Systems Research Institute* que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es una plataforma para crear mapas la cual incluye *software*, una infraestructura on-line basada en la nube, herramientas profesionales, plantillas de aplicación, mapas base y contenido propio compartido por la comunidad de usuarios (ArcGIS 10.1, 2013).

ArcGIS *Desktop* es un grupo de aplicaciones para escritorio con tres niveles de licencia refiriendo la capacidad de procesos que pueden realizar: ArcView, ArcEditor y ArcInfo, siendo este último el más completo e incluyen las aplicaciones ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe.

ArcReader. Esta aplicación es utilizada para ver, explorar e imprimir mapas publicados con la posibilidad de crear aplicaciones personalizadas (ArcGIS 10.1, 2013).

ArcCatalog. Es el administrador de bases de datos; documentos de ArcMap, ArcGlobe y ArcScene; archivos de capa y *raster*; cajas de herramientas de geoprocresamiento; modelos y secuencias de comandos Python, entre otros; organizado en una vista de árbol permite seleccionar un elemento para ver sus propiedades y acceder a las herramientas para operar en los elementos seleccionados, Figura 1.2 (ArcGIS 10.1, 2013).

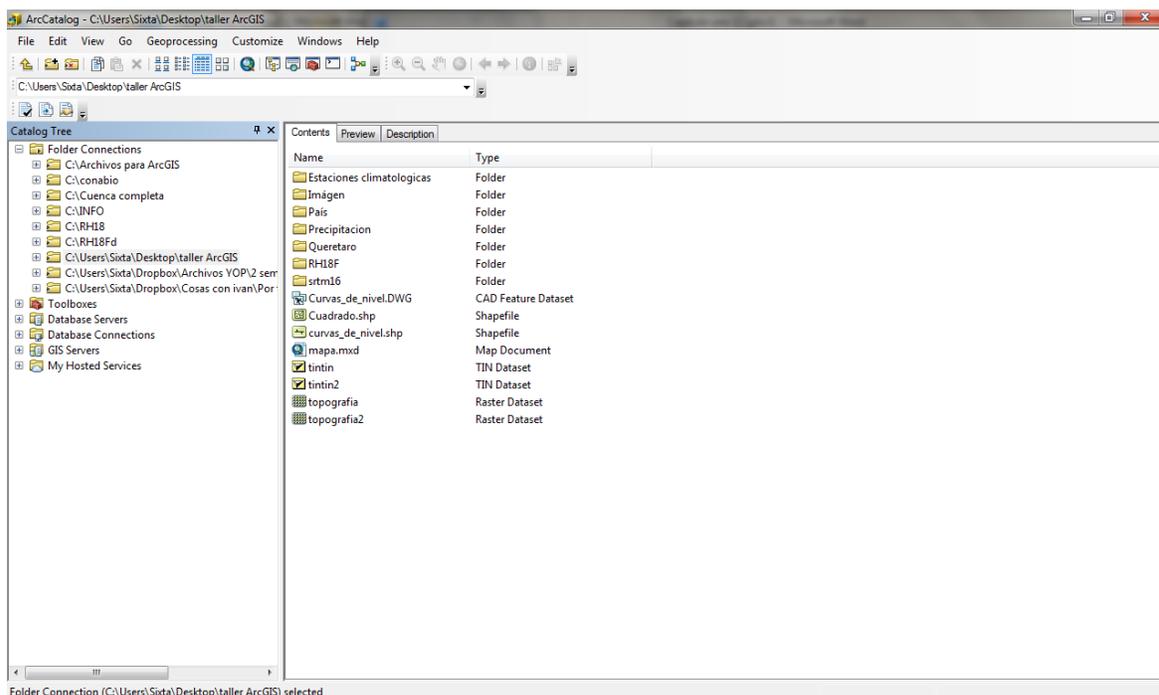


Figura 1.2. Interfaz gráfica de la aplicación ArcCatalog. (ArcGIS 10.1, 2012b).

ArcGlobe. Es la aplicación diseñada para utilizar bases de datos muy grandes que permite la visualización sin interrupciones de datos *raster* y clases de entidad, forma parte de la extensión 3D Analyst, Figura 1.3 (ArcGIS 10.1, 2013).

ArcScene. Es un visualizador para generar escenas con perspectiva que permiten navegar e interactuar con la entidad 3D y los datos de *raster*, admite simbología de línea 3D compleja y representación cartográfica de texturas, así como también la creación de superficies y la visualización de las TIN, Figura 1.4 (ArcGIS 10.1, 2013).

Sistemas de Información Geográfica aplicados a la caracterización de cuencas

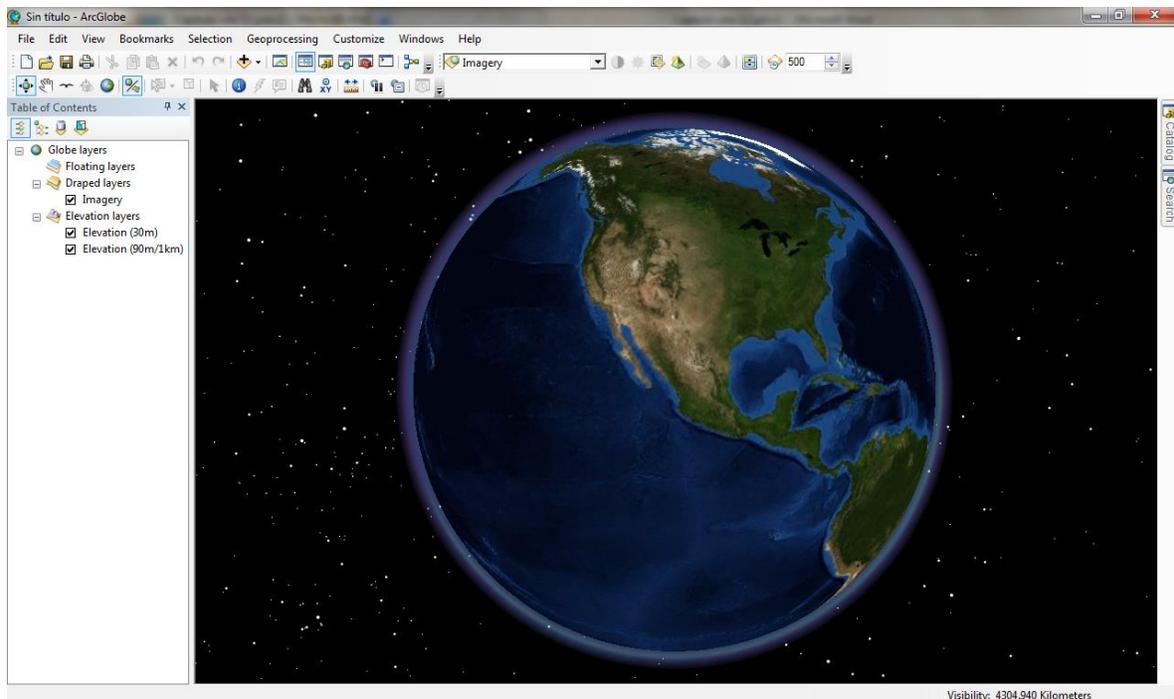


Figura 1.3. Interfaz gráfica de la aplicación ArcGlobe. (ArcGIS 10.1, 2012b).

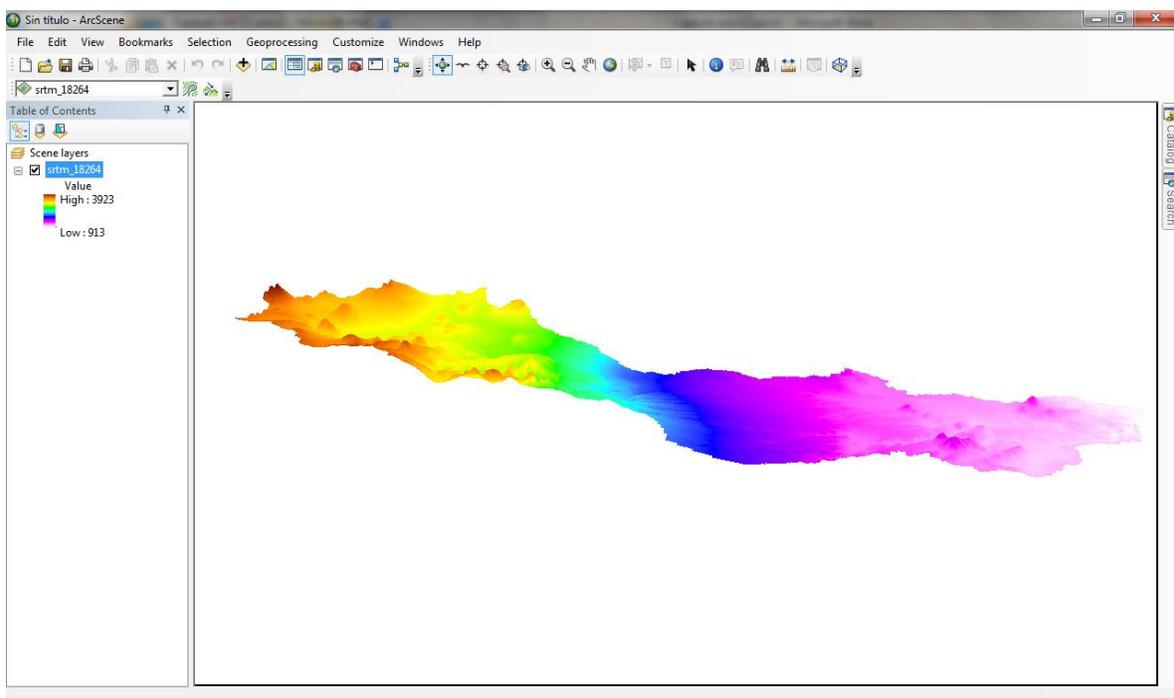


Figura 1.4. Interfaz gráfica de la aplicación ArcScene. (ArcGIS 10.1, 2012b).

ArcMap. Es la aplicación que se utiliza para crear y editar las bases de datos geográficos representándolos en forma de capas y otros elementos en un mapa Figura 1.5 (ArcGIS 10.1, 2013).

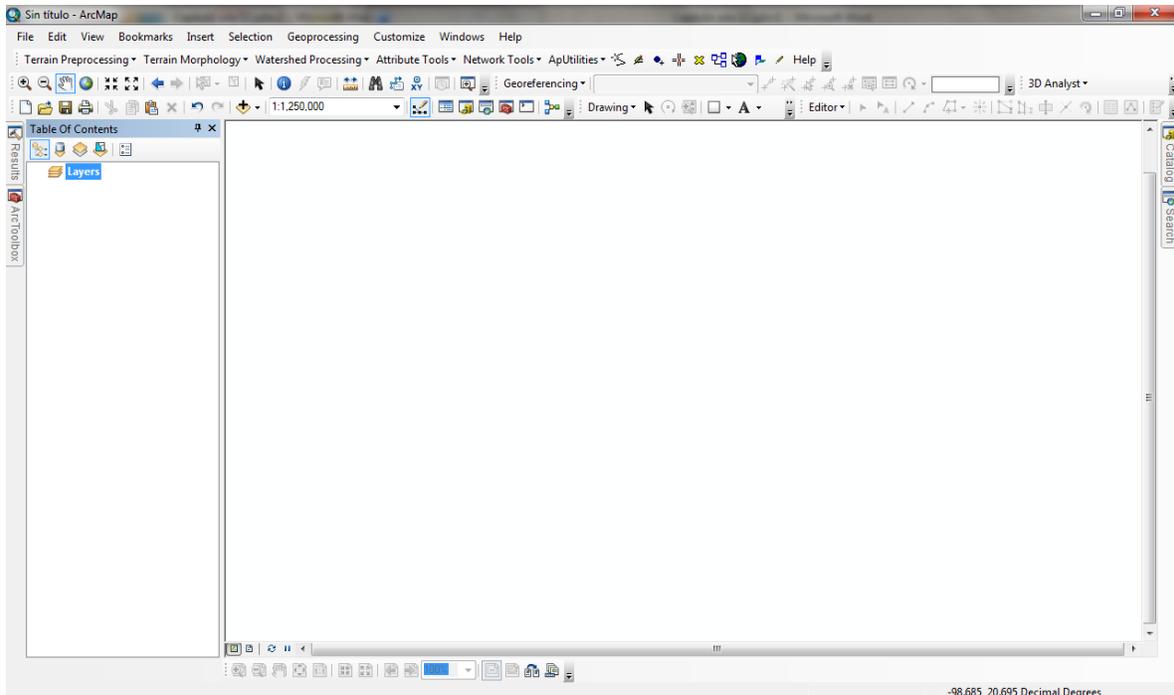


Figura 1.5. Interfaz gráfica de la aplicación ArcMap. (ArcGIS 10.1, 2012b).

ArcToolbox. Es la caja de herramientas que contiene las funciones para el análisis, edición y procesamiento de geodatos.

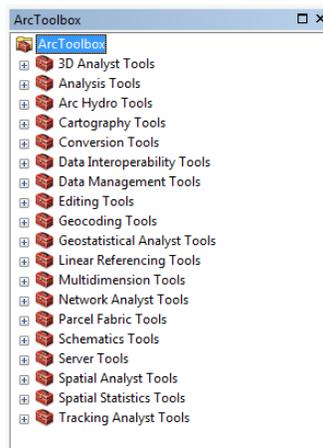


Figura 1.6. Interfaz gráfica de la aplicación ArcToolbox. (ArcGIS 10.1, 2012b).

1.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los datos de relieve son valores de altura respecto a una superficie de referencia con los que es posible caracterizar el conjunto de formas estructurales que constituyen la parte más superficial de la corteza terrestre, tanto en las áreas emergidas como en las que se encuentran por debajo del agua; siendo posible determinar datos de relieve continental e insular y submarino (INEGI, 2013c).

Los datos de relieve submarino representan la superficie ubicada bajo el mar utilizando curvas de nivel batimétricas, por otra parte con los datos de relieve continental e insular se pueden caracterizar las formas estructurales básicas de la corteza terrestre como son las montañas, mesetas, valles, depresiones, terrazas y abanicos aluviales.

Estos datos de relieve referidos al nivel medio del mar, se presentan visualmente en un Modelo Digital de Elevación (MDE) donde es posible caracterizar en dos y tres dimensiones, Figura 1.7 y 1.8, las formas del relieve y los elementos presentes en él analizando todas las perspectivas factibles.

La estructura principal de un MDE es una cuadrícula, donde las celdas están espaciadas y distribuidas de forma regular. Cada celda contiene datos X y Y que representan su ubicación geográfica referidos a un sistema de coordenadas geográficas, y un valor Z indica la elevación respecto del nivel medio del mar.

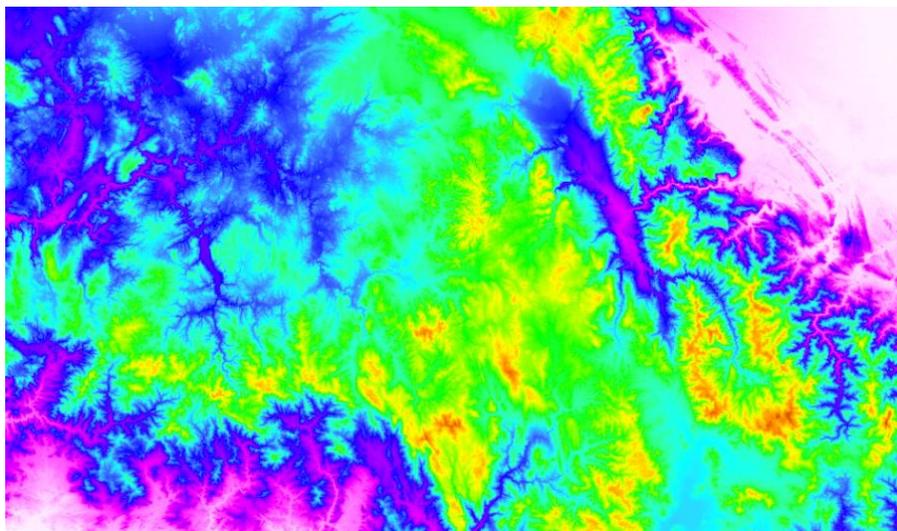


Figura 1.7. Modelo Digital de Elevación visto en dos dimensiones. (ArcGIS 10.1, 2012b).

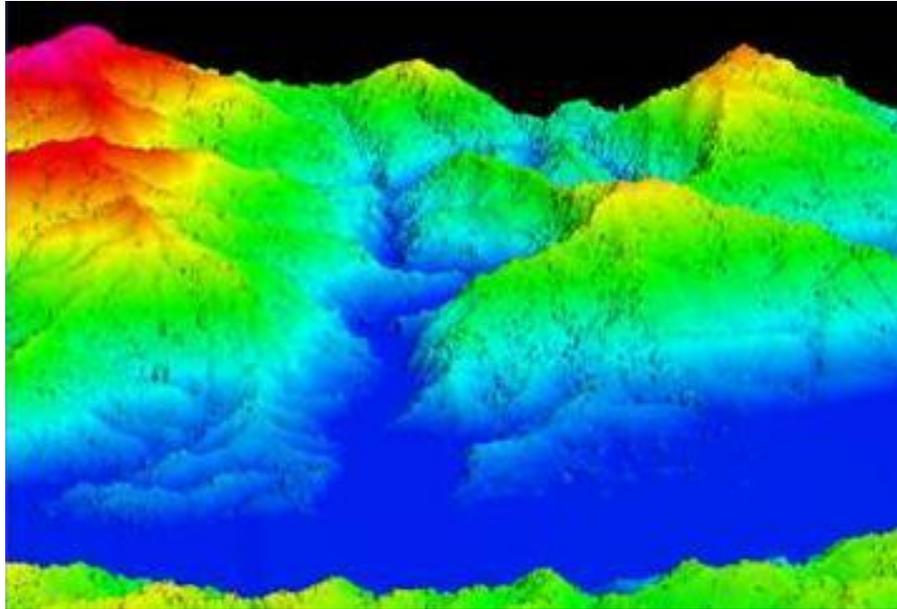


Figura 1.8. Modelo Digital de Elevación visto en perspectiva. (INEGI, 2013c).

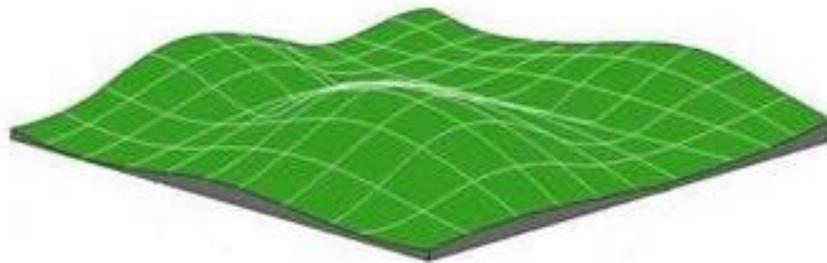


Figura 1.9. Representación de un Modelo Digital de Elevación en formato *raster*. (INEGI, 2013c).

Las dos cualidades principales de los MDE son la exactitud de la posición respecto del sistema de coordenadas de referencia y la resolución, nivel de definición y detalle que depende del método con el cual se genera el MDE, estos métodos pueden ser directos o indirectos. Los métodos directos obtienen sus mediciones directamente en el terreno por medio de levantamientos topográficos con el uso de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) o altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser y la tecnología *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Los indirectos utilizan documentos donde las curvas de nivel y puntos de altura ya han sido digitalizados mediante procesos convencionales de conversión automática (escáner y vectorización), manual (tableta digitalizadora) o restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (INEGI, 2013c).

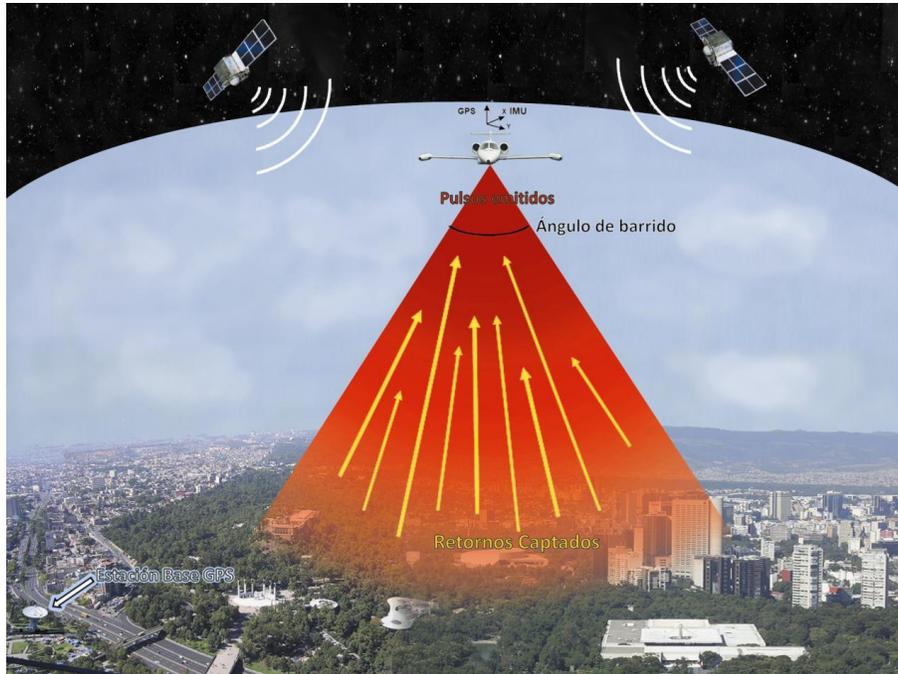


Figura 1.10. Componentes que intervienen en la tecnología LIDAR. (INEGI, 2013c).

En los casos en que los MDE se generan con métodos directos, estos contienen espacios vacíos en los cuales el agua o la sombra pesada impidieron la medición de la elevación, generalmente estos vacíos son pequeños pero hacen que los datos sean menos útiles principalmente en las áreas de caracterización hidrológica; para corregir este problema se han procesado los MDE originales mediante la producción de contornos vectoriales y puntos, la re-interpolación de estos contornos deriva en un nuevo MDE cuyos valores son utilizados para rellenar los vacíos en los datos originales (*Consortium for Spatial Information, 2013*).

Los MDE se presentan en formato de archivo tipo *raster*, Figura 1.9, lo que permite, mediante el uso *software* para SIG, desarrollar mejores análisis del relieve visualizándolos a través de tintas hipsométricas, realizar perfiles longitudinales, obtener vistas en 3D, modelamiento dinámico en 3D, gamas tradicionales de color, intervalos de color de acuerdo a la variación y rangos de la elevación, sobre posición de datos o información en formato vectorial o *raster* de diferentes ámbitos, temas y aplicaciones para generar información (INEGI , 2013c).

1.2.1 Tipos de Modelos Digitales de Elevación (MDE)

El MDE es un recurso íntegro y fundamental para el conocimiento y análisis de la superficie terrestre del cual se derivan los modelos de tipo Superficie y Terreno para representar la versatilidad, disposición, forma y posición del relieve. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) genera estos modelos de alta resolución y exactitud mediante la tecnología LIDAR, estos presentan las mismas características generales de un MDE añadiendo propiedades específicas que se describen a continuación.

1.2.1.1 Modelo Digital de Elevación de Superficie (MDS)

El Modelo Digital de Elevación de Superficie (MDS), Figura 1.11 y 1.12, define a detalle los elementos de origen natural y antrópico contenidos en el terreno, incluyendo vegetación, cubierta forestal, infraestructura y todo lo que se presente como parte de la superficie. Su aplicación abarca la caracterización del terreno, vegetación, censos forestales, altura de edificaciones e infraestructura.



Figura 1.11. Modelo Digital de Elevación de Superficie para el Distrito Federal visto en dos dimensiones. (INEGI, 2013c).

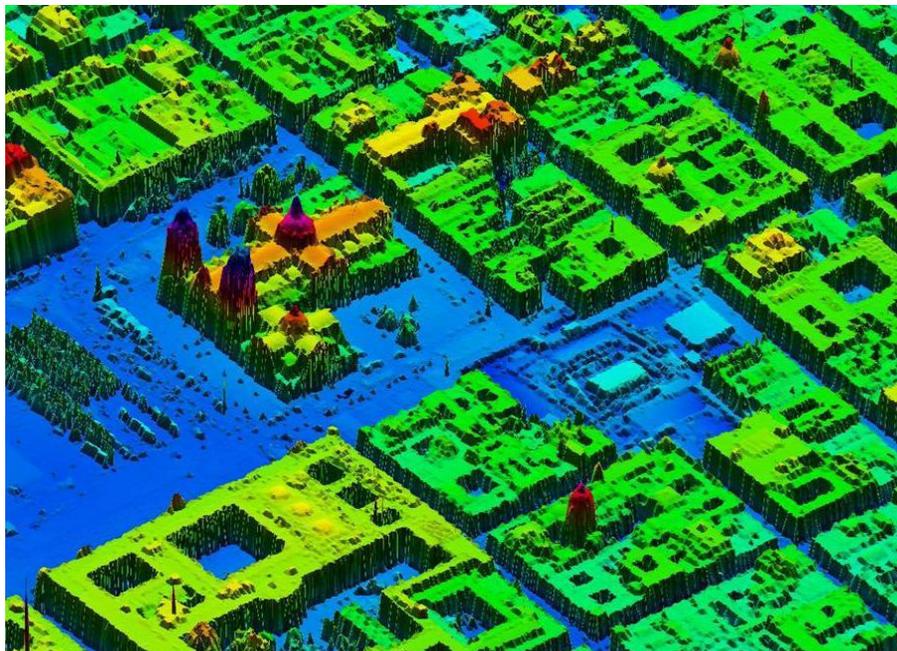


Figura 1.12. Modelo Digital de Elevación de Superficie para el Distrito Federal visto en perspectiva. (INEGI, 2013c).

1.2.1.2 *Modelo Digital de Elevación de Terreno (MDT)*

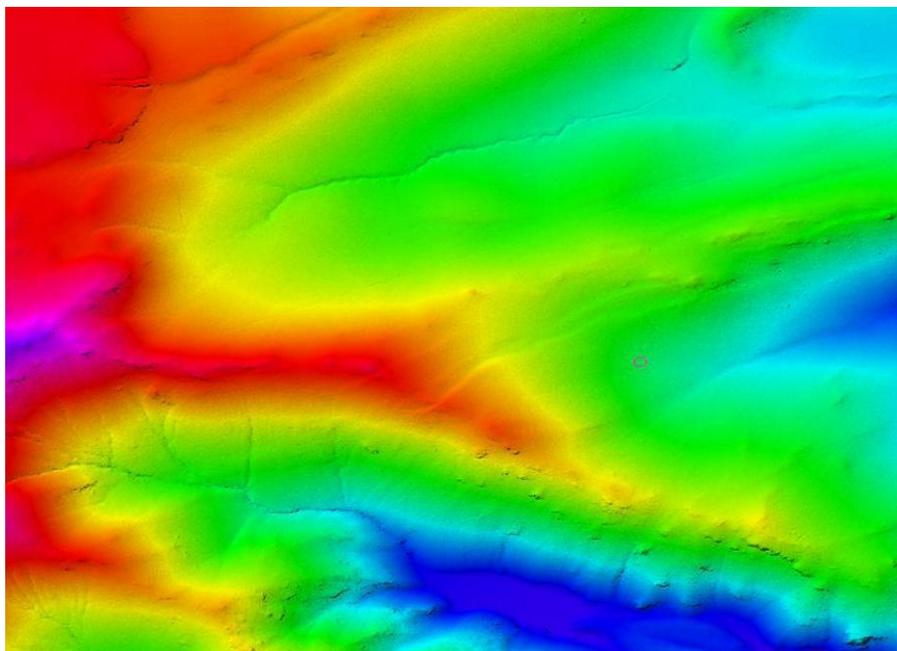


Figura 1.13. Modelo Digital de Elevación de Terreno para Tabasco visto en dos dimensiones. (INEGI, 2013c).

Un MDE también es conocido como Modelo Digital de Elevación de Terreno (MDT), Figura 1.13 y 1.14, presenta la conformación del terreno desnudo; es decir sin vegetación, infraestructura o cualquier otro elemento de origen antrópico. A partir de estos modelos es posible generar datos de altimetría e hidrografía tales como desniveles, generación de curvas de nivel, delimitación de cuencas para estudios hidráulicos e hidrológicos.



Figura 1.14. Modelo Digital de Elevación de Terreno para Nuevo León visto en perspectiva. (INEGI, 2013c).

En conclusión la diferencia entre los dos modelos es que los de superficie, Figura 1.15 a), recrean todo lo existente en un espacio geográfico, mientras los de terreno, Figura 1.15 b), reconstruyen la hipotética forma del relieve sin elemento alguno sobre él.

En general, los modelos digitales de superficie y terreno son útiles para conocer aspectos del terreno tales como: la elevación de cualquier punto, pendiente, desniveles, áreas factibles de inundación, puntos de visión, volúmenes de tierra, cuencas y subcuencas, entre otros (INEGI, 2013c).

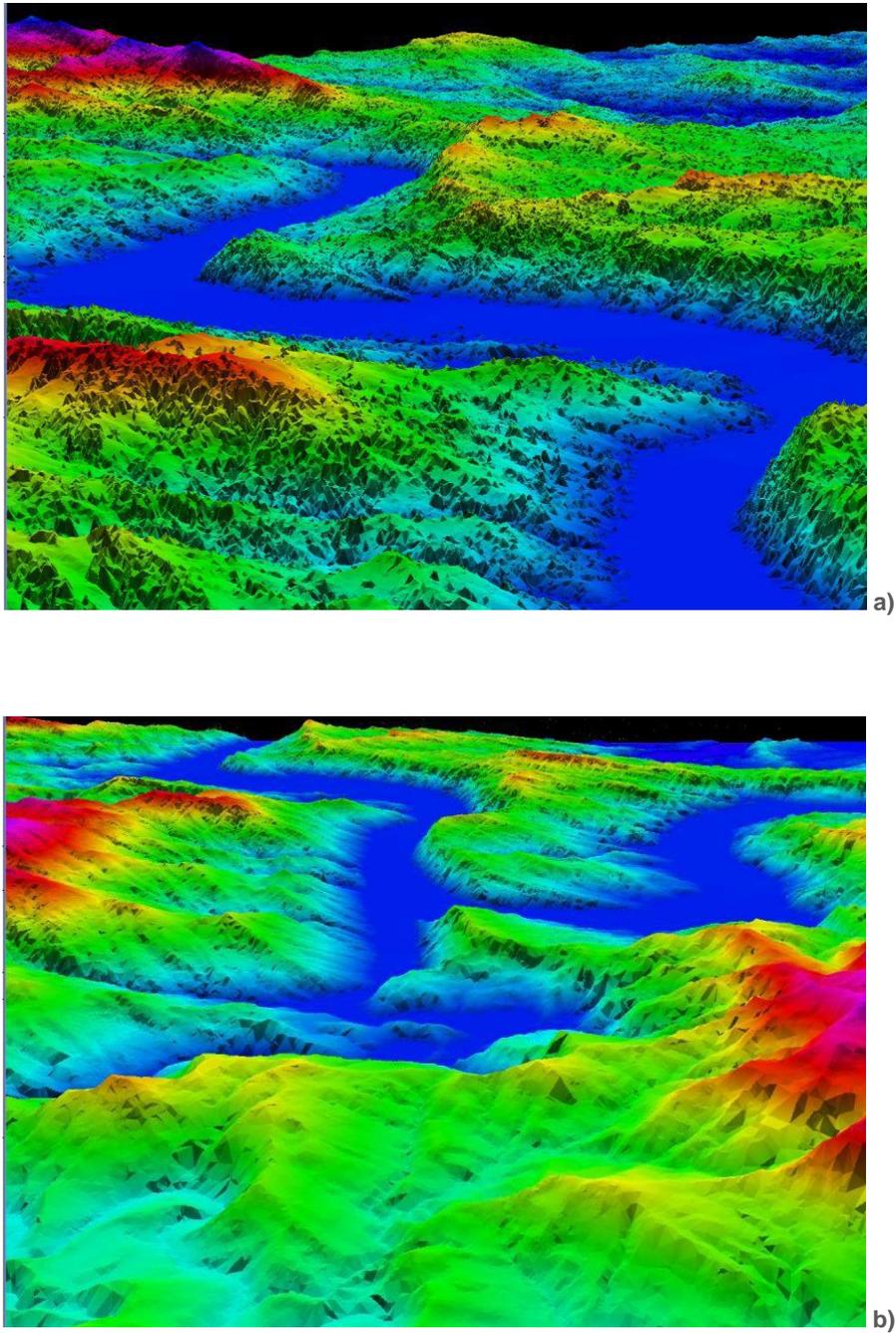


Figura 1.15. Comparación entre un Modelo Digital de Superficie a) y uno de Terreno b) para el estado de Chiapas, vistos en perspectiva. (INEGI, 2013c).

1.2.1.2.1 Cubierta de Hidrografía

A partir del MDT LiDAR, el INEGI generó la Cubierta de Hidrografía para México, Figura 1.16, esta contiene la información de los cauces que sigue la precipitación al caer sobre la superficie terrestre; fue necesario procesar el MDT para obtener datos sobre dirección y

acumulación de flujo, definición y delimitación de corrientes y cuencas de captación. De este modo se obtuvo la red de drenaje que representa mediante líneas la dirección del flujo de afluentes con menor orden en la red hacia el cauce principal y su salida, ya sea en un lago o el océano, con el objetivo de ser un aporte de información confiable para los análisis hidrológicos.

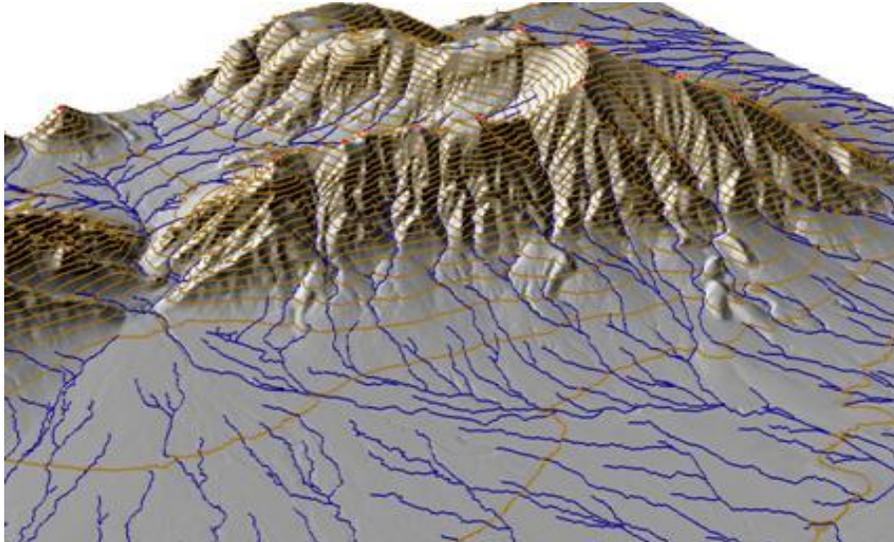


Figura 1.16. Cubierta de hidrografía. (INEGI, 2013c).

1.2.2 Continúo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0

El Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0, Figura 1.17, es un MDE que representa la superficie del territorio Mexicano en una cuadrícula con celdas distribuidas de forma regular cada segundo de arco y se creó con el objetivo de aportar datos actualizados del relieve continental al Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente.

El CEM 2.0 se generó con base en las versiones más recientes de los continuos de curvas de nivel, bancos de nivel y vértices geodésicos, red hidrográfica y cuerpos de agua, Figura 1.18, en su escala 1:50 000. Se elaboró utilizando el modelo de interpolación denominado ANUDEM debido a que considera diversos tipos de información donde existen datos de altura del terreno como son las curvas de nivel y los puntos acotados, también toma en cuenta los métodos de interpolación locales y los globales, así mismo asocia al agua como una fuente primaria de erosión por tanto existen redes de drenaje

bien establecidas y son representadas por la red hidrográfica y los cuerpos de agua (INEGI, 2013c).



Figura 1.17. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0. (INEGI, 2013c).

Para el año 2012, en base al CEM 2.0 y con la utilización de imágenes de satélite de alta resolución, se desarrolló la versión CEM 3.0 cuya característica principal es su resolución a gran detalle.

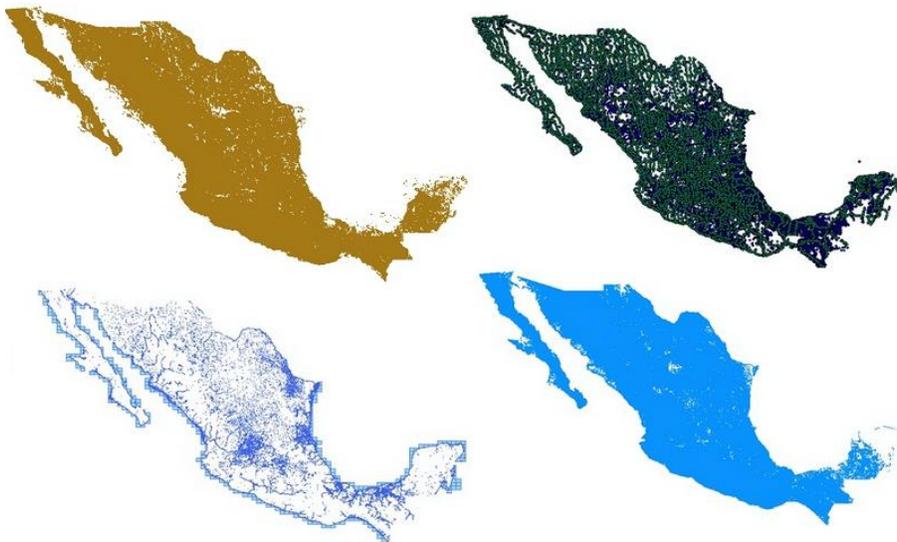


Figura 1.18. Continuos de curvas de nivel, vértices geodésicos y bancos de nivel, cuerpos de agua y red hidrográfica. (INEGI, 2013c).

1.2.3 Obtención de un Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para utilizar cualquier *software* para SIG es necesario contar con un Modelo Digital de Elevación que es posible obtener de internet. A continuación se muestra como descargar esta información en los sitios web CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information*, 2013) e INEGI (2013); finalmente se presentan otros sitios de consulta de datos públicos.

1.2.3.1 Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)

Los datos digitales de más del 80% del planeta han sido proporcionados por *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)* de la NASA. El MDE SRTM 90 m tiene una resolución a 90 m en el ecuador, y se proporciona en una malla de 5 x 5 grados en el sistema de coordenadas geográficas utilizando el *datum* WGS84 en proyección horizontal y el *datum* vertical EGM9. Esta información está disponible tanto en formato *ArCInfo ASCII* como *GeoTiff* para facilitar su uso en las aplicaciones de procesamiento de imágenes y SIG. Se ha reportado que el error vertical del MDE es inferior a 16 m (*Consortium for Spatial Information*, 2013).

El modelo puede ser descargado en la página web de la referencia: *Consortium for Spatial Information* (2013), Figura 1.19, para esto es necesario dar *click* en el enlace **SRTM Data Search and Download** el cual lleva a una página donde se muestra el mallado de 5x5 grados, Figura 1.20, y presenta las siguientes opciones de selección de datos:

1. Selección del servidor. En este caso se utilizara la información proporcionada por CGIAR-CSI.
2. Método de selección de datos. Se presentan tres opciones diferentes, Tabla 1.1.

Selección de datos	Descripción
Selección múltiple	Los mosaicos pueden ser seleccionados aunque no sean colindantes entre sí. Esta selección se muestra en la lista de resultados para que las regiones sean descargadas.

Tabla 1.1. Opciones para la selección de datos. (*Consortium for Spatial Information*, 2013).

Selección de datos	Descripción
Selección con <i>mouse</i>	<p>Haciendo uso del <i>mouse</i> se selecciona un área de interés en el mapa, teniendo en cuenta que solo un área puede ser seleccionada a la vez. En la lista de resultados se mostrará la descripción de cada cuadro perteneciente al área de interés.</p>
Introducir coordenadas	<p>Se pueden introducir las coordenadas del área de interés en grados decimales o G,M,S, especificando la longitud y latitud de los extremos mínimo y máximo. Se calculará el área más adecuada y al oprimir el botón <i>Mark Area</i> aparecerá sombreada, si no se presenta el área deseada, con el botón <i>Clear Area</i> desaparece la selección permitiendo introducir nuevamente las coordenadas. En la lista de resultados se mostrara la descripción de cada cuadro perteneciente al área de interés.</p>

Tabla 1.1. Opciones para la selección de datos. (*Consortium for Spatial Information, 2013*).
Continuación.

3. Selección del formato de archivos. *GeoTiff* o *ArcInfo ASCII*:

Arc ASCII: Es un conjunto de datos basados en texto, con un encabezado de cinco líneas que proporciona información sobre la extensión espacial y su resolución. Las coordenadas en el encabezado representan la esquina inferior izquierda del píxel inferior izquierdo. Los valores donde no se cuenta con datos se representan mediante valores de -9,999 (*Consortium for Spatial Information, 2013*). Estos datos pueden ser convertidos a formato *raster* con el *software* ArcGIS 10.1 usando la siguiente ruta:

ArcToolbox>Conversion Tools>To Raster>ASCII to Raster

Muchos otros programas para SIG pueden leer archivos *Arc ASCII* a través de funciones de conversión.

Geo Tiff. Los archivos *Geo Tiff* son imágenes georeferenciadas, esto quiere decir que tienen los datos geográficos integrados, y se presentan en calidad de 16 bits en formato TIF. En estos archivos los valores de -32,768 representan regiones que no contienen datos (*Consortium for Spatial Information, 2013*).

The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)
Applying GeoSpatial Science for a Sustainable Future...

CGIAR-CSI HOME | SRTM 90m DATABASE HOME | DISCLAIMER | HELP

CGIAR-CSI Content

- What is CGIAR-CSI ?
- CGIAR-CSI Members
- What's New ?
- CRU Climate Data

SRTM Content

- SRTM Data Search and Download**
- SRTM Data Processing Methodology
- SRTM FAQ
- SRTM Quality Assessment (PDF File - 2.55 Mb)
- About SRTM Imagery
- CIAT Landuse Project
- How to Search for Data?
- Disclaimer
- Contact Us

GeoNetwork Project

- CGIAR-CSI Geonetwork Nodes
- GeoNetwork Support

Visitors

See more ▶

48,607	13,288	5,967
45,774	11,241	5,774
36,122	9,832	5,630
22,133	9,631	4,917
20,256	9,395	4,858
17,525	8,182	4,624

SRTM 90m Digital Elevation Data

new Resampled SRTM data to 250m resolutions for the entire globe are available <https://hc.box.net/shared/1yidaheouv> (Password: ThanksCSI!)

UPDATE - VERSION 4: THE SRTM DATA NOW AVAILABLE FROM THIS SITE HAS BEEN UPGRADED TO VERSION 4. THIS LATEST VERSION REPRESENTS A SIGNIFICANT IMPROVEMENT FROM PREVIOUS VERSIONS, USING NEW INTERPOLATION ALGORITHMS AND BETTER AUXILIARY DEMs. WE ARE CONFIDENT THIS IS NOW THE HIGHEST QUALITY SRTM DATASET AVAILABLE

The CGIAR-CSI GeoPortal is able to provide SRTM 90m Digital Elevation Data for the entire world. The SRTM digital elevation data, produced by NASA originally, is a major breakthrough in digital mapping of the world, and provides a major advance in the accessibility of high quality elevation data for large portions of the tropics and other areas of the developing world. The SRTM digital elevation data provided on this site has been processed to fill data voids, and to facilitate its ease of use by a wide group of potential users. This data is provided in an effort to promote the use of geospatial science and applications for sustainable development and resource conservation in the developing world. Digital elevation models (DEM) for the entire globe, covering all of the countries of the world, are available for download on this site. The SRTM 90m DEM's have a resolution of 90m at the equator, and are provided in mosaiced 5 deg x 5 deg tiles for easy download and use. All are produced from a seamless dataset to allow easy mosaicing. These are available in both ArcInfo ASCII and GeoTiff format to facilitate their ease of use in a variety of image processing and GIS applications. Data can be downloaded using a browser or accessed directly from the ftp site. If you find this digital elevation data useful, please let us know at csi@cgiar.org

The NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) has provided digital elevation data (DEMs) for over 80% of the globe. This data is currently distributed free of charge by USGS and is available for download from the National Map Seamless Data Distribution System, or the USGS ftp site. The SRTM data is available as 3 arc second (approx. 90m resolution) DEMs. A 1 arc second data product was also produced, but is not available for all countries. The vertical error of the DEM's is reported to be less than 16m. The data currently being distributed by NASA/USGS (finished product) contains "no-data" holes where water or heavy shadow prevented the quantification of elevation. These are generally small holes, which nevertheless render the data less useful, especially in fields of hydrological modeling.

Figura 1.19. Sitio web del Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information (2013).

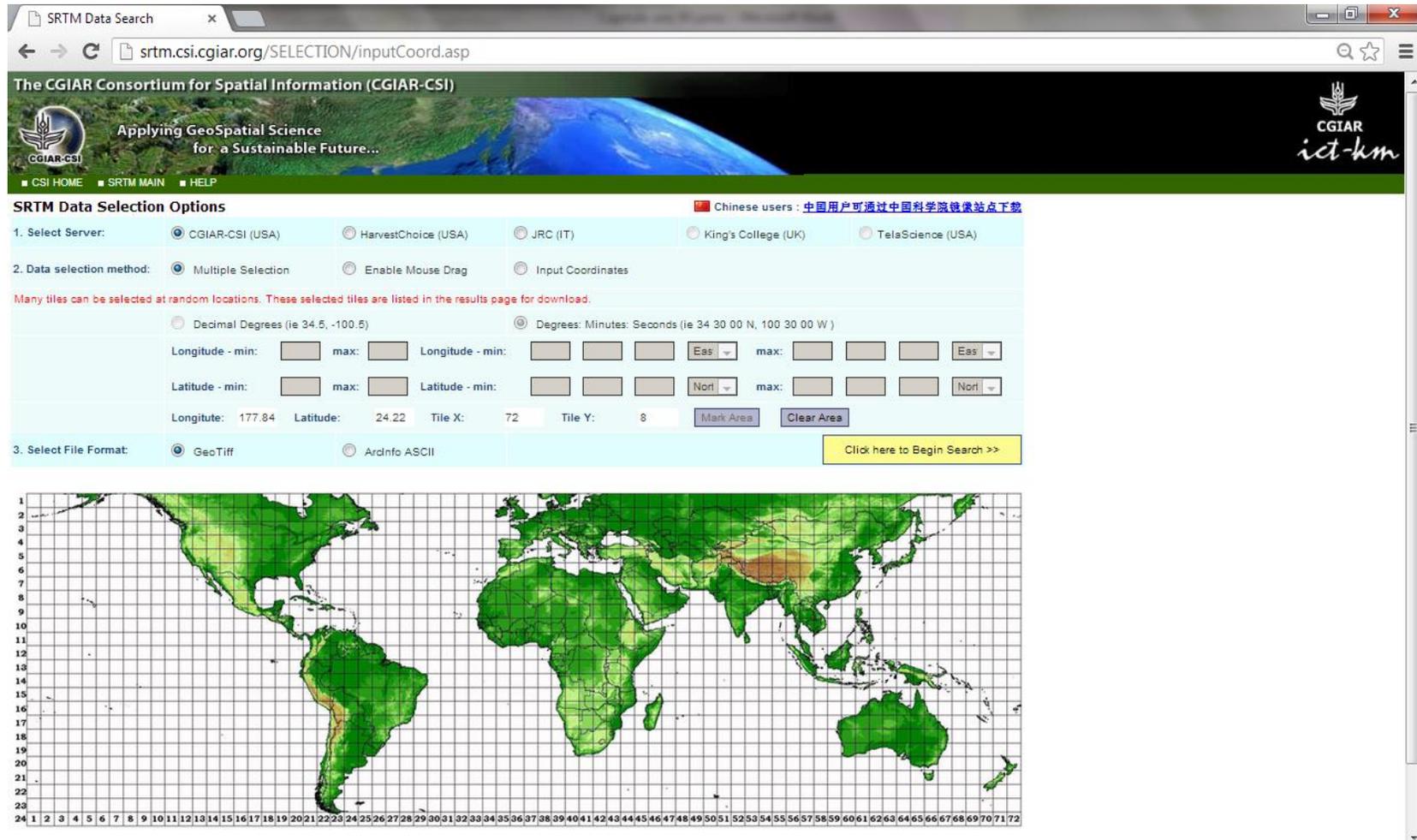


Figura 1.20. Mallado del MDE SRTM 90m. (Consortium for Spatial Information, 2013).

The screenshot displays the SRTM Search Results page. At the top, there is a navigation bar with the CGIAR-CSI logo and the tagline "Applying GeoSpatial Science for a Sustainable Future...". Below this, a search result is shown for "SRTM 90m DEM version 4". The result is presented in a table with three columns: Description, Location, and Image. The Description column contains the following information:

Description	Location	Image
<p>Product : SRTM 90m DEM version 4</p> <p>Data File Name : srtm_16_07.zip</p> <p>Mask File Name : srtm_mk_16_07.zip</p> <p>Latitude min: 25 N max: 30 N</p> <p>Longitude min: 105 W max: 100 W</p> <p>Center point : Latitude 27.50 N Longitude 102.50 W</p>		

Below the table, there are download options for the Data and Mask files via FTP and HTTP. The page also includes a footer with the CGIAR-CSI logo and contact information.

Figura 1.21. Información del cuadrante seleccionado a descargar. (Consortium for Spatial Information, 2013).

Para iniciar la búsqueda es necesario oprimir el botón **Click here to Being Search**, de inmediato se presenta la lista de resultados, Figura 1.21, donde se muestra el número de mosaicos seleccionados; la descripción de cada uno incluyendo el nombre del producto, el nombre del archivo de datos y el archivo *Mask*, las coordenadas máximas y del centroide de la región; también se muestra su localización y una miniatura de la imagen.

Los archivos que pueden ser descargados son: *Data Download (FTP)*, *Data Download (HTTP)*, *Data Mask Download (FTP)* y *Data Mask Download (HTTP)*; siendo el primero el más recomendado.

Los archivos *Mask* representan cuadrículas unitarias que muestran las áreas en donde los datos originales contienen vacíos (-32,768 para archivos *Geo TIFF* y -9,999 en los *Arc ASCII*). Las áreas con valores en los datos *Mask* han sido sometidas a una técnica de interpolación, por lo tanto contienen valores interpolados de elevación que no están disponibles en la versión original que la *NASA* presenta de los datos *SRTM*. El margen de error dentro de estas áreas, originalmente vacías, debe esperarse que sea importante (*Consortium for Spatial Information, 2013*).

1.2.3.2 Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 es el MDE que cubre en su totalidad la República Mexicana, cada dato tiene una resolución de 15 m x 15 m en el sistema de coordenadas geográficas correspondiente al datum a ITRF92 época 1988 del elipsoide GRS80 donde las alturas se presentan en metros. El CEM 3.0 presenta un error medio cuadrático de 4.9 m y se distribuye en los formatos Banda entrelazada por línea (BIL), *raster* y Tagged Image File Format (TIFF).

La página web del INEGI (2013), Figura 1.22, ofrece dos opciones para descargar la información, Figura 1.23:

1. Seleccionar una entidad federativa de interés.
2. Descargar el CEM 3.0 nacional dividido en seis partes.

Es posible descargar los MDE a las resoluciones: 15 m, 30 m, 60 m, 90 m y 120 m.

Al procesar la selección aparecerá una ventana con la información a descargar, Figura 1.24, como es el nombre del MDE, el tamaño del archivo y el tiempo que tardara en descargarse; la selección se presenta en formato comprimido.

Continuo de Elevaciones | x

www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx

INEGI INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

México

Inicio | Contacto | INEGI Móvil | Síguenos: RSS, Twitter, Facebook, YouTube, LinkedIn

Estadística | Geografía | Investigación | Productos y servicios | Acerca del INEGI

Inicio > Geografía > Datos de relieve > Continental >

Datos de Relieve

Continental

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga

Ver todo

Definición

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

Volcanes Iztaccihuatl-Popocatepetl.
Límites territoriales de los Estados de México, Puebla y Morelos.

- Definición
- Objetivo
- Antecedentes
- Ventajas
- Aplicaciones del CEM en el INEGI
- Características
- Descargar

Figura 1.22. Sitio web de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013).

Continuo de Elevaciones | x

www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx

INEGI INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

México

Inicio | Contacto | INEGI Móvil | Síguenos: RSS, Twitter, Facebook, YouTube, LinkedIn

Estadística | Geografía | Investigación | Productos y servicios | Acerca del INEGI

Inicio > Geografía > Datos de relieve > Continental >

Datos de Relieve

Continental

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga

Opción 1.- Seleccione la entidad federativa a descargar:

Resolución: 15 metros

Seleccione la entidad federativa: -- seleccione una opción --

Procesar selección

Opción 2.- Descarga del CEM completo [3]:

Resolución: 15 metros

Procesar descarga CEM nacional

[3] Tome en cuenta que los archivos empacados del CEM completo de 15 y 30 m. miden máximo 5.5 GB, por lo que el tiempo de descarga será considerable, además, sin comprimir tiene un tamaño de alrededor de 54 y 14GB respectivamente, por lo que en algunos sistemas de archivo no será posible descomprimirlo.

versión: 2013.11.20 1223

Figura 1.23. Opciones para descargar el CEM 3.0. (INEGI, 2013c).

Continuo de Elevaciones | x

www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx

INEGI INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

México

Inicio | Contacto | INEGI Móvil | Síguenos: RSS, Twitter, Facebook, YouTube, LinkedIn

Estadística | Geografía | Investigación | Productos y servicios | Acerca del INEGI

Inicio > Geografía > Datos de relieve > Continental >

Datos de Relieve

Continental

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga

Para realizar otra selección de descarga [dé clic aquí.](#)

El MDE seleccionado corresponde a:

22 Querétaro

Tamaño:

Tamaño del archivo compactado: 20 MB

Tiempo mínimo estimado de descarga de acuerdo a la velocidad de su conexión:

4 Mbps	menos de un minuto
2 Mbps	1 min.
1 Mbps	2 min.
128 Kbps	21 min.
64 Kbps	42 min.

Si desea proceder con la extracción y descarga del MDE utilice la siguiente liga:

[CEM_V3_R15_E22.rar](#)

Para descargar dé clic con el botón secundario del ratón sobre el nombre del archivo compactado y seleccione la opción "Guardar destino como..."

Los archivos a nivel nacional de resolución a 15 y 30 metros fueron compactados usando la opción dividir por volumen, por lo tanto es necesario descargar todas las partes para una correcta descompactación.

Figura 1.24. Información de la selección a descargar. (INEGI, 2013c).

1.2.3.3 Datos Públicos

Los siguientes son sitios web donde se puede descargar información de MDE de dominio público (ArcGIS 10.1, 2013).

GTOPO es una base de datos de elevación global con una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km). Disponible en:

<http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>

ETOPO es un modelo de relieve global de 1 minuto de arco de la superficie de la Tierra que integra topografía del suelo y batimetría de océanos. Disponible en:

<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

Datos globales de elevación del terreno de múltiples resoluciones 2010 (GMTED2010) es un juego de productos en tres diferentes resoluciones (aproximadamente 1,000, 500 y 250 metros) que proporciona el USGS. Disponible en:

<http://pubs.usgs.gov/of/2011/1073>

El Radiómetro espacial avanzado de reflexión y emisiones térmicas (ASTER) es un instrumento en el satélite Terra de la NASA, las imágenes en estéreo de este sensor se procesaron para generar un modelo digital de elevación casi global entre las latitudes 83N y 83S con publicaciones de 30 metros. Disponible en:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

El National Elevation Dataset (NED) fue creado por el USGS para los EE.UU. Los datos del NED están disponibles a nivel nacional en resoluciones de 1 segundo de arco, 1/3 segundo de arco y 1/9 de segundo de arco en áreas limitadas. Disponible en:

<http://ned.usgs.gov/>

Los servicios de elevación mundial de ESRI proporcionan información de elevación simple, acceso en línea a las colecciones globales de resolución múltiple, datos de

elevación de origen múltiple, productos de datos de elevación, aplicaciones relacionadas y servicios adicionales. Disponible en:

www.arcgis.com

1.3 ArcGIS Aplicado a Hidrología

ArcGIS 10.1 cuenta con herramientas y modelos de datos con el fin de contribuir en el análisis geoespacial específico en diferentes campos de aplicación, haciendo de particular interés el estudio de los recursos hídricos para esto se cuenta con la herramienta *Arc Hydro* que permite delimitar y caracterizar cuencas, definir y analizar redes hidrogeométricas, administrar datos de series de tiempo y configurar y exportar datos a modelos numéricos. Este sistema está conformado por los modelos de datos y herramientas *Arc Hydro*, *Arc Hydro Data Model* y *Arc Hydro Tools*. El sistema *Arc Hydro* tiene como objetivo asignar atributos en el modelo de datos para análisis subsiguientes, así como proporcionar las funciones principales de mayor aplicación para la certera toma de decisiones en el ámbito de los aprovechamientos hidráulicos. En el Anexo A se muestra como realizar la caracterización de una cuenca utilizando el *software* ArcGIS 10.1 y la barra de herramientas ***Arc Hydro Tools***, así como los conceptos básicos necesarios para iniciar en el uso de los SIG.

2 MANEJO DE DATOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROMÉTRICOS

Uno de los principales problemas que se presenta en la etapa de planeación y diseño de obras hidráulicas es la falta de información hidrométrica y climatológica. Para diseñar estructuras hidráulicas con la menor incertidumbre posible, es necesario conocer técnicas que permitan al ingeniero tener cantidad y calidad en la información faltante, de tal manera que se pueda garantizar la seguridad de la infraestructura.

Este capítulo hace referencia a las bases de datos utilizadas para obtener las series históricas de cada tipo de variable, así como la manera en que se presentan los datos; se explican las técnicas de interpolación para datos climatológicos utilizadas para obtener la estimación puntual de un evento con la menor incertidumbre; además de las técnicas de normalización, relleno y extensión de registros para datos hidrométricos.



2.1 Datos Climatológicos

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) administra una red de 3,817 estaciones climatológicas, Figura 2.1, que oficialmente se encuentran en operación, de las cuales 1,064 son estaciones de referencia, Figura 2.2, de donde se obtienen los datos para determinar el comportamiento medio del clima nacional y las 2,753 estaciones restantes son climatológicas, Figura 2.3, donde se mide temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento.

Para determinar el valor de la densidad de estaciones por km^2 , se hará uso del valor de la extensión territorial, siendo de $1,964,375 \text{ km}^2$, dividiendo esta cantidad entre el número de estaciones se obtendrá un valor de 0.002 estaciones por km^2 , cantidad que resulta escasa para el monitoreo del comportamiento de las variables meteorológicas.

En cuanto a la distribución de las estaciones se observa que, Figuras 2.2 y 2.3, en las zonas fronterizas, norte y sureste, no se cuenta con una red apropiada, mientras que en el centro hay una gran concentración de ellas.



Figura 2.1. Estación climatológica convencional del SMN. (Cruz y Mendoza, 2010).

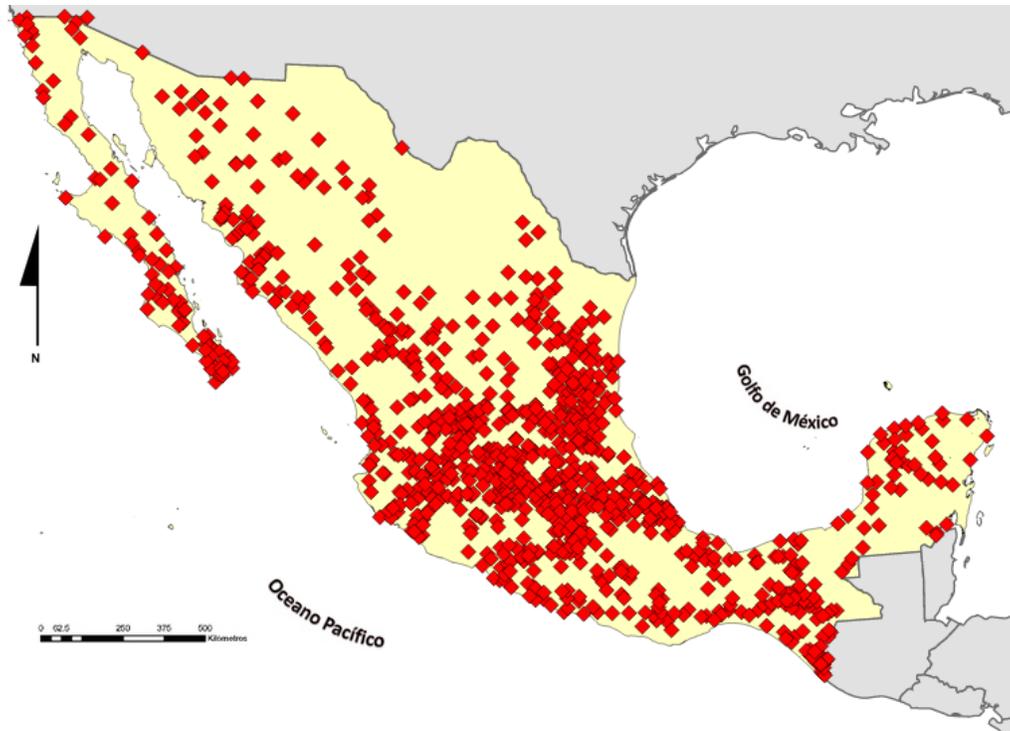


Figura 2.2. Estaciones climatológicas de referencia en la República Mexicana. (CONAGUA, 2012a).

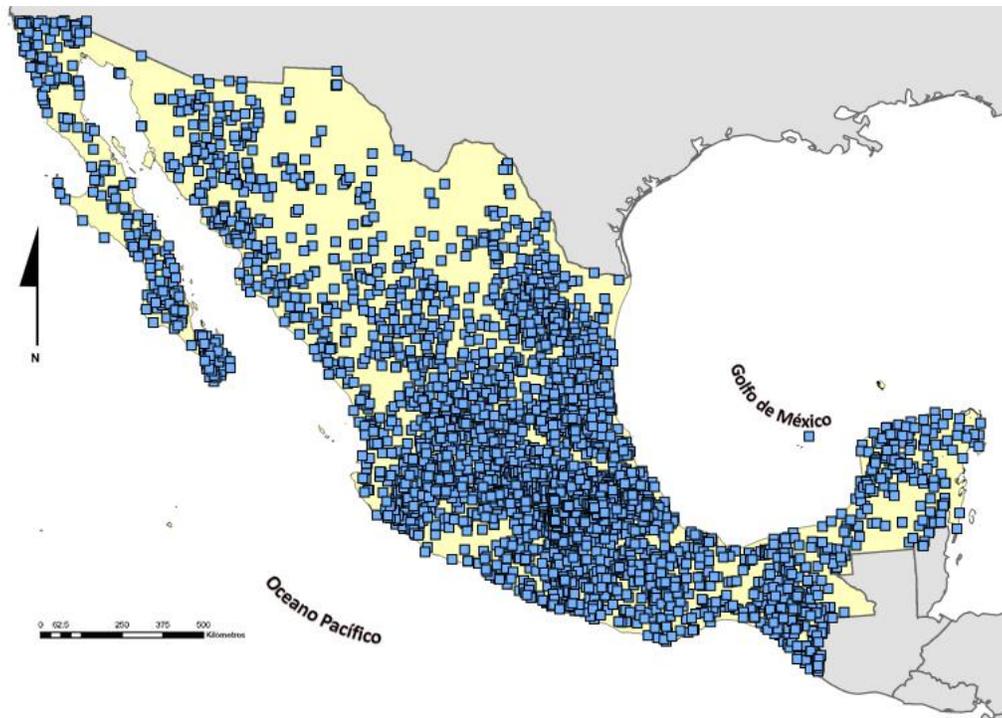


Figura 2.3. Estaciones climatológicas en la República Mexicana. (CONAGUA, 2012a).

2.1.1 Clima Computarizado (CLICOM)

La base de datos climatológicos oficial en la República Mexicana es el sistema Clima Computarizado (CLICOM), esta es operada por el SMN, y contiene la información de 10 variables climáticas que son registradas en la red de estaciones climatológicas, Tabla 2.1.

Clave	Variable	Unidad
001	Temperatura ambiente	°C (a las 8 a.m.)
002	Temperatura máxima	°C
003	Temperatura mínima	°C
005	Precipitación en 24 horas	mm (de 8 a.m. a 8 a.m.)
018	Evaporación en 24 horas	mm (de 8 a.m. a 8 a.m.)
030	Días con tormenta	0 no hay, 1 si hay
031	Días con granizo	0 no hay, 1 si hay
032	Días con niebla	0 no hay, 1 si hay
043	Cobertura nubosa	0 despejado, 1 medio nublado, 2 nublado
091	Días con helada	0 no hay, 1 si hay

Tabla 2.1. Variables climatológicas registradas en el sistema CLICOM (CONAGUA, 2007).

El CLICOM cuenta con un catálogo donde se incluye la información de todas las estaciones de la red siendo esta:

Clave de la estación;	Organismo que la opera;
Nombre de la estación;	Inicio de registro;
Municipio;	Fin de registro;
Estado;	Situación;
Organismo de Cuenca;	Coordenadas [G,M,S];
Cuenca;	Altura [msnm];
Subcuenca;	Observaciones.
Tipo de estación;	

La base de datos se presenta en 32 archivos con formato de valores separados por comas, de Microsoft Excel, uno por cada entidad federativa. Está organizada verticalmente por clave de estación, en orden ascendente, el mes-año de cada una de las

variables registradas; y de manera horizontal se presenta el día del mes acompañado por un indicador diario, Figura 2.4.Los indicadores dan información acerca de la calidad del registro solo cuando es necesario, Tabla 2.2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	FLAG
1	DATASET-ID	Station-ID	ELEMENT-CC	YEAR-MONTI	VALUE-1	FLAG1-1	VALUE-2	FLAG1-2	VALUE-3	FLAG1-3	VALUE-4	FLAG1-4	VALUE-5	FLAG1-5	VALUE-6	FLAG
270	1	1003	3	1935-05	13.5		11.5		10		11		11		11	
271	1	1003	5	1935-05	0		0		0		0		0		0	
272	1	1003	30	1935-05	0		0		0		0		0		0	
273	1	1003	31	1935-05	0		0		0		0		0		0	
274	1	1003	32	1935-05	0		0		0		0		0		0	
275	1	1003	43	1935-05	1		2		2		1		2		1	
276	1	1003	1	1935-06	20.5		23.5		22.5		21		19.5		17	
277	1	1003	2	1935-06	36		36		35		32.5		32		29.5	
278	1	1003	3	1935-06	15		18		19		16		16		16.5	
279	1	1003	5	1935-06	0		0 T		5.6		0 T		2.8		0 T	
280	1	1003	30	1935-06	0		0		0		0		0		0	
281	1	1003	31	1935-06	0		0		0		0		0		0	
282	1	1003	32	1935-06	0		0		0		0		0		0	
283	1	1003	43	1935-06	0		0		1		2		2		2	
284	1	1003	1	1935-07	20		19.5		17		18.5		16		17	
285	1	1003	2	1935-07	29.5		27		25		27.5		23		26.5	
286	1	1003	3	1935-07	15.5		16.5		15.5		15		15		15	
287	1	1003	5	1935-07	10.6		16.3		15		24.5		1.2		24.8	
288	1	1003	30	1935-07	0		0		0		1		0		1	
289	1	1003	31	1935-07	0		0		0		0		0		0	
290	1	1003	32	1935-07	1		1		1		1		1		1	
291	1	1003	43	1935-07	2		2		2		2		2		2	
292	1	1003	1	1935-08	19		18.5		20		18		20		19.5	
293	1	1003	2	1935-08	29.5		29		29		27.5		27.5		28	
294	1	1003	3	1935-08	16		13.5		15.5		14.5		16.5		15.5	
295	1	1003	5	1935-08	2		0.4		2.2		5		1.9		12.5	

Figura 2.4. Presentación de la base de datos CLICOM (2007) para el estado de Aguascalientes.

Indicador	Significado
M	Valor no existente
D	Valor no confiable
T	Lluvia no apreciable
E	Valor Estimado

Tabla 2.2. Indicadores utilizados en la base de datos CLICOM (2007).

2.1.2 Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III)

El *software* Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) facilita la extracción de la información de la base de datos CLICOM para las variables descritas en la Tabla 2.1. La interfaz gráfica, Figura 2.5, es amigable, y se puede utilizar en sistemas Windows Vista y 7.

La selección de las estaciones de interés puede realizarse mediante: una lista de estaciones, Figura 2.6, donde se indica el estado al que pertenecen, clave, nombre, latitud, longitud [W], altitud [msnm], y periodo de registro; un mapa donde se presentan todas las estaciones dentro de la República Mexicana, Figura 2.7; definiendo un área rectangular o polígono; e importándolas. Estas se utilizan para la consulta de la base de datos, Figura 2.8, eligiendo la variable en estudio y el periodo a analizar, este último dato se obtiene de la lista de estaciones; el archivo que genera esta consulta se guarda en formato de texto y es posible visualizarla en Microsoft Excel.

El *software* ERIC III permite graficar series de tiempo de una estación a la vez, Figura 2.9, esta opción es un poco restringida ya que solo permite introducir un periodo máximo de 10 años, el gráfico indica solo los estadísticos muestrales: media y desviación estándar aunque no especifica si son sesgados o insesgados.

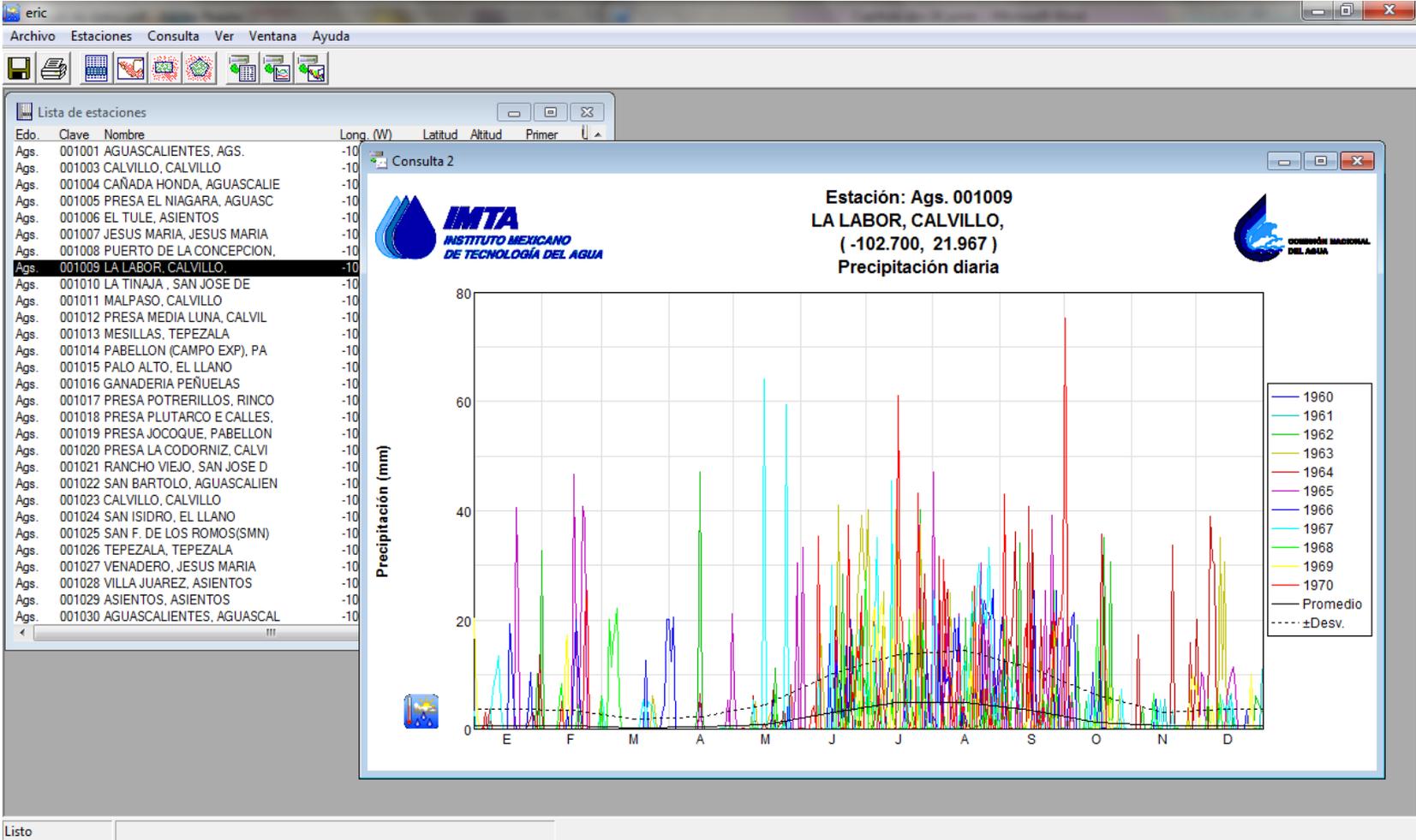


Figura 2.5. Interfaz gráfica del software ERIC III. (IMTA, 2006).

Edo.	Clave	Nombre	Long. (W)	Latitud	Altitud	Primer	Ultimo	Compl.
Ags.	001001	AGUASCALIENTES, AGS.	-102.300	21.883	1908	07/1980	10/1980	51.7
Ags.	001003	CALVILLO, CALVILLO	-102.717	21.883	1702	01/1932	12/1988	94.3
Ags.	001004	CANADA HONDA, AGUASCALIE	-102.199	22.000	1925	03/1970	09/2004	100.0
Ags.	001005	PRESA EL NIAGARA, AGUASC	-102.372	21.779	1828	04/1957	10/2004	100.0
Ags.	001006	EL TULE, ASIENTOS	-102.100	22.083	1970	12/1941	12/1988	100.0
Ags.	001007	JESUS MARIA, JESUS MARIA	-102.350	21.950	1800	12/1941	12/1988	97.1
Ags.	001008	PUERTO DE LA CONCEPCION,	-102.135	22.202	2300	07/1959	10/2004	100.0
Ags.	001009	LA LABOR, CALVILLO,	-102.700	21.967	1600	01/1944	12/1988	99.8
Ags.	001010	LA TINAJA , SAN JOSE DE	-102.554	22.164	2425	08/1961	09/2004	100.0
Ags.	001011	MALPASO, CALVILLO	-102.664	21.860	1775	03/1949	09/2004	99.9
Ags.	001012	PRESA MEDIA LUNA, CALVIL	-102.802	21.794	1585	07/1970	10/2004	100.0
Ags.	001013	MESILLAS, TEPEZALA	-102.166	22.313	1990	09/1963	09/2004	99.9
Ags.	001014	PABELLON (CAMPO EXP), PA	-102.293	22.167	1909	09/1937	11/2003	99.3
Ags.	001015	PALO ALTO, EL LLANO	-101.969	21.916	2015	05/1967	10/2004	99.9
Ags.	001016	GANADERIA PEÑUELAS	-102.300	21.700	1878	04/1945	05/1976	67.3
Ags.	001017	PRESA POTRERILLOS, RINCO	-102.444	22.233	2090	04/1942	10/2004	99.3
Ags.	001018	PRESA PLUTARCO E CALLES,	-102.415	22.141	2020	06/1937	09/2004	100.0
Ags.	001019	PRESA JOCOQUE, PABELLON	-102.359	22.128	1970	07/1942	10/2004	100.0
Ags.	001020	PRESA LA CODORNIZ, CALVI	-102.674	21.997	1783	08/1963	09/2004	100.0
Ags.	001021	RANCHO VIEJO, SAN JOSE D	-102.511	22.123	2090	08/1959	10/2004	100.0
Ags.	001022	SAN BARTOLO, AGUASCALIENT	-102.170	21.748	1965	05/1949	09/2004	100.0
Ags.	001023	CALVILLO, CALVILLO	-102.712	21.837	1665	01/1959	10/2004	94.3
Ags.	001024	SAN ISIDRO, EL LLANO	-102.104	21.778	1895	01/1969	10/2004	95.1
Ags.	001025	SAN F. DE LOS ROMOS(SMN)	-102.283	22.250	1800	06/1926	12/1983	96.7
Ags.	001026	TEPEZALA, TEPEZALA	-102.169	22.223	2110	07/1962	07/2004	100.0
Ags.	001027	VENADERO, JESUS MARIA	-102.463	21.877	1995	01/1951	10/2004	100.0
Ags.	001028	VILLA JUAREZ, ASIENTOS	-102.068	22.101	1970	04/1949	10/2004	98.5
Ags.	001029	ASIENTOS, ASIENTOS	-102.420	22.242	2155	07/1959	10/2004	95.1
Ags.	001030	AGUASCALIENTES, AGUASCAL	-102.308	21.895	1865	10/1947	10/2004	100.0
Ags.	001031	EL NOVILLO, EL LLANO	-101.999	22.019	2010	05/1972	07/2004	94.7
Ags.	001032	LAS FRAGUAS, EL LLANO	-101.892	22.039	2020	05/1971	10/2004	98.2
Ags.	001033	LOS CONOS, EL LLANO	-101.992	21.897	2015	05/1971	08/2004	99.3
Ags.	001034	SANDOVALES, AGUASCALIENT	-102.109	21.885	2000	04/1972	08/2004	100.0
Ags.	001035	SAN FCO. DE LOS VIVEROS	-102.150	21.933	1970	04/1972	12/1983	93.1
Ags.	001036	SANTA ROSA, AGS.	-102.300	21.817	2000	03/1972	01/1976	87.1
Ags.	001037	VIÑEDOS RIVIER, J. MARIA	-102.417	21.983	1925	04/1972	09/1973	100.0
Ags.	001038	AGUASCALIENTES,AGS	-102.300	21.867	1889	01/1971	01/1971	
Ags.	001039	PABELLON DE ARTEAGA,P.A.	-102.283	22.150	1878	01/1971	01/1971	

Figura 2.6. Selección de estaciones por lista del software ERIC III. (IMTA, 2006).

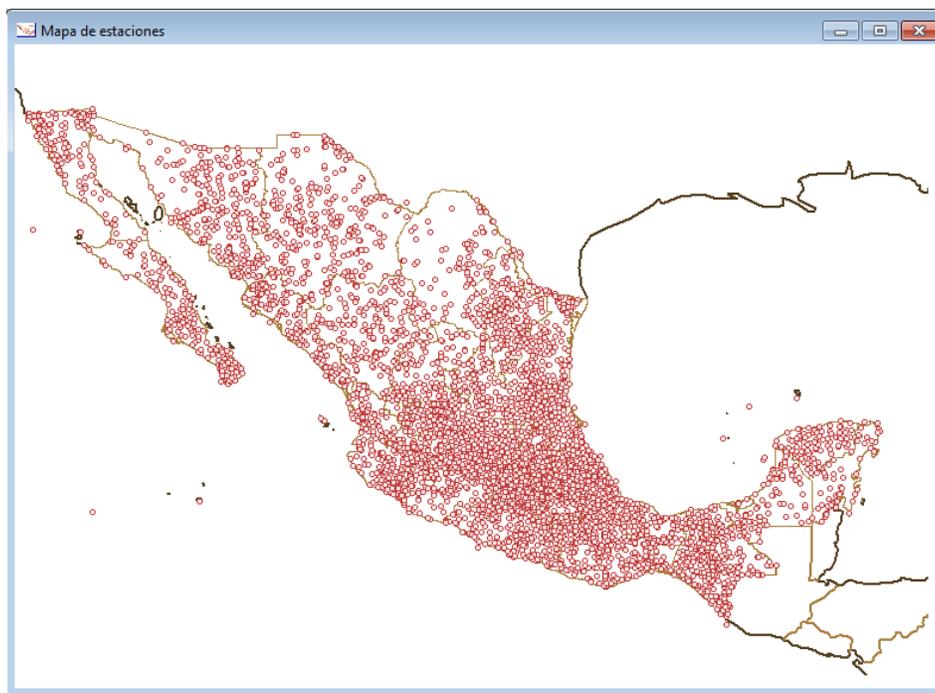


Figura 2.7 Selección de estaciones por mapa del software ERIC III. (IMTA, 2006).

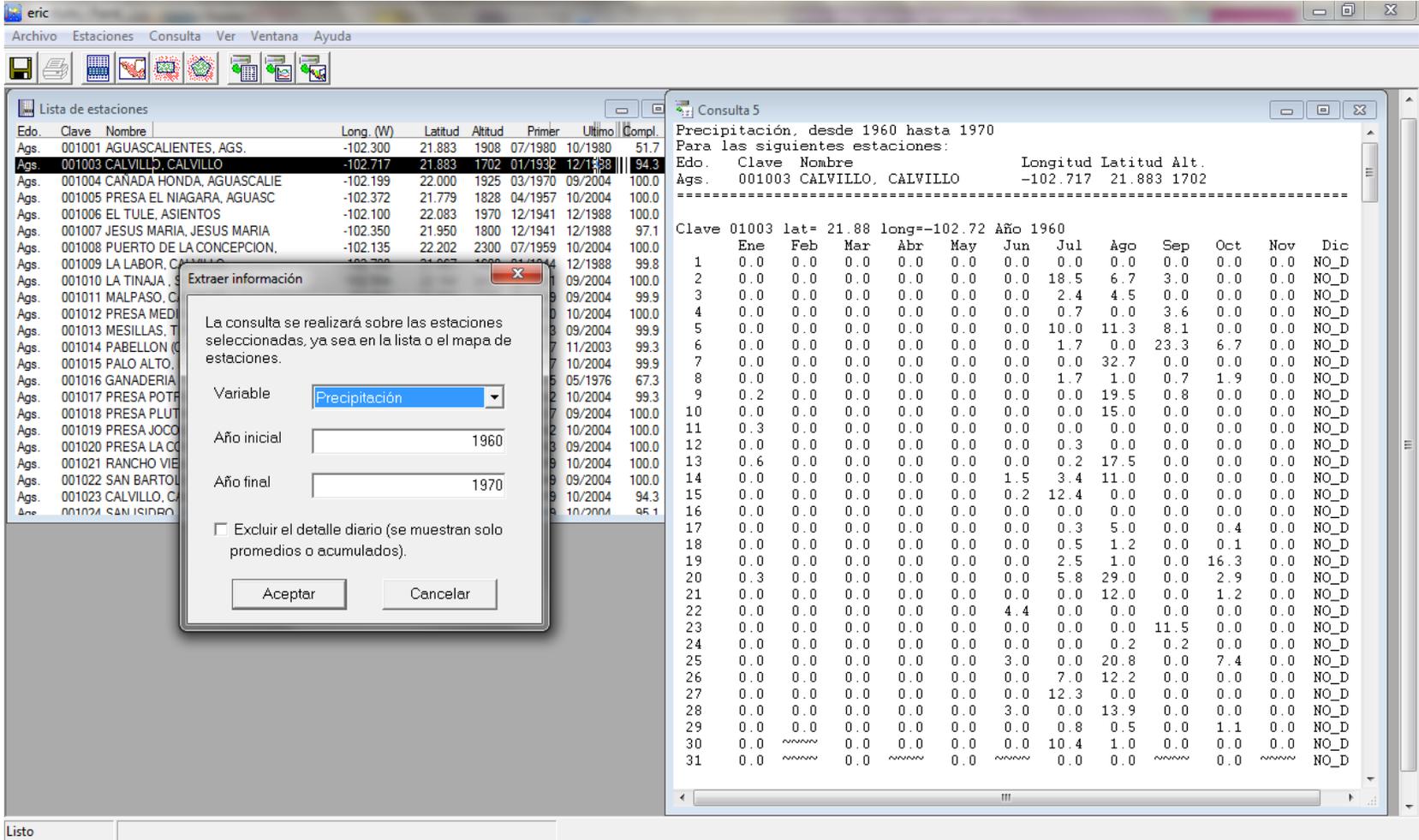


Figura 2.8. Consulta de datos en el software ERIC III. (IMTA, 2006).

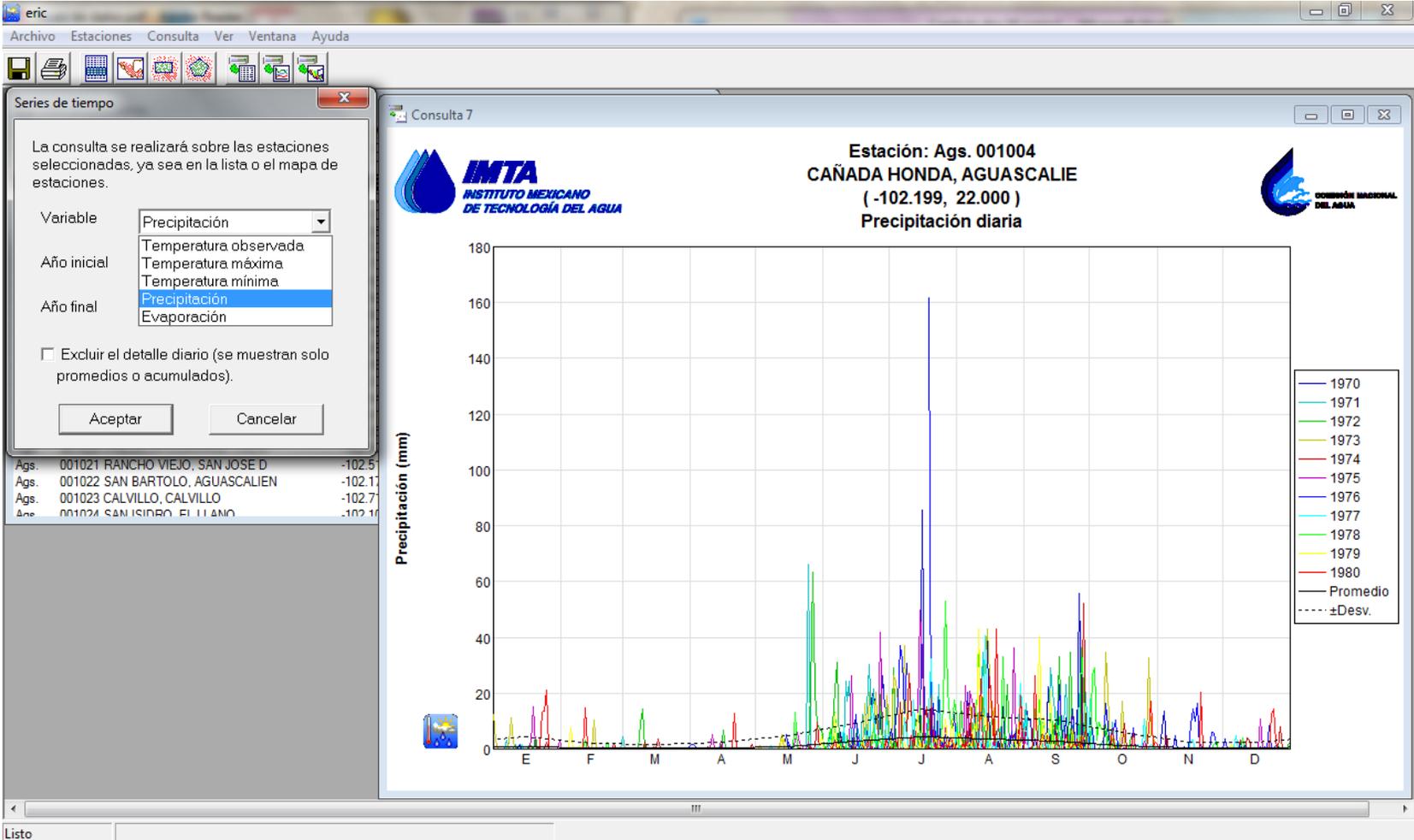


Figura 2.9. Grafica de una serie de tiempo en el software ERIC III. (IMTA, 2006).

La consulta de mapas, Figura 2.10, se incluye solo para las variables temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación; y solo se analiza una estación a la vez.

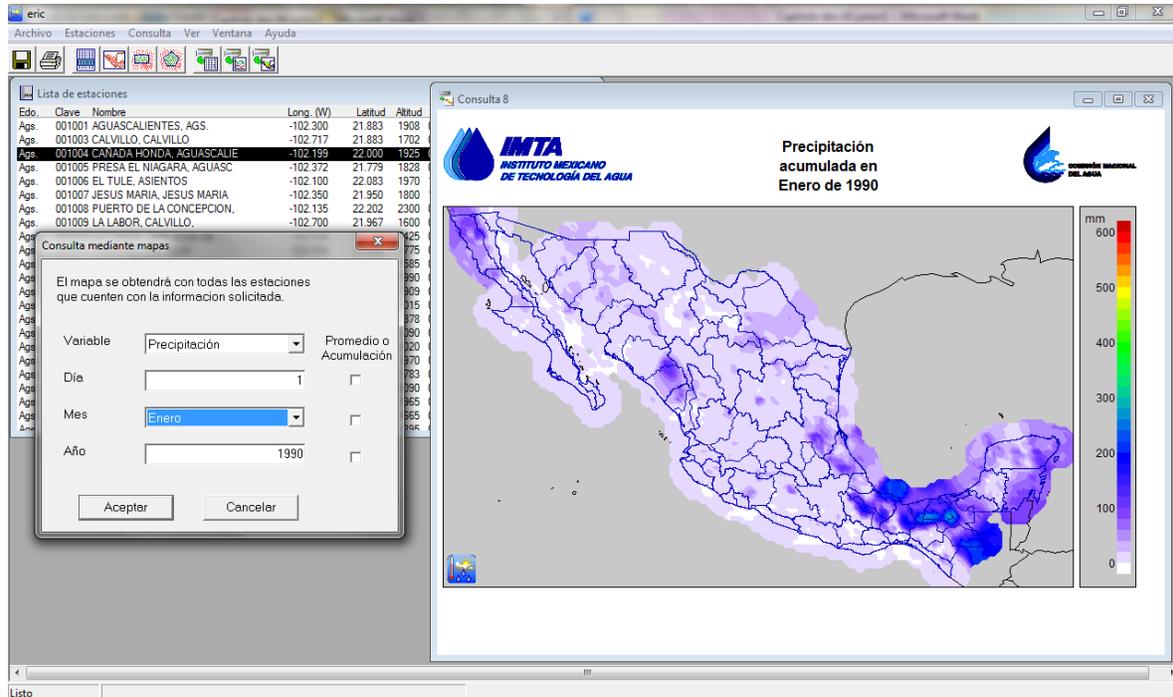


Figura 2.10. Mapa de precipitación acumulada generado en el software ERIC III. (IMTA, 2006).

2.1.3 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) y Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESIME's)

Una Estación Meteorológica Automática (EMA) está formada por un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas, Figura 2.11. Su función principal es la recopilación de registros y monitoreo de algunas variables meteorológicas, Tabla 2.3, en promedio cada 10 minutos se generan los archivos, esta información es enviada vía satélite en intervalos de una o tres horas por estación (CONAGUA, 2013a).

Variable	Unidad
Velocidad del viento	[Km/h] (del promedio de 10 minutos)
Dirección del viento	Grados [°] (del promedio de 10 minutos)
Presión atmosférica	milibar [mbar] (del promedio de 10 minutos)
Temperatura	[°C] (del promedio de 10 minutos)
Humedad relativa	[%] (del promedio de 10 minutos)
Radiación solar	[W/m ²] (del promedio de 10 minutos)
Precipitación	[mm] (acumulada en 10 minutos)

Tabla 2.3. Variables climatológicas registradas en una EMA. (CONAGUA, 2013a).

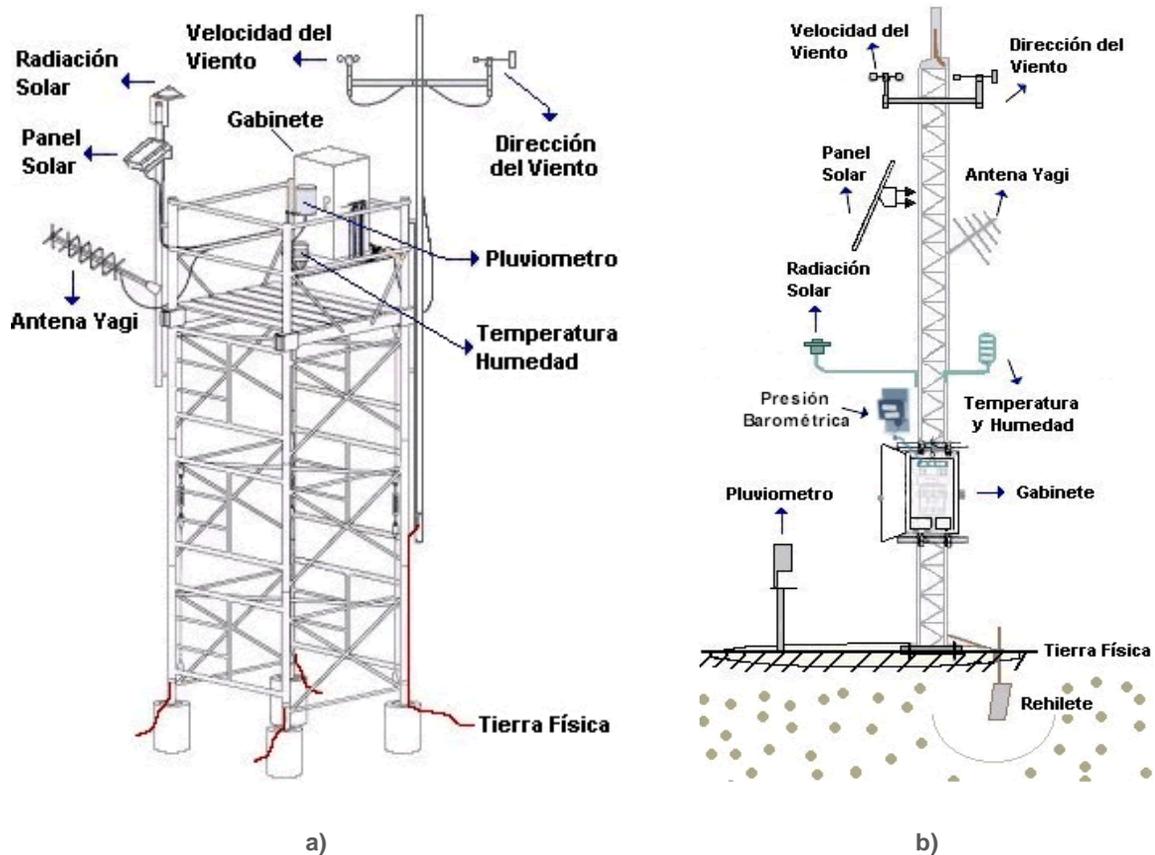


Figura 2.11. Estructuras de una EMA: a) Estructura tipo andamio; b) Estructura tipo torre triangular. (CONAGUA, 2013a).

Al igual que una EMA, una Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME) es un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática, Figura 2.12. La diferencia principal es que estas crean una base de datos y un mensaje sinóptico, esto es, un reporte que se genera simultáneamente en todos los observatorios cada tres horas y presenta información meteorológica de tiempo presente y pasado de manera codificada (CONAGUA, 2013a).

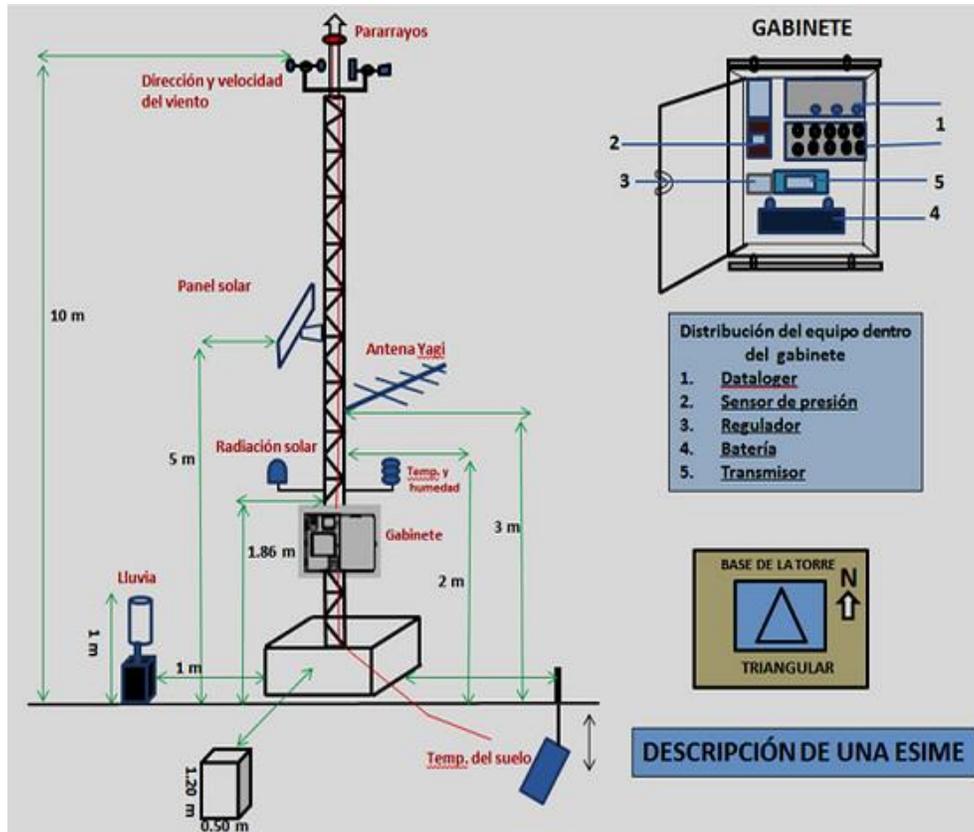


Figura 2.12. Estructura de una ESIME. (CONAGUA, 2013a).

Las ESIME's se encuentran ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos y contienen un *software* que permite hacer los cálculos correspondientes de las variables que se reportan en un mensaje sinóptico, Tabla 2.4, (CONAGUA, 2013a).

El área representativa de ambos tipos de estaciones automáticas es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso. Los archivos generados tanto por EMA's como por ESIME's se rigen por el Tiempo Universal Coordinado (UTC), lo que se debe tener en consideración para la correcta interpretación de los datos (CONAGUA, 2013a).

Variable	Unidad
Velocidad del viento	[Km/h] (del promedio de 10 minutos)
Dirección del viento	Grados [°] (del promedio de 10 minutos)
Presión atmosférica	milibar [mbar] (del promedio de 10 minutos)
Temperatura	[°C] (del promedio de 10 minutos)
Humedad relativa	[%] (del promedio de 10 minutos)
Radiación solar	[W/m ²] (del promedio de 10 minutos)
Precipitación	[mm] (acumulada en 10 minutos)
Visibilidad	[Km]
Temperatura a 10 cm de la superficie.	[°C] (del promedio de 10 minutos)

Tabla 2.4. Variables climatológicas registradas en una ESIME. (CONAGUA, 2013a).

En el sitio web del SMN, Figura 2.13, se presenta un Mapa Llave donde se muestran las estaciones automáticas que operan en el país; este mapa se puede presentar como una imagen estática del área que contiene al estado seleccionado o como animaciones de imágenes satelitales las cuales son: infrarrojo, espectro visible y vapor de agua.

Es posible visualizar las variables precipitación y temperatura en el mapa, sus resultados se presentan en tres formatos de acuerdo con la periodicidad en la toma de datos de las estaciones; 10 minutos, 60 minutos y 24 horas. También existe la opción de graficar la serie de tiempo de las últimas 24 horas cada 10 minutos para las variables registradas, Figura 2.14.

Los registros generados por las estaciones automáticas se pueden almacenar en formato de texto, Figura 2.15, o en Microsoft Excel, Figura 2.16. En ellos se presentan los datos cada 10 minutos de las variables registradas por los sensores, además de:

Nombre de la estación;	Coordenadas [G,M,S];
Organismo que la opera;	Altura [msnm].

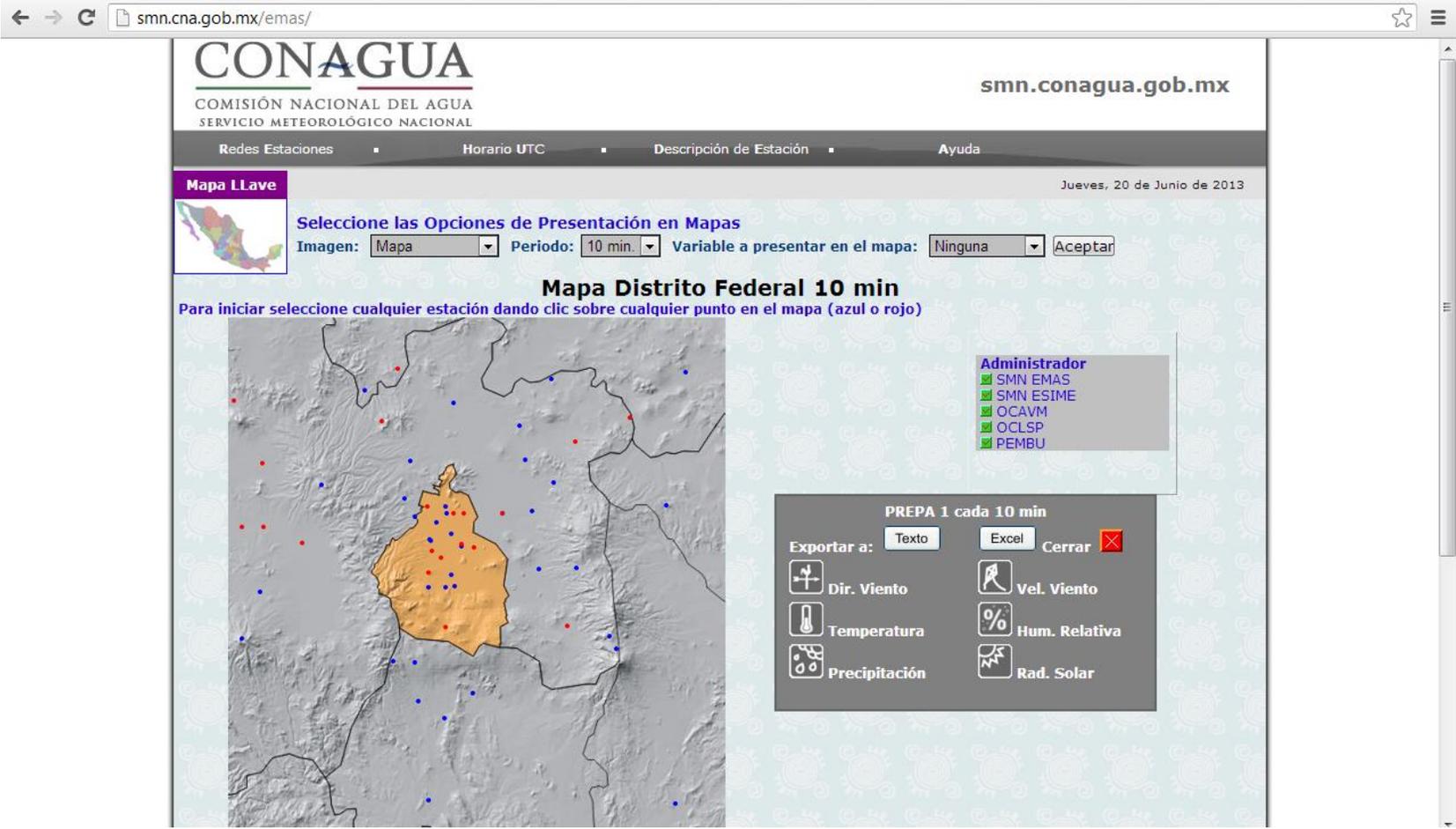


Figura 2.13. Sitio web del Servicio Meteorológico Nacional. (CONAGUA, 2013a).

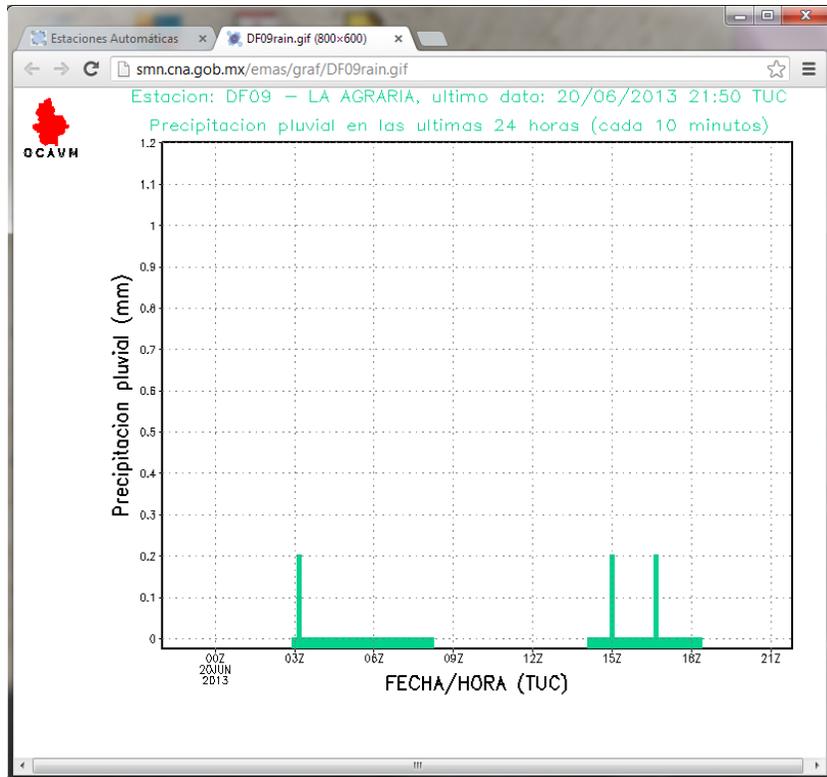


Figura 2.14. Gráfico de una serie de tiempo de las últimas 24 horas cada 10 minutos generado por una estación automática. (CONAGUA, 2013a).

smn.cna.gob.mx/emas/bt/ x

smn.cna.gob.mx/emas/bt/MO03_10M.TXT

Estación: CUERNAVACA, MOR
Operada por: SMN ESIME
Longitud: 99°14'00" Longitud: 18°56'00" Altitud: 1618

DD/MM/AAAA HH:MM	DIRS	DIRR	RAFVIENTO2	RAPRAFAGA2	TEMP	HR	PB	PREC	RAD-SOL	
19/06/2013 18:00	221	44	1.60	4.20	25.3	54	837.2	0.0	743.0	
19/06/2013 18:10	237	324	2.30	5.30	25.6	51	837.0	0.0	1053.0	
19/06/2013 18:20	238	338	1.80	4.50	25.5	50	836.9	0.0	783.0	
19/06/2013 18:30	209	324	1.90	5.20	26.2	52	836.8	0.0	957.0	
19/06/2013 18:40	205	294	1.30	4.00	26.0	51	836.6	0.0	953.0	
19/06/2013 18:50	220	12	1.50	4.10	26.9	50	836.5	0.0	887.0	
19/06/2013 19:00	217	302	1.80	4.40	26.6	51	836.5	0.0	883.0	
19/06/2013 19:10	203	286	2.00	4.70	26.4	52	836.4	0.0	906.0	
19/06/2013 19:20	207	276	1.80	5.30	26.2	54	836.3	0.0	764.0	
19/06/2013 19:30	200	322	1.30	5.00	26.4	53	836.2	0.0	673.0	
19/06/2013 19:40	148	295	1.00	2.50	27.5	47	836.2	0.0	770.0	
19/06/2013 19:50	165	283	0.90	2.40	27.1	49	836.0	0.0	890.0	
19/06/2013 20:00	156	337	1.40	3.70	27.2	47	835.9	0.0	892.0	
19/06/2013 20:10	170	294	1.40	5.00	27.8	46	835.7	0.0	553.0	
19/06/2013 20:20	179	357	1.10	5.30	27.0	48	835.5	0.0	443.0	
19/06/2013 20:30	189	350	1.30	3.80	26.7	51	835.4	0.0	345.0	
19/06/2013 20:40	189	286	1.20	3.00	26.2	51	835.2	0.0	447.0	
19/06/2013 20:50	227	60	1.00	3.40	27.4	50	835.1	0.0	883.0	
19/06/2013 21:00	157	336	1.30	3.20	27.8	46	835.0	0.0	375.0	
19/06/2013 21:10	182	291	1.30	3.80	27.8	47	834.8	0.0	836.0	
19/06/2013 21:20	182	305	1.30	4.90	27.8	48	834.8	0.0	846.0	
19/06/2013 21:30	171	300	1.20	4.20	27.0	48	834.9	0.0	268.0	
19/06/2013 21:40	175	4	1.40	3.50	26.8	49	834.8	0.0	634.0	
19/06/2013 21:50	164	299	0.80	3.20	26.8	49	834.7	0.0	347.0	
19/06/2013 22:00	34	190	1.00	2.30	26.9	49	834.7	0.0	318.0	
19/06/2013 22:10	148	327	0.90	4.00	27.1	49	834.7	0.0	184.0	
19/06/2013 22:20	133	276	1.20	3.20	26.6	50	834.6	0.0	131.0	
19/06/2013 22:30	71	142	1.60	2.60	25.9	58	834.6	0.0	139.0	
19/06/2013 22:40	80	300	1.10	2.70	25.0	57	834.6	0.0	145.0	
19/06/2013 22:50	154	266	0.80	2.60	25.0	56	834.7	0.0	68.0	
19/06/2013 23:00	0	0	0.00	0.00	24.7	57	834.9	0.0	48.0	
19/06/2013 23:10	0	0	0.00	0.00	24.5	63	835.0	0.0	34.0	
19/06/2013 23:20	0	0	0.00	0.00	24.0	66	835.0	0.0	26.0	

Figura 2.15. Registro generado por una estación automática en formato de texto. (CONAGUA, 2013a).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Estación:	CUERNAVACA MOR											
2	Operada por:	SMN ESIME											
3	Longitud:	99°14'00"	Latitud:	18°56'00"	Altitud:	1618							
4													
5		DIRS	DIRR	RAPVIENTO2	RAPRAFAGA2	TEMP	HR	PB	PREC	RAD-SOL			
6	19/06/2013 18:00	221	44	1.6	4.2	25.3	54	837.2	0	743			
7	19/06/2013 18:10	237	324	2.3	5.3	25.6	51	837	0	1053			
8	19/06/2013 18:20	238	338	1.8	4.5	25.5	50	836.9	0	783			
9	19/06/2013 18:30	209	324	1.9	5.2	26.2	52	836.8	0	957			
10	19/06/2013 18:40	205	294	1.3	4	26	51	836.6	0	953			
11	19/06/2013 18:50	220	12	1.5	4.1	26.9	50	836.5	0	887			
12	19/06/2013 19:00	217	302	1.8	4.4	26.6	51	836.5	0	883			
13	19/06/2013 19:10	203	286	2	4.7	26.4	52	836.4	0	906			
14	19/06/2013 19:20	207	276	1.8	5.3	26.2	54	836.3	0	764			
15	19/06/2013 19:30	200	322	1.3	5	26.4	53	836.2	0	673			
16	19/06/2013 19:40	148	295	1	2.5	27.5	47	836.2	0	770			
17	19/06/2013 19:50	165	283	0.9	2.4	27.1	49	836	0	890			
18	19/06/2013 20:00	156	337	1.4	3.7	27.2	47	835.9	0	892			
19	19/06/2013 20:10	170	294	1.4	5	27.8	46	835.7	0	553			
20	19/06/2013 20:20	179	357	1.1	5.3	27	48	835.5	0	443			
21	19/06/2013 20:30	189	350	1.3	3.8	26.7	51	835.4	0	345			
22	19/06/2013 20:40	189	286	1.2	3	26.2	51	835.2	0	447			
23	19/06/2013 20:50	227	60	1	3.4	27.4	50	835.1	0	883			
24	19/06/2013 21:00	157	336	1.3	3.2	27.8	46	835	0	375			
25	19/06/2013 21:10	182	291	1.3	3.8	27.8	47	834.8	0	836			
26	19/06/2013 21:20	182	305	1.3	4.9	27.8	48	834.8	0	846			
27	19/06/2013 21:30	171	300	1.2	4.2	27	48	834.9	0	268			

Figura 2.16. Registro generado por una estación automática en formato Microsoft Excel. (CONAGUA, 2013a).

2.2 Técnicas de Interpolación de variables climáticas

En la mayoría de los proyectos en los que es utilizada información de registros de variables climáticas, estos presentan inconsistencia en los datos o simplemente no se cuenta con ellos; debido a esto, es necesario hacer uso de modelos matemáticos que permitan inferir con la menor incertidumbre los datos faltantes. La estimación adecuada, depende del número y distribución de medición en el área.

Sean X_j y Y_j las coordenadas de un punto j en un espacio bidimensional, Figura 2.17, y P_j^i una función de esas coordenadas, la que denota el proceso observado en n estaciones de medición; j es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido $j = 1, 2, \dots, n$; P_e^i es una estimación del proceso en un punto de coordenadas X_e y Y_e ; el superíndice i refiere el tiempo en que el proceso es estimado o registrado. La estimación puntual se hace de los datos medidos en las n estaciones y se puede representar por (Escalante, 2013):

$$P_e^i = \sum_{j=1}^n \omega_j P_j^i \quad (2.1)$$

Donde:

P_e^i Valor del proceso interpolado en cualquier punto X_e, Y_e en el tiempo i

ω_j Factores de peso para el sitio j

P_j^i Valor del proceso registrado en el sitio j en el tiempo i

n Número de estaciones en estudio

Para determinar cuál es el mejor método se deberá aplicar la prueba de bondad de ajuste.

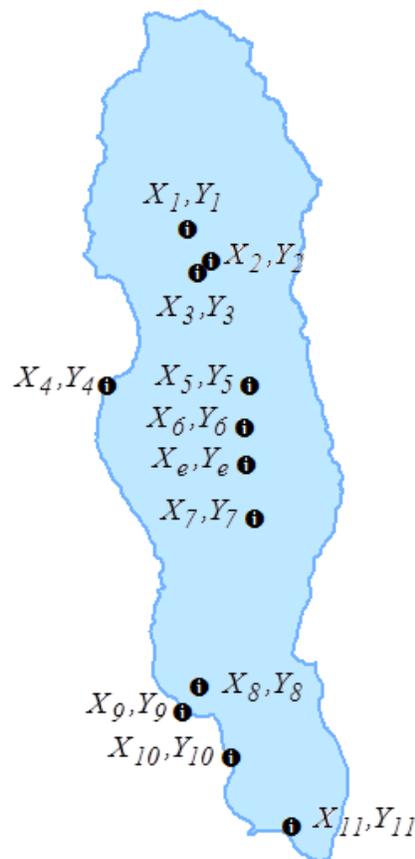


Figura 2.17. Ejemplo de la distribución de estaciones climatológicas en una cuenca.

2.2.1 Método de Thiessen

Este método considera que la estimación del proceso P_e^i en el sitio de interés “e” es igual al valor observado de la estación más cercana en el área.

La distancia es determinada desde el sitio de interés “e” a cualquier sitio j , para $j = 1, 2, \dots, n$ sitios por (Escalante, 2013):

$$d_{ej} = \sqrt{\left(X_e - X_j\right)^2 + \left(Y_e - Y_j\right)^2} \quad (2.2)$$

$$d_{ej} = \text{Min}(d_{e1}, d_{e2}, \dots, d_{en}) \quad (2.3)$$

Donde:

d_{ej} Distancia desde el sitio de interés “e” a cualquier sitio j

X_j, Y_j Coordenadas en UTM del sitio j

X_e, Y_e Coordenadas en UTM del sitio de interés “e”

Así $\omega_j = 1$

2.2.2 Método de la Interpolación Polinomial

Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área de estudio en función de las coordenadas del sitio a interpolar empleando una función polinomial del tipo (Escalante, 2013):

$$P_e = \sum_{k=1}^m \theta_k \phi_k(X_e, Y_e) \quad (2.4)$$

Donde:

P_e Valor del proceso interpolado en cualquier punto X_e, Y_e

θ_k k-ésimo coeficiente polinomial

$\phi_k(X_e, Y_e)$ k-ésimo monomio en términos de las coordenadas X_e, Y_e

m Número total de monomios, determinándose del grado de la función polinomial ajustada

Los monomios algebraicos se obtienen de la Tabla 2.5.

Grado	k	$\phi_k(X, Y)$	m
0	1	1	1
1	2-3	XY	3
2	4-6	$X^2 \quad XY \quad Y^2$	6
3	7-10	$X^3 \quad X^2Y \quad XY^2 \quad Y^3$	10
4	11-15	$X^4 \quad X^3Y \quad X^2Y^2 \quad XY^3 \quad Y^4$	15
5	16-21	$X^5 \quad X^4Y \quad X^3Y^2 \quad X^2Y^3 \quad XY^4 \quad Y^5$	21
6	22-28	$X^6 \quad X^5Y \quad X^4Y^2 \quad X^3Y^3 \quad X^2Y^4 \quad XY^5 \quad Y^6$	28

Tabla 2.5. Tabla de Monomios utilizados en el método de la Interpolación Polinomial.

El proceso matricial a seguir para ajustar la función polinomial es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \theta_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ij} \end{bmatrix}^T \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{ki} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{kj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ki} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{kj} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \phi_k(x_e, y_e) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde:

$\begin{bmatrix} \phi_{ij} \end{bmatrix}$ Matriz de monomios cuadrada de $m \times m$ de los sitios j

$\begin{bmatrix} \phi_k(x_e, y_e) \end{bmatrix}$ Vector de monomios del sitio interés “ e ”

Este método se puede aplicar utilizando dos aproximaciones en función del número de sitios n a interpolar:

Si: $m < n$ Aproximación por mínimos cuadrados

Si: $m = n$ Aproximación de Lagrange

La suma de los factores de peso de las n estaciones en estudio debe ser igual a uno, si esto no se cumple se desecha la técnica.

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \quad (2.9)$$

Donde:

ω_j Factores de peso para el sitio j

n Número de estaciones en estudio

2.2.3 Método de la Interpolación de la distancia inversa

Este método tiene cuatro variantes: distancia inversa, distancia inversa al cuadrado, optimización del parámetro β y optimización de los factores de peso ω_j (Escalante,

2013). Para los métodos de distancia inversa y distancia inversa al cuadrado los factores de peso ω_j se obtienen en función de las distancias d_{ej} calculadas con la ecuación (2.2), y ajustando un parámetro β , igual a uno y a dos para cada método respectivamente.

$$\omega_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta} \quad (2.10)$$

Donde:

- ω_j Factores de peso para el sitio j
- d_{ej} Distancia desde el sitio de interés “ e ” a cualquier sitio j
- $\beta = 1$ Parámetro para el método de la distancia inversa
- $\beta = 2$ Parámetro para el método de la distancia inversa al cuadrado
- n Número de estaciones en estudio

La suma de los factores de peso de las n estaciones, para ambas técnicas, debe ser igual a uno, si esto no se cumple debe verificarse que la técnica haya sido aplicada correctamente.

La optimización del parámetro β se realiza minimizando el Error Medio Cuadrático Insesgado (EMCI) entre cada valor registrado y su correspondiente interpolado, esto es, la ecuación (2.11) se sustituye en la ecuación (2.12) para que el EMCI sea función del parámetro β y se minimiza, también se puede utilizar otro criterio de bondad de ajuste como el error estándar de ajuste, el error medio cuadrático, etc.

$$P_e^i = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta P_j^i}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta} \quad (2.11)$$

$$EMCI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \left[P_r^i - P_e^i \right]^2}{k-1}} \quad (2.12)$$

Donde:

P_e^i Valor del proceso interpolado en cualquier punto X_e, Y_e en el tiempo i

d_{ej} Distancia desde el sitio de interés “ e ” a cualquier sitio j

P_j^i Valor del proceso registrado en el sitio j en el tiempo i

β Parámetro óptimo de la región homogénea en estudio que debe encontrarse en el intervalo $1 < \beta < 2$

P_r^i Valor del proceso registrado en el sitio de interés “ e ” en el tiempo i

n Número de estaciones en estudio

k Longitud del registro

A diferencia de las variantes anteriores ahora los factores de peso ω_j , no dependen de las distancias d_{ej} ni del parámetro β , esto quiere decir que son valores arbitrarios, y por lo tanto la suma de ellos para las n estaciones en estudio puede ser diferente de uno.

De igual manera la optimización de los factores de peso ω_j se realiza minimizando el EMCI entre cada valor registrado y su correspondiente interpolado, la ecuación (2.13) se sustituye en la ecuación (2.12) para que el EMCI sea función de ω_j y se minimiza. Para esta técnica se plantean 12 ecuaciones, una por cada mes.

$$P_{e_i} = \sum_{j=1}^n \omega_j P_{j_i} \quad (2.13)$$

Donde:

P_e^i Valor del proceso interpolado en cualquier punto X_e, Y_e en el tiempo i

P_j^i Valor del proceso registrado en el sitio j en el tiempo i

ω_j Factores de peso para el sitio j , valores arbitrarios

n Número de estaciones en estudio

Para la aplicación de estos dos últimos métodos es necesario contar con un registro de longitud de al menos 30 años de algunas estaciones pertenecientes a la región homogénea en estudio, las cuales en cada caso se consideraran como el sitio de interés “ e ” para que sea posible la comparación de los valores reales con los interpolados, esto es con el fin de conocer certeramente el valor del parámetro β y los pesos óptimos.

2.2.4 Interpolación Multicuadrática

En esta técnica la influencia de cada estación de medición se representa por superficies cuadradas de conos como funciones de coordenadas (Escalante, 2013).

Para la solución de este método se requiere la matriz de distancias entre estaciones

conocidas $\begin{bmatrix} d_{ij} \end{bmatrix}$ y su inversa $\begin{bmatrix} d_{ij} \end{bmatrix}^{-1}$, y el vector de distancias entre el sitio de interés

“e” y las estaciones vecinas $\left[d_{ej} \right]$, ecuación (2.2); los factores de peso ω_j se calcularán con la ecuación (2.15), la suma de estos para las n estaciones en estudio deberá ser igual a uno, si esto no se cumple se desecha la técnica.

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & \cdots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & \cdots & d_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & d_{n3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\omega_j = \left[d_{ij} \right] \left[d_{ej} \right] \quad (2.15)$$

Donde:

$\left[d_{ij} \right]$ Matriz de distancias entre las estaciones j de orden $n \times n$

$\left[d_{ej} \right]$ Vector de distancias entre el sitio de interés “e” y las estaciones j

ω_j Factores de peso para el sitio j

2.2.5 Interpolación Óptima

Para aplicar esta técnica se requiere información de la variable a modelar ya que con esto, se obtendrá la estructura de correlación espacial entre las variables (Escalante, 2013).

$$\left[\rho(d_{ij}) \right] = \left| \frac{1}{k-1} \frac{\sum_{t=1}^k \left(P_i^t - \bar{m}_i \right) \left(P_j^t - \bar{m}_j \right)}{\hat{S}_i \hat{S}_j} \right| \quad (2.16)$$

Donde:

$\left[\rho(d_{ij}) \right]$ Matriz de correlación espacial real entre las estaciones j de orden $n \times n$

P_i^t, P_j^t Valor del proceso registrado en los sitios i, j en el tiempo t

\bar{m}_i, \bar{m}_j Valor promedio del proceso registrado en los sitios i, j

\hat{S}_i, \hat{S}_j Valor de la desviación estándar para el proceso registrado en los sitios i, j

k Longitud del registro

Los estimadores de la correlación espacial $\hat{\rho}(d_{ij})$ deben inferirse del mejor modelo de correlación espacial que se obtiene de entre $\frac{n(n-1)}{2}$ pares de estaciones y la distancia entre ellas. Estos modelos podrán ser (Escalante, 2013):

Modelo inverso

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \frac{d_{ij}}{c}} \quad (2.17)$$

Donde:

$\rho(d_{ij})$ Vector de correlación espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

c Constante de ajuste del modelo inverso

Modelo de potencia inversa

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{\left(1 + \frac{d_{ij}}{c}\right)^a} \quad (2.18)$$

Donde:

$\rho(d_{ij})$ Vector de correlación espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a, c Constantes de ajuste del modelo de potencia inversa

Modelo exponencial

$$\rho(d_{ij}) = e^{-d_{ij}/c} \quad (2.19)$$

Donde:

$\rho(d_{ij})$ Vector de correlación espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

c Constante de ajuste del modelo exponencial

Se obtendrá la matriz de correlación espacial real, $\left[\rho(d_{ij}) \right]$, de la variable en estudio

para convertirla en un vector de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$ asociado a un vector de distancias d_{ij}

de la misma extensión, garantizando con esto que no existan valores de correlaciones y distancias repetidos. Dichas correlaciones se ajustan a los diferentes modelos de correlación espacial por la técnica de mínimos cuadrados para inferir las constantes con las que se calcularán las correlaciones espaciales estimadas asociadas al vector de distancias d_{ij} , y haciendo uso del coeficiente de determinación, ecuación (2.20), se

elegirá el mejor modelo de ajuste, que es el que arroje mayor R^2 , con él que se determinarán la matriz y el vector de correlaciones estimadas utilizadas en la ecuación (2.21).

Es importante tomar en cuenta que para realizar los ajustes a los modelos de correlación espacial las variables $\rho(d_{ij})$ y d_{ij} están dadas en un vector y para estimar las correlaciones espaciales se utilizan matrices.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^d \left(\rho(d_{ij})_i - \overline{\rho(d_{ij})} \right) - \left(\hat{\rho}(d_{ij})_i - \overline{\hat{\rho}(d_{ij})} \right) \right]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^d \left(\rho(d_{ij})_i - \overline{\rho(d_{ij})} \right)^2 * \sum_{i=1}^d \left(\hat{\rho}(d_{ij})_i - \overline{\hat{\rho}(d_{ij})} \right)^2}} \quad (2.20)$$

Donde:

R^2 Coeficiente de determinación

$\rho(d_{ij})_i$ Vector de correlación espacial real entre las estaciones j de longitud

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$\overline{\rho(d_{ij})}$ Valor promedio del vector de correlación espacial real

$\hat{\rho}(d_{ij})_i$ Vector de correlación espacial estimado entre las estaciones j de longitud

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$\overline{\hat{\rho}(d_{ij})}$ Valor promedio del vector de correlación espacial estimado

d Longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

Los factores de peso se obtienen con la ecuación (2.21):

$$\omega_j = \left[\hat{\rho}(d_{ij}) \right]^{-1} \left[\hat{\rho}(d_{ej}) \right] \quad (2.21)$$

Donde:

ω_j Factores de peso para el sitio j

$\left[\hat{\rho}(d_{ij}) \right]^{-1}$ Inverso de la matriz de correlación espacial estimada, con el mejor modelo, entre las estaciones j de orden $n \times n$

$\left[\hat{\rho}(d_{ej}) \right]$ Vector de correlación espacial estimada, con el mejor modelo, entre el sitio de interés “e” y las estaciones j

Si la suma de los factores de peso es diferente de uno, estos se deben recalcular utilizando el multiplicador de Lagrange.

$$\left[\hat{\rho}(d_{ij}) \right] = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\rho}(d_{12}) & \hat{\rho}(d_{13}) & \cdots & \hat{\rho}(d_{1n}) & 1 \\ \hat{\rho}(d_{21}) & 1 & \hat{\rho}(d_{23}) & \cdots & \hat{\rho}(d_{2n}) & 1 \\ \hat{\rho}(d_{31}) & \hat{\rho}(d_{32}) & 1 & \cdots & \hat{\rho}(d_{3n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & 1 \\ \hat{\rho}(d_{n1}) & \hat{\rho}(d_{n2}) & \hat{\rho}(d_{n3}) & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\left[\hat{\rho}(d_{ej}) \right] = \begin{bmatrix} \hat{\rho}(d_{e1}) \\ \hat{\rho}(d_{e2}) \\ \hat{\rho}(d_{e3}) \\ \vdots \\ \hat{\rho}(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\omega_j = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \vdots \\ \omega_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Donde:

$\left[\hat{\rho}(d_{ij}) \right]$ Matriz de correlación espacial estimada, con el mejor modelo, entre las estaciones j de orden $n \times n$

$\left[\hat{\rho}(d_{ej}) \right]$ Vector de correlación espacial estimada, con el mejor modelo, entre el sitio de interés “ e ” y las estaciones j

w_j Factores de peso para el sitio j

Para comprobar que la suma de los factores de peso sea igual a uno el último valor que corresponde al multiplicador de Lagrange no se considera.

2.2.6 Método de Kriging

Este método es similar a la interpolación óptima, excepto que la función de correlación espacial se reemplaza por el semivariograma espacial. Como en el caso de la interpolación óptima, se requiere información de la variable a modelar además de que las series sean estacionarias de segundo orden; en la media, varianza y covarianza (Escalante, 2013).

El semivariograma real es estimado por:

$$\left[\gamma(d_{ij}) \right] = \left| \frac{1}{2k} \sum_{t=1}^k \left[\left(P_i^t - \bar{m}_i \right) - \left(P_j^t - \bar{m}_j \right) \right]^2 \right| \quad (2.25)$$

Donde:

$\left[\gamma(d_{ij}) \right]$ Matriz de semivariograma espacial real entre las estaciones j de orden $n \times n$

P_i^t, P_j^t Valor del proceso registrado en los sitios i, j en el tiempo t

\bar{m}_i, \bar{m}_j Valor promedio del proceso registrado en los sitios i, j

k Longitud del registro

Los semivariogramas espaciales estimados $\hat{\gamma}(d_{ij})$ deben obtenerse con el mejor modelo inferido de entre $\frac{n(n-1)}{2}$ pares de estaciones y la distancia entre ellas. Estos modelos pueden ser (Escalante, 2013):

Modelo Lineal

$$\gamma(d_{ij}) = a(d_{ij}) \tag{2.26}$$

Donde:

$\gamma(d_{ij})$ Vector del semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a Constante de ajuste del modelo lineal

Modelo Monómico

$$\gamma(d_{ij}) = a(d_{ij})^b \tag{2.27}$$

Donde:

$\gamma(d_{ij})$ Vector del semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a, b Constantes de ajuste del modelo monómico

Exponencial

$$\gamma(d_{ij}) = a \left\{ 1 - \exp \left[-c(d_{ij}) \right] \right\} \quad (2.28)$$

Donde:

$\gamma(d_{ij})$ Vector del semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a, c Constantes de ajuste del modelo exponencial, para $c > 0$

Modelo Gaussiano

$$\gamma(d_{ij}) = a \left\{ 1 - \exp \left[-c(d_{ij})^2 \right] \right\} \quad (2.29)$$

Donde:

$\gamma(d_{ij})$ Vector del semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a, c Constantes de ajuste del modelo gaussiano, para $c > 0$

Modelo Esférico

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2}a \left[3 \frac{d_{ij}}{c} - \left(\frac{d_{ij}}{c} \right)^3 \right] \text{ para } d_{ij} \leq c \quad (2.30)$$

$$\gamma(d_{ij}) = a \text{ para } d_{ij} > c \quad (2.31)$$

Donde:

$\gamma(d_{ij})$ Vector del semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

d_{ij} Vector de distancias entre las estaciones j de longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

a, c Constantes de ajuste del modelo esférico, para $c > 0$

El algoritmo para aplicar esta técnica es similar al de la interpolación óptima; haciendo uso del coeficiente de determinación, ecuación (2.32), se elige el mejor modelo de ajuste con él que se inferirán la matriz y el vector del semivariograma espacial estimados utilizados en la ecuación (2.33).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^d \left(\gamma(d_{ij})_i - \overline{\gamma(d_{ij})} \right) - \left(\hat{\gamma}(d_{ij})_i - \overline{\hat{\gamma}(d_{ij})} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^d \left(\gamma(d_{ij})_i - \overline{\gamma(d_{ij})} \right)^2 * \sum_{i=1}^d \left(\hat{\gamma}(d_{ij})_i - \overline{\hat{\gamma}(d_{ij})} \right)^2}} \right]^2 \quad (2.32)$$

Donde:

R^2 Coeficiente de determinación

$\gamma(d_{ij})_i$ Vector de semivariograma espacial real entre las estaciones j de longitud

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$\overline{\gamma(d_{ij})}$ Valor promedio del vector de semivariograma espacial real

$\hat{\gamma}(d_{ij})_i$ Vector de semivariograma espacial estimado entre las estaciones j de

longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

$\overline{\hat{\gamma}(d_{ij})}$ Valor promedio del vector de semivariograma espacial estimado

d Longitud $\frac{n(n-1)}{2}$

Los factores de peso se obtienen como:

$$\omega_j = \left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]^{-1} \left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right] \quad (2.33)$$

Donde:

ω_j Factores de peso para el sitio j

$\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]^{-1}$ Inverso de la matriz de semivariograma espacial estimado, con el mejor modelo, entre las estaciones j de orden $n \times n$

$\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right]$ Vector de semivariograma espacial estimado, con el mejor modelo, entre el sitio de interés “ e ” y las estaciones j

Si la suma de los factores de peso es diferente de uno se utilizan los métodos siguientes:

2.2.6.1 Método de Krigin Ordinario

En este método solo se aplica el multiplicador de Lagrange a la matriz de semivariograma espacial estimado entre las estaciones j , $\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]$, y al vector de semivariograma espacial estimado entre el sitio de interés “ e ” y las estaciones j , $\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right]$, obtenidas con el método de Kriging y los factores de peso se estiman con la ecuación (2.33).

$$\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right] = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\gamma}(d_{12}) & \hat{\gamma}(d_{13}) & \cdots & \hat{\gamma}(d_{1n}) & 1 \\ \hat{\gamma}(d_{21}) & 0 & \hat{\gamma}(d_{23}) & \cdots & \hat{\gamma}(d_{2n}) & 1 \\ \hat{\gamma}(d_{31}) & \hat{\gamma}(d_{32}) & 0 & \cdots & \hat{\gamma}(d_{3n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & 1 \\ \hat{\gamma}(d_{n1}) & \hat{\gamma}(d_{n2}) & \hat{\gamma}(d_{n3}) & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right] = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}(d_{e1}) \\ \hat{\gamma}(d_{e2}) \\ \hat{\gamma}(d_{e3}) \\ \vdots \\ \hat{\gamma}(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\omega_j = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \vdots \\ \omega_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Donde:

ω_j Factores de peso para el sitio j

$\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]$ Matriz de semivariograma espacial estimado

$\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right]$ Vector de semivariograma espacial estimado

Para comprobar que la suma de los factores de peso sea igual a uno el último valor que corresponde al multiplicador de Lagrange no se considera.

2.2.6.2 Método de Kriging Universal

Al aplicar este método se pueden utilizar dos aproximaciones en función del número de sitios n a interpolar mismos que se mencionaron en el subcapítulo 2.2.2, Método de la Interpolación Polinomial.

A la matriz de semivariograma espacial estimado entre las estaciones j , $\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]$, y al

vector de semivariograma espacial estimado entre el sitio de interés “ e ” y las estaciones j , $\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right]$, obtenidos con el método de Kriging se adiciona la matriz de monomios

$\left[\phi_{ij} \right]$, inferida con el método de la interpolación polinomial, tal como se muestra en las

ecuaciones (2.37) y (2.38); los factores de peso se estiman con la ecuación (2.33).

$$\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right] = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\gamma}(d_{12}) & \hat{\gamma}(d_{13}) & \dots & \hat{\gamma}(d_{1n}) & 1 & \phi_{11} & \phi_{21} & \phi_{31} & \dots & \phi_{m1} \\ \hat{\gamma}(d_{21}) & 0 & \hat{\gamma}(d_{23}) & \dots & \hat{\gamma}(d_{2n}) & 1 & \phi_{12} & \phi_{22} & \phi_{32} & \dots & \phi_{m2} \\ \hat{\gamma}(d_{31}) & \hat{\gamma}(d_{32}) & 0 & \dots & \hat{\gamma}(d_{3n}) & 1 & \phi_{13} & \phi_{23} & \phi_{33} & \dots & \phi_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{\gamma}(d_{n1}) & \hat{\gamma}(d_{n2}) & \hat{\gamma}(d_{n3}) & \dots & 0 & 1 & \phi_{1n} & \phi_{2n} & \phi_{3n} & \dots & \phi_{mn} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \dots & \phi_{1n} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \dots & \phi_{2n} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & \dots & \phi_{3n} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \phi_{m3} & \dots & \phi_{mn} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Donde:

$\left[\hat{\gamma}(d_{ij}) \right]$ Matriz de semivariograma espacial estimado

ϕ_{mn} Coeficientes de la matriz de monomios cuadrada de $m \times m$ de los sitios j

$$\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right] = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}(d_{e1}) \\ \hat{\gamma}(d_{e2}) \\ \hat{\gamma}(d_{e3}) \\ \vdots \\ \hat{\gamma}(d_{en}) \\ 1 \\ \phi_{e1} \\ \phi_{e2} \\ \phi_{e3} \\ \vdots \\ \phi_{em} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Donde:

$\left[\hat{\gamma}(d_{ej}) \right]$ Vector de semivariograma espacial estimado

$\left[\phi_{em} \right]$ Coeficientes del vector de monomios del sitio interés “e”

Cabe recordar que para comprobar que la suma de los factores pesos sea igual a uno solo se deben sumar los primeros n valores, ya que los demás corresponden a los asociados con los monomios.

2.2.7 Técnica de regresión Lineal

Cuando una muestra requiere ser aumentada puede realizarse mediante las técnicas de interpolación antes vistas o mediante una técnica de regresión lineal. Para esto, se deberá contar con dos series que sean altamente dependientes en el espacio, esto es $|r| \approx 1$, donde r es el coeficiente de correlación entre registros (Escalante, 2013).

$$r_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{S_x S_y} = \frac{\sum_{t=1}^m (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^m (x_t - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{t=1}^m (y_t - \bar{y})^2}} \quad (2.39)$$

Donde:

- $r_{x,y}$ Coeficiente de correlación entre los registros x, y
- x_t, y_t Valor del proceso registrado en los sitios x, y en el tiempo t
- \bar{x}, \bar{y} Valor promedio del proceso registrado en los sitios x, y
- m Longitud del registro

Si:

$$|r| = \frac{u_{1-\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{n}} \quad (2.40)$$

Donde:

- $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ Es el $1-\frac{\alpha}{2}$ cuantil de la Distribución Normal Estándar

Se dice que las series son independientes y por lo tanto, no se pueden utilizar para extender los registros.

Las técnicas de ajuste de distribuciones de probabilidad hacen uso de la Distribución Normal y se sabe que los valores de los estadísticos muestrales coeficiente de asimetría y curtosis que la definen son:

$$g \approx 0$$

$$k = 3$$

En la Tabla 2.6 se muestran los valores del coeficiente de asimetría para muestras pequeñas, $m < 175$, con el que se puede considerar que una serie es normal dependiendo de su longitud de registro m .

m	g	m	g
25	0.711	70	0.459
30	0.662	80	0.432
35	0.621	90	0.409
40	0.587	100	0.389
45	0.558	125	0.35
50	0.534	150	0.321
60	0.492	175	0.298

Tabla 2.6. Valores del coeficiente de asimetría para muestras pequeñas (Escalante, 2013).

2.3 Datos Hidrométricos

La República Mexicana está constituida por una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, en la que destacan cincuenta ríos principales, Figura 2.18, por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país (CONAGUA, 2012b).

Dada la importancia de dicho escurrimiento es indispensable conocer su comportamiento, ya que para la correcta planeación y diseño de los aprovechamientos hidráulicos futuros se debe contar con información suficiente y de calidad que permita hacer los análisis adecuados.

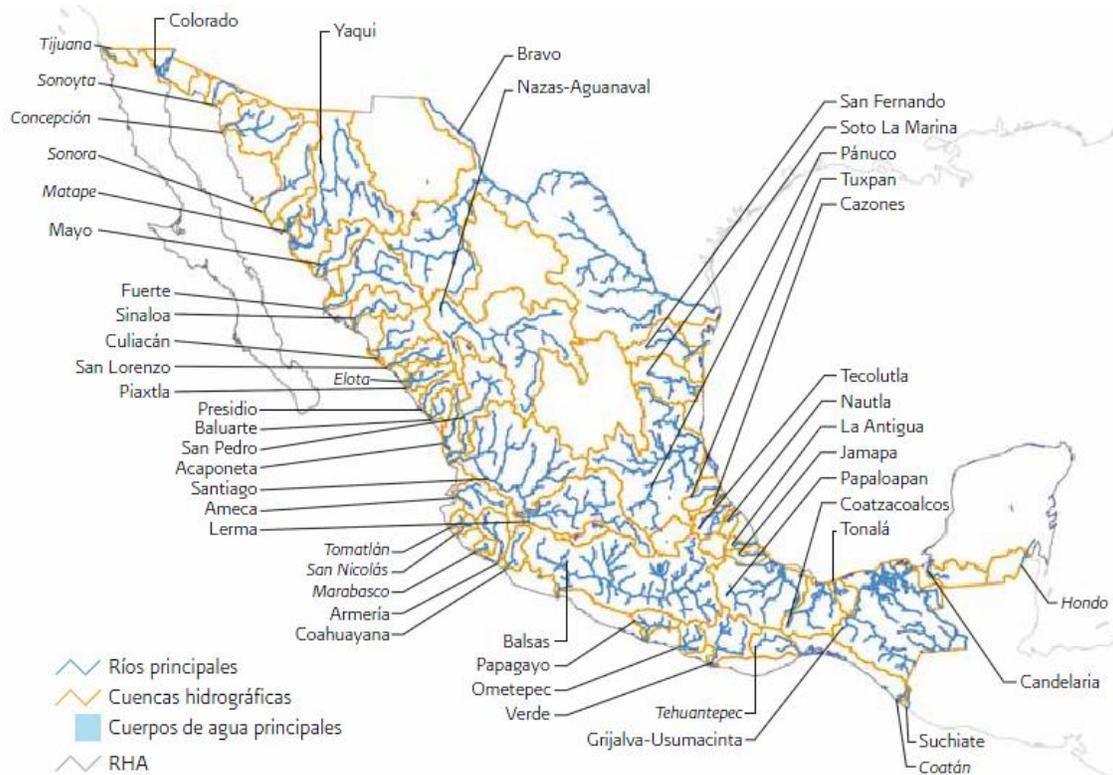


Figura 2.18. Ríos principales con sus cuentas hidrográficas. Nota: los ríos con nombres en cursiva tienen un escurrimiento medio anual superficial menor a 1km^3 . (CONAGUA, 2012b).

Debido a esto la CONAGUA administra la red hidrométrica en México donde se registra el nivel de agua (escalas), la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en ríos, canales y el almacenamiento en presas; estos datos nos ayudan a conocer la cantidad, disponibilidad del recurso y su distribución entre usuarios, esta información es generada por los Organismos de Cuenca y las Direcciones Locales.

2.3.1 Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)

Los datos de la red hidrométrica nacional, Figura 2.19, utilizados en los diseños de aprovechamientos hidráulicos se pueden obtener del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) emitido por la CONAGUA a través del IMTA.

Existe una incongruencia acerca de la cantidad de estaciones hidrométricas instaladas en el país; según el Atlas Digital del Agua (CONAGUA, 2012a) existen 368, la página web BANDAS (CONAGUA, 2013c) menciona la existencia de 2,070, el catálogo presentado en IMTA (CONAGUA, 2013b) cuenta con el registro de 2,314 y el incluido en CONAGUA

(2013b) señala 2,248. Esta diferencia hace difícil el conocimiento exacto de la cantidad de estaciones en funcionamiento.

Trabajando con lo presentado en el archivo BANDAS, se tienen los registros históricos de las estaciones ubicadas en los principales ríos de la República Mexicana además de contar con los registros de aproximadamente 180 presas (CONAGUA, 2013c).

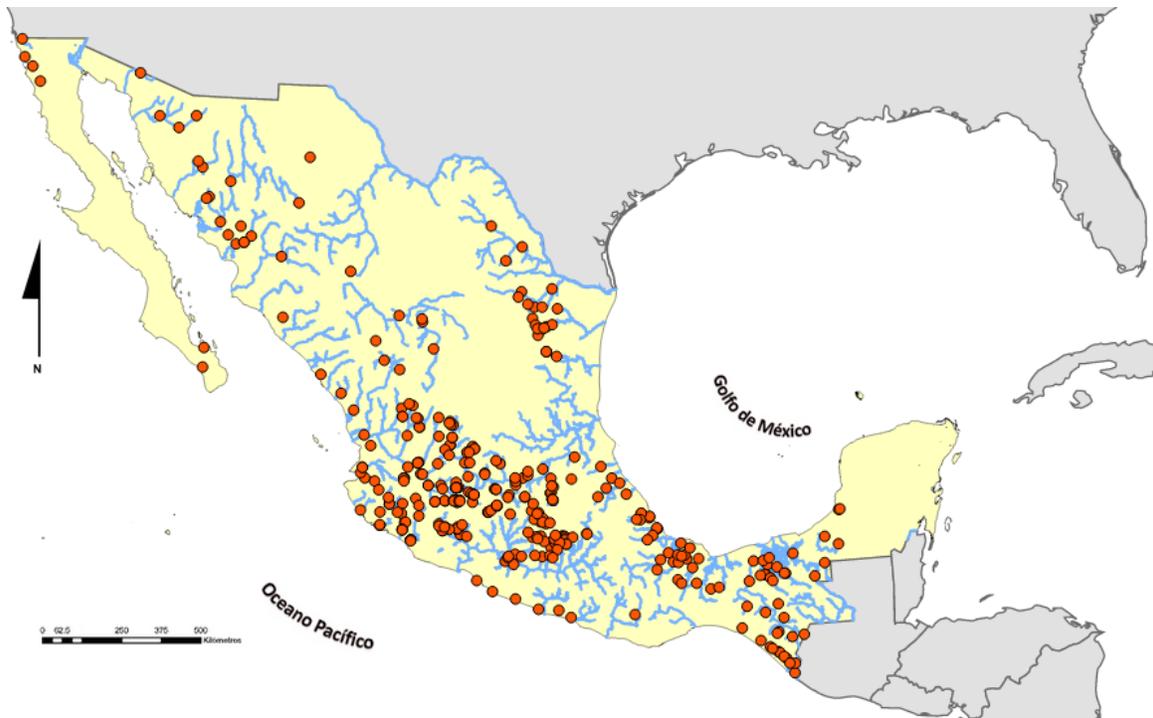


Figura 2.19. Estaciones hidrométricas en la República Mexicana. (CONAGUA, 2012a).

Al abrir la base de datos se presenta un inventario de estaciones hidrométricas en formato de Microsoft Excel donde aparece la siguiente información por estación:

- Clave de la estación;
- Período de datos registrados;
- Nombre de la estación;
- Nombre de la corriente a la que pertenece la estación;
- Nombre de la cuenca a la que pertenece la estación;
- Nombre del estado a la que pertenece la estación;
- Región hidrológica a la que pertenece la estación;
- Descripción de la estación;

- Coordenadas [G,M,S];
- Descripción de la corriente;
- Nombre del colector general;
- Nombre del afluente;
- Nombre del canal;
- Nombre de la corriente;
- Nombre del subafluente.

De manera análoga la información presentada en el inventario de las estaciones ubicadas en los vasos de las presas de la República Mexicana es:

- Clave de la estación hidrométrica;
- Periodo registrado de datos;
- Nombre del almacenamiento;
- Nombre de la presa en la que se ubica;
- Región hidrológica;
- Nombre del colector general;
- Nombre del afluente;
- Nombre del subafluente.
- Nombre de la Obra;
- Nombre de la estación;
- Nombre de la corriente;
- Área drenada [Ha];
- Coordenadas [G,M,S];
- Elevación de la cresta del vertedor [m];*
- Capacidad de la cresta del vertedor [Mm³];
- Área de embalse de la cresta del vertedor [Ha];
- Elevación del nivel de aguas máximas [m];*
- Capacidad al nivel de aguas máximas [Mm³];
- Área de embalse del nivel de aguas máximas [Ha];
- Elevación de la corona de la cortina [m];*
- Capacidad de la corona de la cortina [Mm³];
- Área de embalse de la corona de la cortina [Ha];
- Elevación del nivel de aguas máximas extraordinarias [m];*

- Capacidad al nivel de aguas máximas extraordinarias [Mm³];
- Área de embalse del nivel de aguas máximas extraordinarias [Ha];
- Elevación del nivel de aguas mínimas normal [m];*
- Capacidad al nivel de aguas mínimas normal [Mm³];
- Área de embalse del nivel de aguas mínimas para generación [Ha].

*Nota: No está especificado si el valor es respecto al nivel del mar o la coordenada cero de la obra.

También es posible acceder a un fichero que contiene información de cada estación hidrométrica en formato de texto donde se describen los puntos siguientes:

1. Nombre de la estación
2. Clave hidrométrica larga
3. Características geográficas
 - 3.1. Hidrografía
 - 3.1.1. Colector general
 - 3.1.2. Afluente
 - 3.1.3. Subafluente
 - 3.1.4. Canal, si es el caso;
 - 3.1.5. Estación
 - 3.1.6. Corriente
 - 3.1.7. Descripción de la corriente
 - 3.2. Área drenada [km²]
 - 3.3. Coordenadas [G,M,S]
 - 3.4. Ubicación
 - 3.5. Accesos
4. Objeto de su instalación
5. Características del cauce, estructuras, aparatos y observaciones
 - 5.1. Condiciones del tramo
 - 5.2. Sección de aforos
 - 5.3. Escala
 - 5.4. Estructura de aforos
 - 5.5. Aforos
 - 5.6. Registro de niveles

- 5.7. Sólidos en suspensión
- 6. Gastos extremos en el periodo de observaciones
 - Gasto máximo [m³/s]
 - Fecha del gasto máximo
 - Lectura [m] del gasto máximo
 - Notas del gasto máximo
 - Gasto máximo aforado [m³/s]
 - Fecha del gasto máximo aforado
 - Lectura [m] del gasto máximo aforado
 - Notas del gasto máximo aforado
 - Velocidad media [m/s]
 - Profundidad máxima [m]
 - Gasto mínimo [m³/s]
 - Fecha del gasto mínimo
 - Lectura [m] del gasto mínimo
 - Notas del gasto mínimo
- 7. Calculo hidrométrico
- 8. Estación climatológica en el sitio
- 9. Notas

Los archivos históricos se presentan en formatos DBF y MDB que corresponden y son visibles desde Visual Fox Pro y Microsoft Access respectivamente (CONAGUA, 2013). A continuación se describe la estructura de cada uno de ellos:

2.3.1.1 Archivos históricos de hidrometría

Para cada estación perteneciente a la red hidrométrica se generan seis archivos con la información descrita en la Tabla 2.7, para la mayoría de las estaciones se presentan únicamente los primeros tres archivos y en algunos casos existen archivos con extensión INT en los que se adicionan cálculos intermedios que fueron necesarios para generar los datos históricos definitivos.

Nombre	Contenido
DDXXXXX.ZZZ	Gastos medios diarios [m ³ /s]
DMXXXXX.ZZZ	Datos hidrométricos mensuales [m ³ /s]
DAXXXXX.ZZZ	Datos hidrométricos anuales [m ³ /s]
HDXXXXX.ZZZ	Gastos instantáneos (hidrograma) [m ³ /s]
STXXXXX.ZZZ	Sedimentos (Sedimentograma) [%]
LIXXXXX.ZZZ	Lecturas de escala (limnigrama) [m]
ICGXXXXX.ZZZ	Identificación de curvas de gasto
DCGXXXXX.ZZZ	Detalle de curvas de gasto

Tabla 2.7. Archivos históricos de hidrometría. (CONAGUA, 2013).

La nomenclatura XXXXX indica la clave de estación y ZZZ el formato en que se presentan los datos. A continuación se describe la estructura de cada uno de los archivos:

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año
PK_MES	Numérico	Mes
CGASTO_D01	Numérico	Gasto medio diario día 3 [m ³ /s]
CGASTO_D02	Numérico	Gasto medio diario día 4 [m ³ /s]
CGASTO_D03	Numérico	Gasto medio diario día 5 [m ³ /s]
⋮	⋮	⋮
CGASTO_D31	Numérico	Gasto medio diario día 31 [m ³ /s]

Tabla 2.8. Estructura del archivo DDXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año
PK_MES	Numérico	Mes
CGASTO_MXM	Numérico	Gasto máximo en el mes [m ³ /s]
CDIA_GMXM	Numérico	Día en que ocurre el gasto máximo
CHORA_GMXM	Numérico	Hora en que ocurre el gasto máximo
CLECT_GMXM	Numérico	Lectura de escala para gasto máximo [m]
CGASTO_MIM	Numérico	Gasto mínimo en el mes [m ³ /s]

Tabla 2.9. Estructura del archivo DMXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
CDIA_GMIM	Numérico	Día en que ocurre el gasto mínimo
CHORA_GMIM	Numérico	Hora en que ocurre el gasto mínimo
CLECT_GMIM	Numérico	Lectura de escala para gasto mínimo [m]
CLECT_MXM	Numérico	Lectura de escala máxima en el mes
CDIA_LMXM	Numérico	Día de lectura de escala máxima
CHORA_LMXM	Numérico	Hora de lectura de escala máxima
CLECT_MIM	Numérico	Lectura de escala mínima en el mes [m]
CDIA_LMIM	Numérico	Día de lectura de escala mínima
CHORA_LMIM	Numérico	Hora de lectura de escala mínima
CVOLUM_ESC	Numérico	Volumen mensual de escurrimiento [miles de m ³]
CGASTO_MED	Numérico	Gasto medio mensual [m ³ /s]
CVOLUM_SED	Numérico	Volumen mensual de sedimentos [miles de m ³]

Tabla 2.9. Estructura del archivo DMXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013). Continuación.

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año
NGASTO_MXA	Numérico	Gasto máximo en el año [m ³ /s]
CFE_GAMAX	Carácter	Mes, día, hora en que ocurre el gasto máximo
NLECT_GMXA	Numérico	Lectura de escala para gasto máximo [m]
NGASTO_MIA	Numérico	Gasto mínimo en el año [m ³ /s]
CFE_GAMIN	Carácter	Mes, día, hora en que ocurre el gasto mínimo
NLECT_GMIA	Numérico	Lectura de escala para gasto mínimo [m]
NLECT_MXA	Numérico	Lectura de escala máxima en el año [m]
CFE_LEMAX	Carácter	Mes, día, hora en que ocurre escala máxima
NLECT_MIA	Numérico	Lectura de escala mínima en el año [m]
CFE_LEMIN	Carácter	Mes, día, hora en que ocurre escala mínima
NVOLUM_ESC	Numérico	Volumen anual de escurrimiento [miles de m ³]
NGASTO_MED	Numérico	Gasto medio anual [m ³ /s]
NVOLUM_SED	Numérico	Volumen anual de sedimentos [miles de m ³]

Tabla 2.10. Estructura del archivo DAXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_FECHA	Fecha	Fecha en que ocurre el gasto
PK_HORA	Numérico	Hora en que ocurre el gasto
NGASTO	Numérico	Gasto instantáneo [m ³ /s]

Tabla 2.11. Estructura del archivo HDXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_FECHA	Fecha	Fecha de lectura
PK_HORA	Numérico	Hora de lectura
NPOR_SEDIM	Numérico	Porcentaje de sedimento

Tabla 2.12. Estructura del archivo STXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_FECHA	Fecha	Fecha de lectura
PK_HORA	Numérico	Hora de lectura
NLECT_ESCA	Numérico	Lectura de escala [m]

Tabla 2.13. Estructura del archivo LIXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PKID_CURVA	Carácter	Identificación de curva
FE_INI_CUR	Fecha	Fecha de inicio de curva
HR_INI_CUR	Numérico	Hora de inicio de curva
FE_TER_CUR	Fecha	Fecha de término de curva
HR_TER_CUR	Numérico	Hora de término de curva

Tabla 2.14. Estructura del archivo DCGXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PKID_CURVA	Carácter	Identificación de curva
NSECUR_PTO	Numérico	Secuencia del punto
CLECTURA	Numérico	Lectura de escala [m]
CGASTO	Numérico	Gasto [m ³ /s]

Tabla 2.15. Estructura del archivo ICGXXXXX.ZZZ. (CONAGUA, 2013).

2.3.1.2 Archivos históricos de presas

En las estaciones hidrométricas localizadas en los vasos de almacenamiento se generan cinco archivos con información del régimen de funcionamiento los cuales están descritos en la Tabla 2.16.

Nombre	Contenido
FDYYYYYY.NNN	Gastos medios diarios [m ³ /s]
FMYYYYYY.NNN	Gastos, volúmenes y lecturas de escala extremos mensuales
FHYYYYYY.NNN	Datos horarios
FSYYYYYY.NNN	Datos especiales de vasos de almacenamiento
FPYYYYYY.NNN	Características del registro en el vaso

Tabla 2.16. Archivos históricos de presas. (CONAGUA, 2013).

La nomenclatura YYYYYY indica la clave de estación y NNN el formato en que se presentan los datos. A continuación se describe la estructura de cada uno de los archivos:

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año de registro
PK_MES	Numérico	Mes de registro
PK_CPTO	Carácter	Clave de concepto*
NDATO_D01	Numérico	Dato del concepto día 1
NDATO_D02	Numérico	Dato del concepto día 2
NDATO_D03	Numérico	Dato del concepto día 3
:	:	:
NDATO_D31	Numérico	Dato del concepto día 31.

Tabla 2.17. Estructura del archivo FDYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año de registro
PK_MES	Numérico	Mes de registro
NLLUV_MIN	Numérico	Lluvia mínima (diario) [mm]
NLLUV_MAX	Numérico	Lluvia máxima (diario) [mm]
NLLUV_TOT	Numérico	Lluvia total mensual [mm]
NDIA_LLMIN	Carácter	Día de lluvia mínima
NDIA_LLMAX	Carácter	Día de lluvia máxima
NEVAP_MIN	Numérico	Evaporación mínima [mm]

Tabla 2.18. Estructura del archivo FMYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
NEVAP_MAX	Numérico	Evaporación máxima [mm]
NEVAP_TOT	Numérico	Evaporación total mensual [mm]
NDIA_EVMIN	Carácter	Día de evaporación mínima
NDIA_EVMAX	Carácter	Día de evaporación máxima
NELEV_MIN	Numérico	Elevación mínima (d-h) [m]
NELEV_MAX	Numérico	Elevación máxima (d-h) [m]
NELEV_SUM	Numérico	Suma de elevaciones diarias [m]
NDIA_ELMIN	Carácter	Día de elevación mínima
NDIA_ELMAX	Carácter	Día de elevación máxima
NHR_ELMIN	Carácter	Hora de elevación mínima
NHR_ELMAX	Carácter	Hora de elevación máxima
NAREA_MIN	Numérico	Área de embalse mínima (d) [Ha]
NAREA_MAX	Numérico	Área de embalse máximo (d) [Ha]
NAREA_SUM	Numérico	Suma de áreas diarias [Ha]
NDIA_EMMIN	Carácter	Día de área embalse mínimo
NDIA_EMMAX	Carácter	Día de área embalse máximo
NALMA_MIN	Numérico	Almacenamiento mínimo (d-h) [miles de m ³]
NALMA_MAX	Numérico	Almacenamiento máximo (d-h) [miles de m ³]
NALMA_SUM	Numérico	Suma de almacenamientos diarios [miles de m ³]
NDIA_ALMIN	Carácter	Día de almacenamiento mínimo
NDIA_ALMAX	Carácter	Día de almacenamiento máximo
NHR_ALMIN	Carácter	Hora de almacenamiento mínimo
NHR_ALMAX	Carácter	Hora de almacenamiento máximo
NINCR_MIN	Numérico	Incremento de almacenamiento mínimo (d) [miles de m ³]
NINCR_MAX	Numérico	Incremento de almacenamiento máximo (d) [miles de m ³]
NINCR_SUM	Numérico	Suma de incremento de almacenamiento diario [miles de m ³]
NDIA_INMIN	Carácter	Día de incremento de almacenamiento mínimo
NDIA_INMAX	Carácter	Día de incremento de almacenamiento máximo
NVLLUV_MIN	Numérico	Volumen de lluvia mínimo diario [miles de m ³]
NVLLUV_MAX	Numérico	Volumen de lluvia máximo diario [miles de m ³]
NVLLUV_TOT	Numérico	Volumen de lluvia mensual [miles de m ³]
NENTRR_MIN	Numérico	Volumen de entradas por ríos mínimo (d) [miles de m ³]
NENTRR_MAX	Numérico	Volumen de entradas por ríos máximo (d) [miles de m ³]
NENTRR_TOT	Numérico	Volumen de entradas por ríos mensual [miles de m ³]
NDIA_VORMI	Carácter	Día del volumen de entrada por ríos mínimo
NDIA_VORMA	Carácter	Día del volumen de entrada por ríos máximo

Tabla 2.18. Estructura del archivo FMYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013). Continuación.

Campo	Tipo	Descripción
NENTRT_MIN	Numérico	Volumen de entradas totales mínima (d) [miles de m ³]
NENTRT_MAX	Numérico	Volumen de entradas totales máxima (d) [miles de m ³]
NENTRT_TOT	Numérico	Volumen de entradas totales mensual [miles de m ³]
NDIA_VOEMI	Carácter	Día del volumen de entrada total mínima
NDIA_VOEMA	Carácter	Día del volumen de entrada total máxima
NTOMAS_MIN	Numérico	Volumen de tomas mínimo (d) [miles de m ³]
NTOMAS_MAX	Numérico	Volumen de tomas máximo (d) [miles de m ³]
NTOMAS_TOT	Numérico	Volumen de tomas mensual [miles de m ³]
NDIA_VOTMI	Carácter	Día de volumen de tomas mínima
NDIA_VOTMA	Carácter	Día de volumen de tomas máxima
NDESF_MIN	Numérico	Desfogues mínimos (d) [miles de m ³]
NDESF_MAX	Numérico	Desfogues máximos (d) [miles de m ³].
NDESF_TOT	Numérico	Desfogues mensuales [miles de m ³]
NDIA_DEMIN	Carácter	Día del desfogue mínimo
NDIA_DEMAX	Carácter	Día del desfogue máximo
NFILTR_MIN	Numérico	Filtraciones mínimas (d) [miles de m ³]
NFILTR_MAX	Numérico	Filtraciones máximas (d) [miles de m ³]
NFILTR_TOT	Numérico	Filtraciones mensuales [miles de m ³]
NDIA_FLMIN	Carácter	Día de filtraciones mínima
NDIA_FLMAX	Carácter	Día de filtraciones máximo
NDERR_MIN	Numérico	Derrames (vol.) mínimo (d) [miles de m ³]
NDERR_MAX	Numérico	Derrames (vol.) máximo (d) [miles de m ³]
NDERR_TOT	Numérico	Derrames mensuales [miles de m ³]
NDIA_VDMIN	Carácter	Día de volumen derramado mínimo
NDIA_VDMAX	Carácter	Día de volumen derramado máximo
NVEVAP_MIN	Numérico	Volumen evaporado mínimo (d) [miles de m ³]
NVEVAP_MAX	Numérico	Volumen evaporado máximo (d) [miles de m ³]
NVEVAP_TOT	Numérico	Volumen evaporado mensual [miles de m ³]
NSLTOT_MIN	Numérico	Salidas totales mínima (d) [miles de m ³]
NSLTOT_MAX	Numérico	Salidas totales máxima (d) [miles de m ³]
NSLTOT_TOT	Numérico	Salidas totales mensuales [miles de m ³]
NDIA_STMIN	Carácter	Día del volumen de salida total mínima
NDIA_STMAX	Carácter	Día del volumen de salida total máxima
NESNOM_MIN	Numérico	(e-s) no medidas mínimas (d) [miles de m ³]
NESNOM_MAX	Numérico	(e-s) no medidas máximas (d) [miles de m ³]
NESNOM_TOT	Numérico	(e-s) no medidas mensuales [miles de m ³]
NDIA_ESMIN	Carácter	Día de (e-s) no medidas mínima
NDIA_ESMAX	Carácter	Día de (e-s) no medidas máxima

Tabla 2.18. Estructura del archivo FMYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013). Continuación.

Campo	Tipo	Descripción
NAPORT_MIN	Numérico	Aportaciones deducidas mínimas (d) [miles de m ³]
NAPORT_MAX	Numérico	Aportaciones deducidas máximas (d) [miles de m ³]
NAPORT_TOT	Numérico	Aportaciones deducidas mensuales [miles de m ³]
NDIA_APMIN	Carácter	Día de aportaciones deducidas mínima
NDIA_APMAX	Carácter	Día de aportaciones deducidas máxima
NETOTR_MIN	Numérico	Entradas totales por ríos mínimo [miles de m ³]
NETOTR_MAX	Numérico	Entradas totales por ríos máximo [miles de m ³]
NETOTR_TOT	Numérico	Entradas totales mensuales [miles de m ³]
NDIA_ETMIN	Carácter	Día de entradas totales por ríos mínima
NDIA_ETMAX	Carácter	Día de entradas totales por ríos máxima
NENETR_MIN	Numérico	Entradas netas por ríos mínimo [miles de m ³]
NENETR_MAX	Numérico	Entradas netas por ríos máximo [miles de m ³]
NENETR_TOT	Numérico	Entradas netas por ríos mensuales [miles de m ³]
NDIA_NTMIN	Carácter	Día de entradas totales por ríos mínima
NDIA_NTMAX	Carácter	Día de entradas totales por ríos máxima
NALMA_INI	Numérico	Almacenamiento inicial del mes (d) [miles de m ³]
NQMAX_DER	Numérico	Gasto máximo derramado [m ³ /s]
NDIA_QDMAX	Carácter	Día del gasto máximo derramado

Tabla 2.18. Estructura del archivo FMYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013). Continuación.

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Numérico	Año de registro
PK_MES	Numérico	Mes de registro
PK_CPTO	Carácter	Clave de concepto*
PK_DIA	Numérico	Día de datos horarios
NDATO_8HR	Numérico	Dato horario a las 8 hrs
NDATO_9HR	Numérico	Dato horario a las 9 hrs
NDATO_10HR	Numérico	Dato horario a las 10 hrs
⋮	⋮	⋮
NDATO_24HR	Numérico	Dato horario a las 24 hrs
NDATO_1HR	Numérico	Dato horario a las 1 hrs día siguiente
NDATO_2HR	Numérico	Dato horario a las 2 hrs día siguiente
NDATO_3HR	Numérico	Dato horario a las 3 hrs día siguiente
⋮	⋮	⋮
NDATO_7HR	Numérico	Dato horario a las 7 hrs día siguiente

Tabla 2.19. Estructura del archivo FHYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
PK_ANIO	Carácter	Año de registro
PK_MES	Carácter	Mes de registro
PK_CPTO	Carácter	Clave de concepto* ('36DM')
CVE_ENT1	Carácter	Estación que mide entrada 1
CVE_ENT2	Carácter	Estación que mide entrada 2
CVE_ENT3	Carácter	Estación que mide entrada 3
⋮	⋮	⋮
CVE_ENT8	Carácter	Estación que mide entrada 8
CVE_TOMA1	Carácter	Estación que mide toma 1
NELE_INIT1	Numérico	Elevación de inicio de toma 1 [m]
NELE_FINT1	Numérico	Elevación terminal de toma 1 [m]
CVE_TOMA2	Carácter	Estación que mide toma 2
NELE_INIT2	Numérico	Elevación de inicio de toma 2 [m]
NELE_FINT2	Numérico	Elevación terminal de toma 2 [m]
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
CVE_TOMA8	Carácter	Estación que mide toma 8
NELE_INIT8	Numérico	Elevación de inicio de toma 8 [m]
NELE_FINT8	Numérico	Elevación terminal de toma 8 [m]
CVE_DESF	Carácter	Estación que mide desfogues
NELE_INIDS	Numérico	Elevación de inicio de desfogues [m]
NELE_FINDS	Numérico	Elevación terminal de desfogues [m]
CVE_DERR	Carácter	Estación que mide derrames
NELE_INIDR	Numérico	Elevación de inicio de derrames [m]
NELE_FINDR	Numérico	Elevación terminal de derrames [m]
CVE_FILT	Carácter	Estación que mide filtraciones
NELE_INIFL	Numérico	Elevación de inicio de filtraciones [m]
NELE_FINFL	Numérico	Elevación terminal de filtraciones [m]
IND_CALDER	Numérico	
CIDEN_DESC	Carácter	Identificación de la curva de descarga del vertedor
CIDEN_EAC1	Carácter	Identificación de la curva 1 de e-a-c
NDIN_EAC1	Numérico	Día de inicio de curva 1 de e-a-c
NDFIN_EAC1	Numérico	Día de término de curva 1 de e-a-c
CIDEN_EAC2	Carácter	Identificación de la curva 2 e-a-c
NDIN_EAC2	Numérico	Día de inicio de curva 2 de e-a-c
NDFIN_EAC2	Numérico	Día de término de curva 2 de e-a-c
NELEV_VER	Numérico	Elevación de la cresta vertedora [m]

Tabla 2.20. Estructura del archivo FSYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013).

Campo	Tipo	Descripción
NLONG_CRES	Numérico	Longitud de la cresta vertedora [m]
NCOEF_VERT	Numérico	Coeficiente del vertedor
NCARG_DISE	Numérico	Carga del diseño del vertedor [m]
NCOEF_EVAP	Numérico	Coeficiente de evaporación
NDINI_HR	Numérico	Día de inicio de datos horarios
NDFIN_HR	Numérico	Día de término de datos horarios

Tabla 2.20. Estructura del archivo FSYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013). Continuación.

Campo	Tipo	Descripción
PK_VASO	Carácter	Identificación del vaso
NANIO_INI	Numérico	Año inicial de registro
NMES_INI	Numérico	Mes inicial de registro
NANIO_FIN	Numérico	Año final de registro
NMES_FIN	Numérico	Mes final de registro
NMESC_OBS	Numérico	Número de meses con datos
NMESS_OBS	Numérico	Número de meses sin datos
NMESC_DER	Numérico	Número de meses con derrames
NMESC_HOR	Numérico	Número de meses con datos horarios

Tabla 2.21. Estructura del archivo FPYYYYYY.NNN. (CONAGUA, 2013).

Clave	Descripción	Unidades
01LL	Lluvia	mm
02EV	Evaporación	mm
03EL	Elevación (nivel del agua)	m
04AR	Áreas de inundación	Ha
05AL	Almacenamiento	miles de m ³
06VA	Variación de almacenamiento	miles de m ³
07VL	Volumen de lluvia	miles de m ³
08E1	Entrada hidrométrica 1	miles de m ³
09E2	Entrada hidrométrica 2	miles de m ³
10E3	Entrada hidrométrica 3	miles de m ³
11E4	Entrada hidrométrica 4	miles de m ³
12E5	Entrada hidrométrica 5	miles de m ³
13E6	Entrada hidrométrica 6	miles de m ³

Tabla 2.22. Claves registradas en los archivos históricos que indican el tipo de información que se almacena en los registros de los archivos de datos. (CONAGUA, 2013).

Clave	Descripción	Unidades
14E7	Entrada hidrométrica 7	miles de m ³
15E8	Entrada hidrométrica 8	miles de m ³
16ER	Suma de entradas por ríos	miles de m ³
17SE	Suma de entradas totales	miles de m ³
18T1	Toma 1 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
19T2	Toma 2 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
20T3	Toma 3 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
21T4	Toma 4 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
22T5	Toma 5 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
23T6	Toma 6 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
24T7	Toma 7 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
25T8	Toma 8 (Estación hidrométrica)	miles de m ³
26ST	Suma de tomas	miles de m ³
27DF	Desfogues	miles de m ³
28FT	Filtraciones	miles de m ³
29DR	Derrames	miles de m ³
30VE	Volumen de evaporación	miles de m ³
31SS	Suma de salidas totales	miles de m ³
32ES	(Entradas-Salidas) No controladas	miles de m ³
33AP	Aportaciones deducidas diarias	miles de m ³
34ET	Entradas totales por ríos	miles de m ³
35EN	Entradas netas por ríos	miles de m ³
36DM	Datos especiales mensuales	

Tabla 2.22. Claves registradas en los archivos históricos que indican el tipo de información que se almacena en los registros de los archivos de datos. (CONAGUA, 2013).

2.4 Técnicas de normalización para datos hidrométricos

Para rellenar una serie de gastos ya sean medios diarios, mensuales o anuales, es necesario hacer uso de una técnica de normalización para garantizar que la variable aleatoria en estudio siga el comportamiento de una distribución normal. Las técnicas más empleadas son Box Cox y Box Cox de doble potencia, las cuales se pueden consultar en Escalante y Reyes (2008).

2.5 Relleno y extensión de un registro

Para rellenar o extender un registro se puede utilizar la técnica de correlación y regresión lineal simple para cada mes en un análisis calendario. Sin embargo, no siempre los

resultados son satisfactorios al extender un registro corto a partir de uno largo, ya que los estimadores de los estadísticos de la muestra extendida deben ser estadísticamente superiores a las que se obtienen con la muestra original (Escalante y Reyes, 2008).

Sean las secuencias corta y larga:

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n_1}$$

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n_1}, x_{n_1+1}, \dots, x_{n_1+n_2}$$

La media y varianza de la serie corta son:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_i \quad (2.41)$$

$$S_{y_1}^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - \bar{y}_1)^2 \quad (2.42)$$

La media y la varianza de la serie x en el periodo común n_1 son:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad (2.43)$$

$$S_{x_1}^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad (2.44)$$

La media y varianza de la serie x desde $n_1 + 1$ hasta n_2 son:

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} x_j \quad (2.45)$$

$$S_{x_2}^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad (2.46)$$

Para la secuencia completa de la serie larga, la media y la varianza son:

$$\bar{x} = \frac{1}{n_1 + n_2} \sum_{k=1}^{n_1+n_2} x_k = \frac{n_1 \bar{x}_1 + n_2 \bar{x}_2}{n_1 + n_2} \quad (2.47)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 1} \sum_{k=1}^{n_1+n_2} (x_k - \bar{x})^2 \quad (2.48)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 1} \left[(n_1 - 1) S_{x_1}^2 + (n_2 - 1) S_{x_2}^2 + \frac{2n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 \right] \quad (2.49)$$

Las medias y las varianzas de los estimados son:

$$E[\bar{y}_1] = \mu_y \quad (2.50)$$

$$\text{var}(\bar{y}_1) = \frac{S_y^2}{n_1} \quad (2.51)$$

$$E[S_{y_1}^2] = S_y^2 \quad (2.52)$$

$$\text{var}(S_{y_1}^2) = \frac{2S_y^4}{n_1 - 1} \quad (2.53)$$

$$E[\bar{x}_1] = E[\bar{x}_2] = E[\bar{x}] = \mu_x \quad (2.54)$$

$$\text{var}(\bar{x}_1) = \frac{S_x^2}{n_1} \quad (2.55)$$

$$\text{var}(\bar{x}_2) = \frac{S_x^2}{n_2} \quad (2.56)$$

$$\text{var}(\bar{x}) = \frac{S_x^2}{n_1 + n_2} \quad (2.57)$$

$$E\left[S_{x_1}^2\right] = E\left[S_{x_2}^2\right] = E\left[S_x^2\right] = S_x^2 \quad (2.58)$$

$$\text{var}\left(S_{x_1}^2\right) = \frac{2S_x^4}{n_1 - 1} \quad (2.59)$$

$$\text{var}\left(S_{x_2}^2\right) = \frac{2S_x^4}{n_2 - 1} \quad (2.60)$$

$$\text{var}\left(S_x^2\right) = \frac{2S_x^4}{n_1 + n_2 - 1} \quad (2.61)$$

El modelo de regresión lineal se puede expresar como (Matalas y Jacobs, 1964):

$$y_i = \mu_y + \beta\left(x_i - \mu_x\right) + \sqrt{1 - \rho^2} \sigma_y \varepsilon_i \quad (2.62)$$

Donde:

$\varepsilon_i \cong N(0,1)$ Variable aleatoria normal con media cero y varianza uno

$\sqrt{1 - \rho^2} \sigma_y$ Representa la componente ruido

ρ Coeficiente de correlación poblacional

Si el término ruido se multiplica por $\alpha\theta$ y los parámetros poblacionales se reemplazan por sus estimadores muestrales, se tendrá (Escalante y Reyes, 2008):

$$\hat{y}_i = \bar{y}_1 + b\left(x_i - \bar{x}\right) + \alpha\theta\sqrt{1 - r^2} S_{y_1} \varepsilon_i \quad (2.63)$$

Donde:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} y_{1i} (x_i - \bar{x}_1)}{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2} \quad (2.64)$$

$$\alpha^2 = \frac{n_2 (n_1 - 4) (n_1 - 1)}{(n_2 - 1) (n_1 - 3) (n_1 - 2)} \quad (2.65)$$

$$r = b \frac{S_{x_1}}{S_{y_1}} \quad (2.66)$$

θ Indicador para incluir ($\theta = 1$) o no ($\theta = 0$) la componente ruido

Los estimadores insesgados por máxima verosimilitud de la media \bar{y} y la varianza S_y^2 de la serie total extendida son (Matalas y Jacobs, 1964):

$$\bar{y} = \bar{y}_1 + \frac{n_2}{n_1 + n_2} b (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \quad (2.67)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 1} \left[(n_1 - 1) S_{y_1}^2 + (n_2 - 1) b^2 S_{x_2}^2 + (n_2 - 1) \alpha^2 \theta^2 (1 - r^2) S_{y_1}^2 + \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} b^2 (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 \right] \quad (2.68)$$

2.5.1 Criterios de la mejora en la estimación de la media y la varianza

La mejora en la estimación de la media y la varianza en una muestra extendida se mide a través del criterio del contenido de la información relativa (Escalante y Reyes, 2008).

$$I = \frac{\text{var}(\hat{\theta})}{\text{var}(\hat{\theta}_e)} \quad (2.69)$$

Donde:

$var(\hat{\theta})$ Varianza del parámetro θ estimado del registro con longitud n_1

$var(\hat{\theta}_e)$ Varianza del parámetro θ estimado del registro con longitud $n_1 + n_2$

$I > I$ Para que exista superioridad al usar las dos estaciones

Para el caso de la media, la varianza cuando se usan ambas estaciones es (Escalante y Reyes, 2008):

$$var(\bar{y}) = \frac{S_y^2}{n_1} \left\{ 1 - \frac{n_2}{n_1 + n_2} \left[r^2 - \frac{(1-r^2)}{n_1 - 3} \right] \right\} \quad (2.70)$$

Para que exista una mejora en la media se debe cumplir que $I > I$, es decir,

$$var(\bar{y}) < var(\bar{y}_1)$$

$$I = \frac{\frac{S_y^2}{n_1}}{var(\bar{y})} = \left[1 + \frac{n_2(2r^2 - n_1r^2)}{(n_1 + n_2)(n_1 - 3)} \right] > I \quad (2.71)$$

Para el caso de la varianza se tiene:

$$\begin{aligned}
 \text{var}\left(S_y^2\right) &= \frac{2r^4 S_y^4}{\left(n_2+n_1-1\right)} + \frac{2\left(1-r^2\right)^2 S_y^4}{\left(n_1+n_2-1\right)^2} \left[I + \frac{2n_2}{\left(n_1-3\right)} + \frac{n_2\left(n_2+2\right)}{\left(n_1-3\right)\left(n_1-5\right)} + \frac{n_2\left(n_1+n_2+2\right)}{\left(n_1-3\right)^2\left(n_1-5\right)} \right] \\
 &+ \frac{4r^2\left(1-r^2\right) S_y^4}{\left(n_1+n_2-1\right)^2} \left[2\left(n_1+n_2\right) + n_1 - 1 + \frac{n_2\left(n_2+2\right)}{\left(n_1-3\right)} \right] + \frac{2\left(1-r^2\right)^2 S_y^4}{\left(n_1-2\right)} \left[I - \frac{\left(n_1+n_2-3\right)}{\left(n_1-3\right)\left(n_1+n_2-1\right)} \right]^2
 \end{aligned}
 \tag{2.72}$$

El estimado de la varianza se mejora si:

$$I = \frac{\text{var}\left(S_{y_1}^2\right)}{\text{var}\left(S_y^2\right)} > I
 \tag{2.73}$$

3 EDAFOLOGÍA

El suelo es un recurso que se encuentra presente en el desarrollo de todas las actividades realizadas por el ser humano. En México se encuentran 26 de los 32 grupos de suelo de referencia existentes en el mundo, reconocidos en el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. La diversidad climática, topográfica y edafológica resultado de la ubicación geográfica de nuestro país, ha propiciado una gran variedad de especies vegetales que ofrecen servicios ambientales indispensables para la vida y la preservación del medio ambiente.

A pesar de la importancia del suelo y la vegetación, los ecosistemas han presentado una importante degradación como consecuencia de factores ambientales y antropogénicos, por tal motivo es necesario poner en practica acciones dirigidas al uso sustentable de los recursos naturales.



3.1 Suelo

Edafología (de las raíces *edafos*, suelo y *lagos*, estudio) se define como la ciencia que estudia la constitución y evolución de los suelos, así como los procesos por los que es alterado. Siendo el suelo un recurso que se encuentra presente en el desarrollo de todas las actividades antropogénicas (económicas, culturales y de bienes y servicios básicos) es de especial interés conocer una definición para su posterior clasificación; aunque esto depende del área de interés el *IUSS* Grupo de Trabajo *WRB* (2007) lo define como:

“Cualquier material dentro de los dos metros de la superficie de la tierra que esté en contacto con la atmósfera, con la exclusión de organismos vivos, áreas con hielo continuo que no estén cubiertas por otro material, y cuerpos de agua más profundos que dos metros, incluyendo roca continua, suelos urbanos pavimentados, suelos de áreas industriales, suelos de cuevas así como suelos subácueos.”

Mientras que en el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México editado por la SEMARNAT (2013), se acepta la definición de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés), que define al suelo como:

“La capa superficial de material mineral y orgánico no consolidado que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó. Por ello, el suelo ya no es roca ni sedimento geológico, sino un producto proveniente de las alteraciones e interacciones que experimentan estos materiales.”

También se puede definir al suelo como:

“El conjunto de cuerpos naturales y antropogénicos que forman la capa más superficial de la corteza terrestre debido a la afectación de sus factores dominantes como son: el tiempo, clima, material parental (roca madre), relieve, actividad de microorganismos, vegetación y uso del suelo; y que está constituido por material mineral y orgánico, líquidos y gases, principalmente dióxido de carbono. Se presenta en un perfil conformado por

horizontes o capas en el cual se desarrollan la cubierta vegetal natural y las actividades humanas.”

Este recurso imprescindible para la existencia humana desempeña funciones naturales, sociales o de uso y ambientales o ecológicas clasificadas según la Unidad de Comunicación Social (2009) en:

Naturales: Interviene en los ciclos biogeoquímicos de carbono, azufre, nitrógeno y fósforo para mantener el equilibrio dentro de un ecosistema, protege las aguas subterráneas y superficiales contra la inclusión de agentes nocivos y transforma compuestos orgánicos descomponiéndolos o modificando su estructura consiguiendo la mineralización.

Sociales o de uso: Proporciona materias primas renovables y no renovables que se utilizan en el desarrollo de las actividades económicas, culturales y de bienes y servicios básicos.

Ambientales o ecológicos: Contribuye a la conservación de los hábitats naturales modificados por actividades forestales, ganaderas y agrícolas inadecuadas que provocan, entre otros problemas ecológicos, la erosión del suelo. Al contar con información edáfica certera se sabe que las reservas de carbono orgánico del suelo representan una cantidad más importante que la de las reservas superficiales de bosques y selvas del mundo.

Aun cuando el suelo está en un proceso de formación constante, se considera un recurso natural no renovable ya que la constitución de un centímetro de suelo en la capa superficial requiere entre 100 y 400 años.

3.1.1 Perfil y horizontes del suelo

El perfil del suelo está constituido por la superposición de horizontes, producto de la meteorización del material parental, diferenciados principalmente por las propiedades físicas del suelo; a través de un corte o excavación se pueden apreciar sus características. Con el fin de clasificarlo adecuadamente existen siete horizontes (H, O, A, E, B, C y R) los cuales generalmente no se encuentran presentes en un mismo perfil, sus particularidades se mencionan a continuación, y se muestran en las Figuras 3.1 a 3.7:

H Horizonte superficial orgánico, presenta acumulación de materia orgánica fresca o en descomposición y se encuentra saturado con agua.



Figura 3.1. Horizonte H. Dorronsoro (2013).

O Horizonte orgánico, compuesto de hojarasca, no presenta saturación con agua.



Figura 3.2. Horizonte O. Dorronsoro (2013).

A Horizonte superficial mineral, caracterizado por la acumulación de materia orgánica descompuesta asociada con la parte mineral, generalmente de color oscuro o pálido.



Figura 3.3. Horizonte A. Dorronsoro (2013).

E Horizonte mineral, con menos contenido de materia orgánica que el horizonte A, existe pérdida de arcilla, hierro y aluminio en condiciones de saturación temporal con agua, es muy arenoso y típicamente de color claro.



Figura 3.4. Horizonte E. Dorronsoro (2013).

B Horizonte subsuperficial mineral, es posible hallar indicios del material parental, se caracteriza por la acumulación de materia orgánica y mineral causantes de colores más intensos que los horizontes suprayacentes y subyacentes.

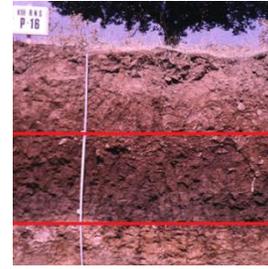


Figura 3.5. Horizonte B. Dorronsoro (2013).

C Horizonte profundo mineral, es una capa poco desarrollada que conserva las características del material parental, puede presentar meteorización pero no edafización.

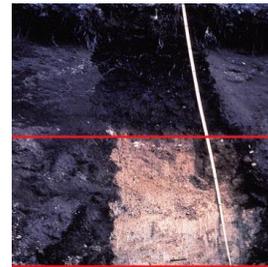


Figura 3.6. Horizonte C. Dorronsoro (2013).

R Horizonte profundo, constituido por roca homogénea muy dura, subyace y da origen al suelo.



Figura 3.7. Horizonte R. Dorronsoro (2013).

3.1.2 Propiedades físicas del suelo

La diferencia de horizontes es establecida principalmente por las propiedades físicas del suelo textura y color.

3.1.2.1 Textura

El volumen del suelo está conformado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa; la fase sólida constituida de partículas inorgánicas (minerales) y orgánicas representa aproximadamente el 50 % del volumen de los suelos superficiales, las partículas de la fracción mineral se clasifican de acuerdo a su tamaño en grava, arena, limo y arcilla haciendo uso de las escalas granulométricas, siendo las más utilizadas la propuesta por la Unión Internacional de la Ciencia del Suelo (*IUSS*), Figura 3.8, y la del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA*), Figura 3.9.



Figura 3.8. Escala granulométrica Internacional. (Dorronsoro, 2013).



Figura 3.9. Escala granulométrica del USDA. (Dorronsoro, 2013).

La composición granulométrica del suelo está definida por la textura, siendo esta la proporción relativa, expresada en porcentaje, de los diferentes tamaños de partículas que componen la fracción mineral del suelo y que son menores a dos mm, arena, limo y arcilla dentro de los 30 cm superficiales del suelo dominante. Se agrupan en 12 clases texturales utilizando el triángulo de texturas, Figura 3.10.

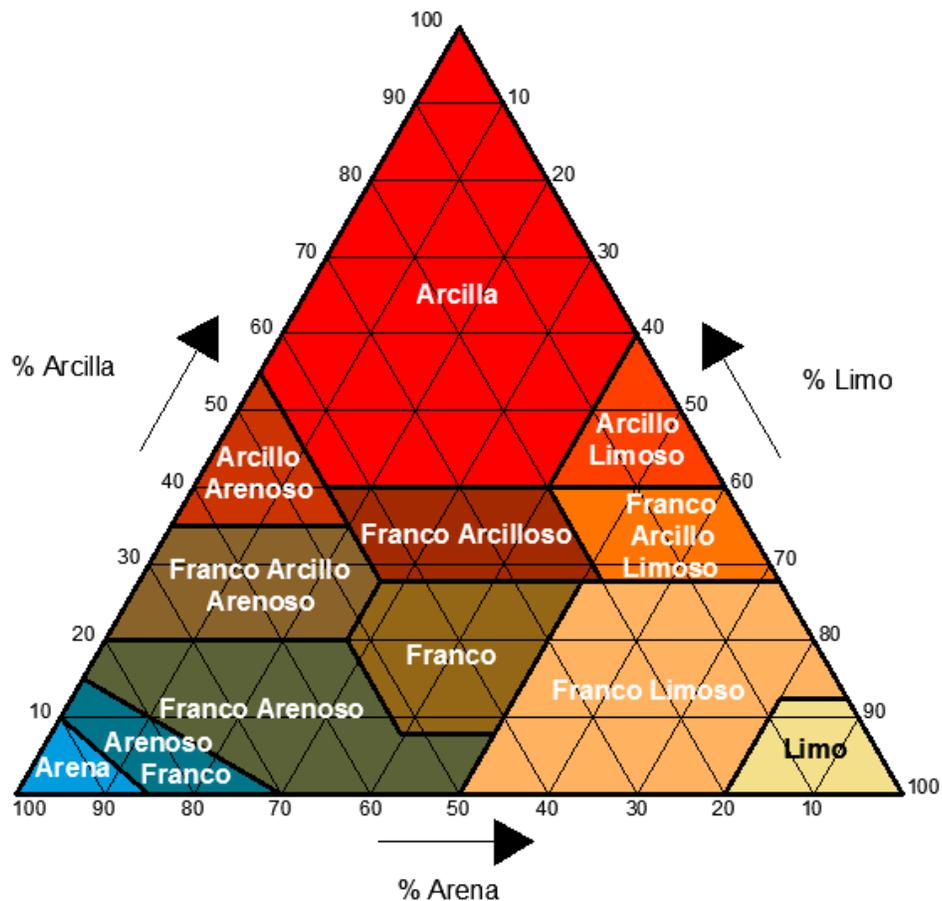


Figura 3.10. Triángulo de texturas. (Dorronsoro, 2013).

En México las zonas agrícolas más productivas como Sinaloa, el sur de Sonora, el bajío guanajuatense y las llanuras costeras de Veracruz y Tamaulipas se desarrollan sobre suelos arcillosos, que en total abarcan el 23.7 % del territorio nacional. Mientras que los suelos arenosos localizados en playas, ríos y desiertos ocupan el 14.3 %. A su vez los suelos francos caracterizados por una textura equilibrada se extienden en el 62 % de la superficie nacional, Figura 3.11.



Figura 3.11. Textura del suelo. (SEMARNAT, 2010).

3.1.2.2 Color

El color es la manifestación de los factores dominantes del suelo que difieren entre cada horizonte, están asociados al grado de evolución, contenido de materia orgánica y mineral, clasificación y la potencialidad y productividad del suelo. Se clasifican con base en la Carta de Colores de Suelo de Munsell, a continuación se mencionan brevemente los colores más representativos y sus características principales.

Negro: Indicio de la existencia de materia orgánica o resultado de un mal drenaje.

Rojo: Relacionado con procesos de intensa meteorización del material parental en condiciones de alta temperatura, baja actividad hídrica, presencia de óxidos férricos e incorporación de materia orgánica.

Amarillo a pardo amarillento claro: Asociado con meteorización de tipo aerobia resultado de la presencia de óxidos férricos, generalmente en climas templados.

Pardo: Característico de un suelo con buen drenaje natural y bajo contenido de materia orgánica.

Blanco: Se presenta en suelos con acumulación de minerales como calcita, dolomita y yeso, así como algunos silicatos y sales; también es causado por la lixiviación de componentes del suelo.

Gris: Advierte un ambiente anaerobio provocado por la saturación del suelo.

Verde: Causado por la presencia de un mal drenaje.

Azulado: Se desarrolla en suelos de zonas costeras, deltaicas o pantanosas bajo condiciones de saturación y ausencia de oxígeno, en presencia de disulfuro de hierro que al transformarse en pirita causa la tonalidad azul metálico.

3.2 Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, *World Reference Base for Soil Resources (WRB)*

Los suelos se clasifican con base en el nivel de las características resultantes de la acción de los factores dominantes (factores o procesos que condicionan la formación del suelo), son definidas en términos de horizontes y capas apreciables y medibles en campo.

Las ediciones precedentes al año 2005 en materia de edafología elaboradas por el INEGI clasifican los suelos de acuerdo con la Leyenda de Clasificación de Suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *FAO/UNESCO* 1968, modificado por la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) en 1970. Para el Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico, escala 1: 250 000 Serie II, con datos de 2002 a 2007, se utilizó la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (*WRB*) publicada en 1999 por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (*IUSS*), el Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (*ISRIC*) y *FAO/UNESCO* siendo modificada por el INEGI en el año 2000, que integra 30 grupos de suelo de referencia.

El presente trabajo se desarrolla en torno a la *WRB* editada en el año 2007, en la cual se detallan 32 grupos de suelo de referencia existentes incluyendo dos nuevos grupos: Tecnosoles y Stagnosoles; esta base referencial será utilizada en el proyecto Información Edafológica Digital Serie III a desarrollarse en el periodo 2013-2017.

En el Anexo B se presenta una breve descripción de cada uno de los grupos de suelo de referencia de acuerdo con *IUSS* Grupo de Trabajo *WRB* (2007).

Los 32 grupos de suelos de referencia se conjuntan en una sucesión de 10 grupos clasificados con base en los factores dominantes, de acuerdo con las claves del *WRB*, según *IUSS* Grupo de Trabajo *WRB* (2007) se organizan de la siguiente manera:

- | | |
|------------------------------------------------|-------------------|
| 1.Suelos con gruesas capas orgánicas | Histosoles |
| 2.Suelos con fuerte influencia humana | |
| Suelos con uso agrícola prolongado e intensivo | Antrosoles |
| Suelos que contienen muchos artefactos | Tecnosoles |

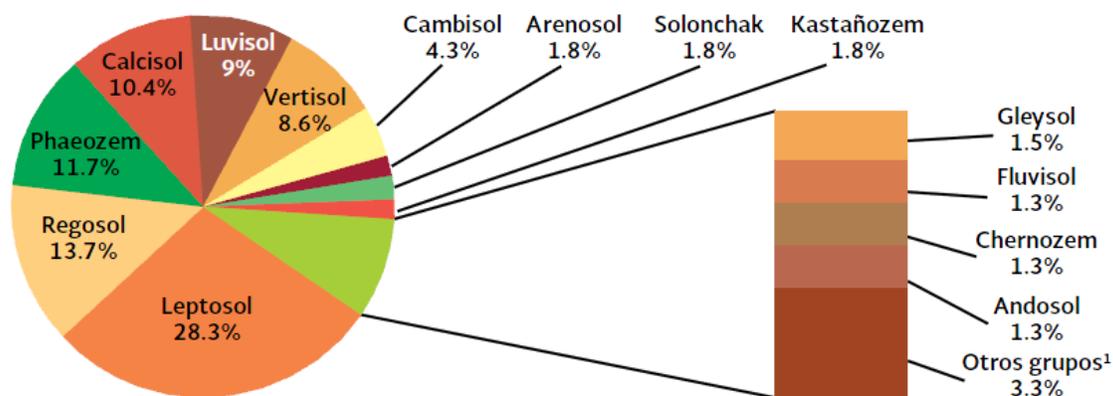
3. Suelos con enraizamiento limitado debido a permafrost o rocosidad somera.
- Suelos afectados por hielo **Criosoles**
 - Suelos someros o extremadamente gravillosos **Leptosoles**
4. Suelos influenciados por agua
- Condiciones alternadas de saturación-sequía, ricos en arcillas expandibles **Vertisoles**
 - Planicies de inundación, marismas costeras **Fluvisoles**
 - Suelos alcalinos **Solonetz**
 - Enriquecimiento en sales por evaporación **Solonchaks**
 - Suelos afectados por agua subterránea **Gleysoles**
5. Suelos regulados por la química de Hierro/Aluminio (Fe/Al)
- Alofano o complejos Al-humus **Andosoles**
 - Queluviación y quiluviación **Podzoles**
 - Acumulación de Hierro bajo condiciones hidromórficas **Plintosoles**
 - Arcilla de baja actividad, fijación de fósforo (P), fuertemente estructurado **Nitisoles**
 - Dominancia de caolinita y sesquióxidos **Ferralsoles**
6. Suelos con agua estancada
- Discontinuidad textural abrupta **Planosoles**
 - Discontinuidad estructural o moderadamente textural **Stagnosoles**
7. Acumulación de materia orgánica, alta saturación con bases
- Típicamente mólico **Chernozems**
 - Transición a clima más seco **Kastanozems**
 - Transición a clima más húmedo **Phaeozems**
8. Acumulación de sales menos solubles o sustancias no salinas
- Yeso **Gipsisoles**
 - Sílice **Durisoles**
 - Carbonato de calcio **Calcisoles**
9. Suelos con subsuelo enriquecido en arcilla
- Lenguas albelúvicas **Albeluvisols**
 - Baja saturación con bases, arcillas de alta actividad **Alisoles**
 - Baja saturación con bases, arcillas de baja actividad **Acrisols**
 - Alta saturación con bases, arcilla de alta actividad **Luvisols**
 - Alta saturación con bases, arcilla de baja actividad **Lixisoles**

10. Suelos relativamente jóvenes o suelos con poco o ningún desarrollo de perfil

Con suelo superficial oscuro ácido	Umbrisols
Suelos arenosos	Arenosols
Suelos moderadamente desarrollados	Cambisoles
Suelos sin desarrollo significativo de perfil	Regosoles

En México se encuentran 26 de los 32 grupos de suelo de referencia existentes en el mundo, reconocidos en el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (*IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007*), Figura 3.13.

Los seis grupos dominantes en nuestro país son: Leptosol (54.3 millones de ha), Regosol (26.3 millones de ha), Phaeozem (22.5 millones de ha), Calcisol (20 millones de ha), Luvisol (17.3 millones de ha), Vertisol (16.5 millones de ha) que en conjunto ocupan el 81.7 % del territorio nacional, Figura 3.12, en los 35.04 millones de hectáreas restantes se presentan los otros 20 grupos de suelo de referencia.



¹Incluye: Umbrisol, Durisol, Acrisol, Planosol, Solonetz, Gypsisol, Nitisol, Alisol, Lixisol, Histosol, Ferralsol y Plintosol.

Figura 3.12. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México. (SEMARNAT, 2013).



Figura 3.13. Suelos dominantes. (SEMARNAT, 2010).

3.1 Usos de Suelo

La diversidad climática, topográfica y edafológica resultado de la ubicación geográfica de México ha propiciado una gran variedad de especies vegetales que ofrecen servicios ambientales indispensables para la vida y la preservación del medio ambiente. A pesar de esto los ecosistemas han sufrido una importante degradación; una gran parte del territorio ha cambiado a un uso de suelo agrícola, pastizal y zonas urbanas; otros ecosistemas han presentado alteración en su vegetación primaria convirtiéndose en vegetación secundaria, estas afectaciones deben ser atendidas prioritariamente aminorando sus efectos con prácticas dirigidas al uso sustentable de los recursos naturales.

La manera en cómo se emplea un terreno y su cubierta vegetal se conoce como uso de suelo; para el territorio nacional es clasificado en la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000 Serie V elaborada por el INEGI, que describe la vegetación existente en México hasta el año 2012 de acuerdo al sistema de clasificación propuesto por Jerzy Rzedowski, con base en las afinidades ecológicas, florísticas, fisonómicas y fenológicas de los diferentes tipos de vegetación. Los grupos dominantes en el país se describen en el Anexo C, Figura 3.14 y 3.15.

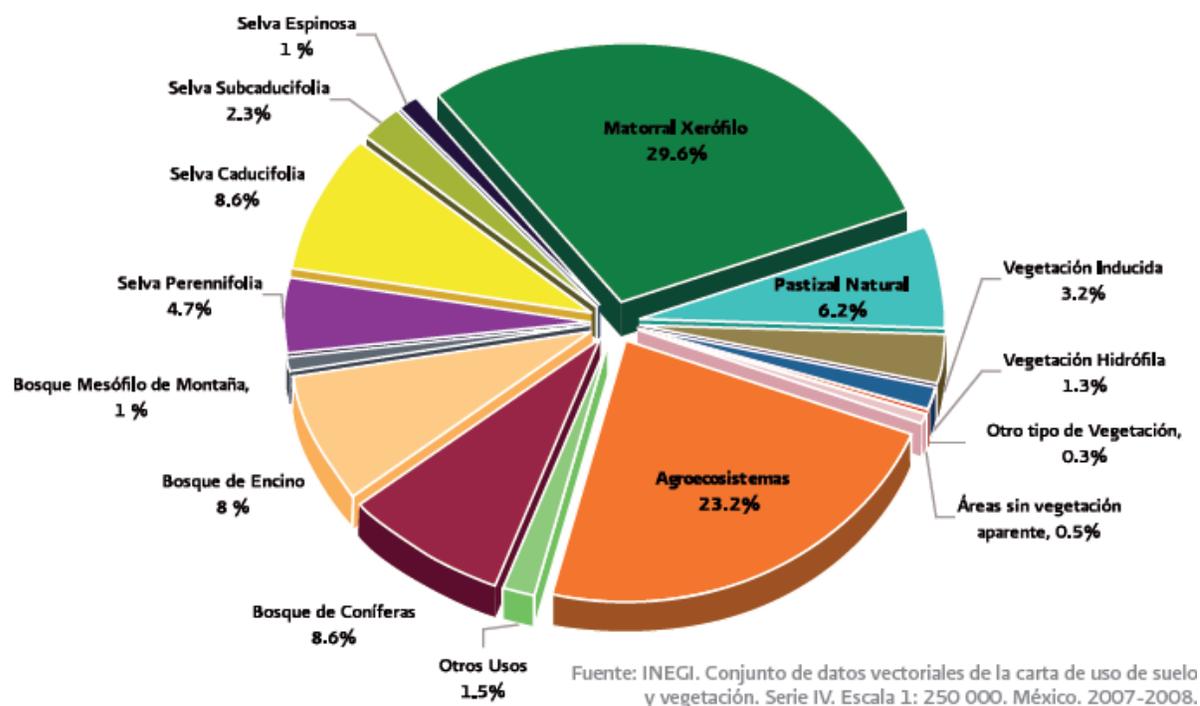


Figura 3.14. Porcentaje de Vegetación actual en el año 2007. (SEMARNAT, 2010).

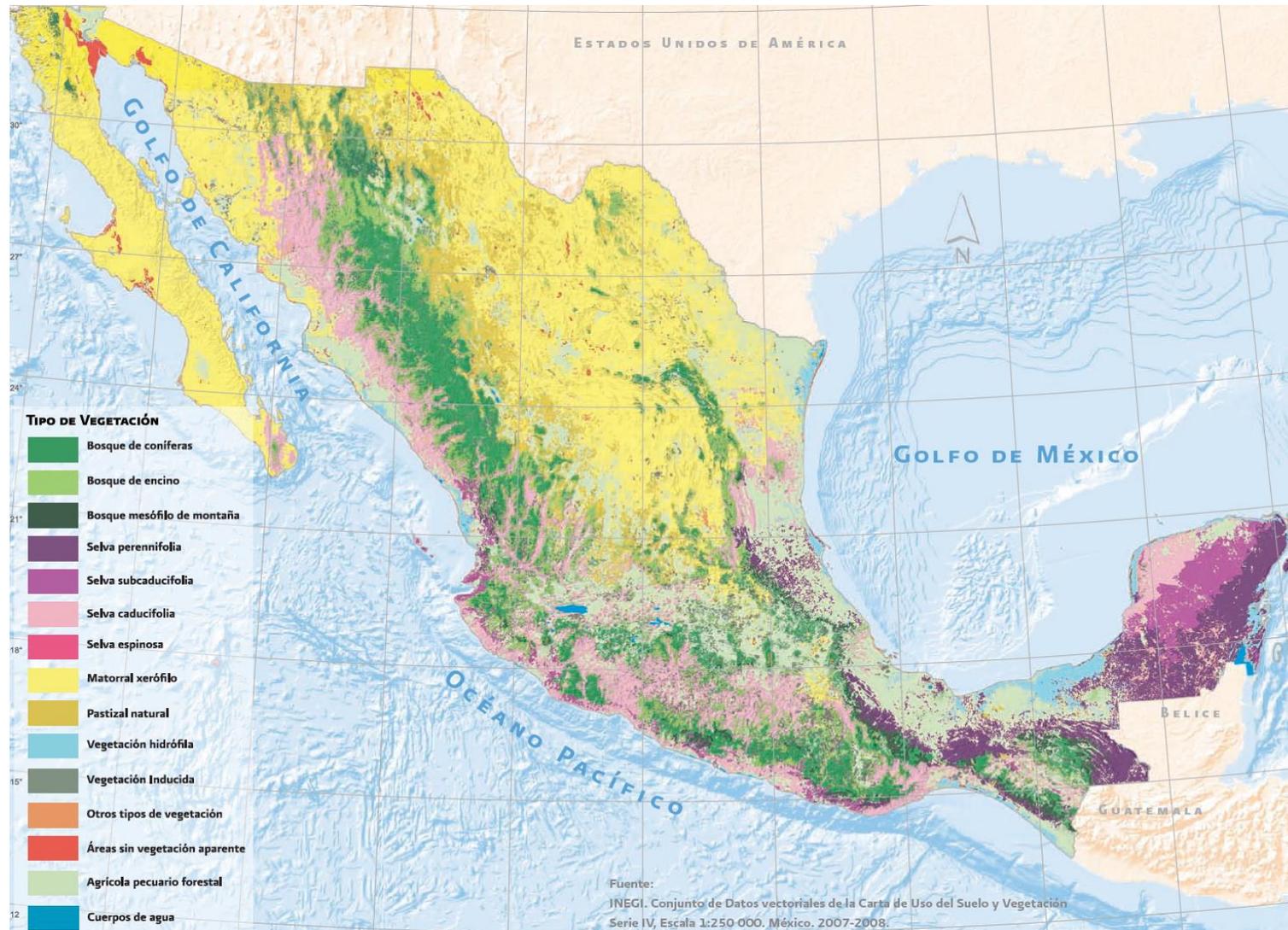


Figura 3.15. Vegetación actual. (SEMARNAT, 2010).

3.2 Procesos Erosivos (Estimación del potencial erosivo)

La degradación de los recursos naturales es un problema grave que exige una atención prioritaria para el desarrollo sustentable de una nación. La degradación ambiental es un proceso inducido por el comportamiento de las actividades humanas que daña o altera los recursos naturales y los ecosistemas. Los efectos potenciales son variables y pueden contribuir a incrementar la vulnerabilidad, frecuencia e intensidad de los peligros naturales. La degradación de los suelos; la deforestación; los incendios forestales; la desertificación; la pérdida de la biodiversidad; la contaminación del suelo, aire y agua; el cambio climático; el incremento en el nivel del mar; y la reducción de la capa de ozono son ejemplos de la degradación ambiental (Escalante, 2012).

3.2.1 Degradación del Suelo

La degradación del suelo es todo aquel proceso natural o antropogénico que ocasiona el deterioro del recurso suelo de las tierras agrícolas, de cultivo, pastizales, bosques, tierras arboladas y en general de los ecosistemas afectando sus propiedades físicas, químicas y biológicas de manera irreversible; lo que provoca una disminución parcial o total de su productividad económica, biológica o de su biodiversidad, así como de la capacidad actual o futura para brindar servicios ambientales y sostener vida vegetal, animal y humana.

La degradación del suelo es consecuencia de la interacción de factores ambientales y antropogénicos entre los que se encuentran el tipo y uso de suelo, la topografía, el clima, la deforestación, el sobrepastoreo, la densidad poblacional, los sistemas de producción y tenencia de la tierra, las políticas públicas, la manera en la que se usan los recursos naturales y el tipo y estado de la cobertura vegetal.

Según la naturaleza de los procesos se consideran tres tipos de degradación de suelo: física, química y biológica, Figura 3.16, (Escalante, 2012).

Degradación física: Es la disminución del contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo, causada frecuentemente por la eliminación de la cubierta vegetal y la práctica de cultivos inadecuados.

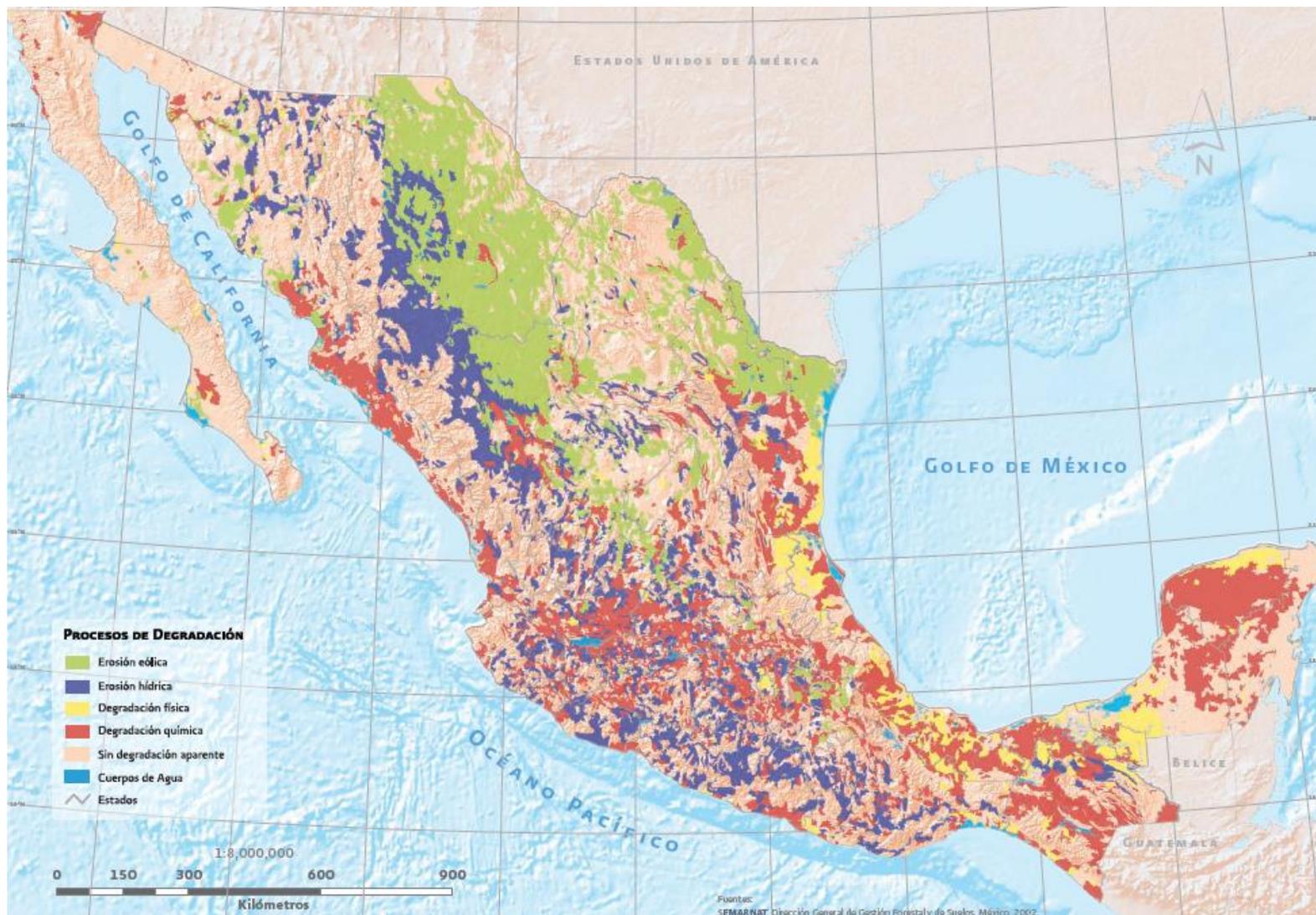


Figura 3.16. Procesos de degradación. (SEMARNAT, 2010).

Un indicio de este tipo de degradación es la reducción de la porosidad del suelo que se manifiesta con fenómenos como el deterioro de la estructura, compactación, sellado, apelmazamiento, encostramiento, reducción de la permeabilidad, falta de aireación, formación de pisos de arado y limitación para el enraizamiento de las plantas; afectando la densidad, capacidad de retención de agua y estabilidad de los componentes del suelo. La degradación física afecta 10.84 millones de hectáreas, cerca del 5.7 % del territorio nacional, Figura 3.17.

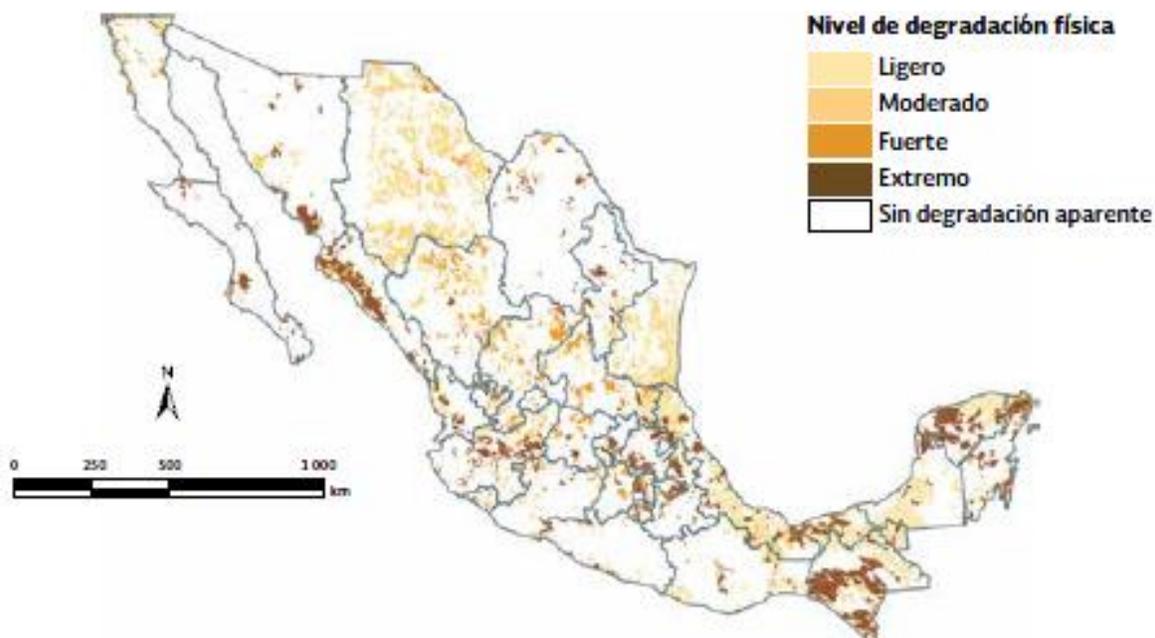


Figura 3.17. Degradación física de suelos según nivel en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

Degradación química: Proceso mediante el cual el agua arrastra a mayor profundidad nutrientes esenciales para las plantas; comprende la pérdida de nutrientes o de fertilidad, acidificación o reducción del PH del suelo, sodificación o alcalinización, salinización y contaminación por uso indiscriminado de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes, Figura 3.18. La contaminación química puede ser de origen natural, pero las actividades industriales y agrícolas suelen ser las principales causas de toxicidad. La degradación química es la más importante en México afectando 34.04 millones de hectáreas, un 17.8 % de la superficie total de la cual, con base en los niveles de degradación, el ligero está en 55 %, moderado en 43.2 % y fuerte y extremo en 1.8 %, Figura 3.19.

Degradación Biológica: Se considera la pérdida de materia orgánica y la alteración de la flora y fauna del suelo.

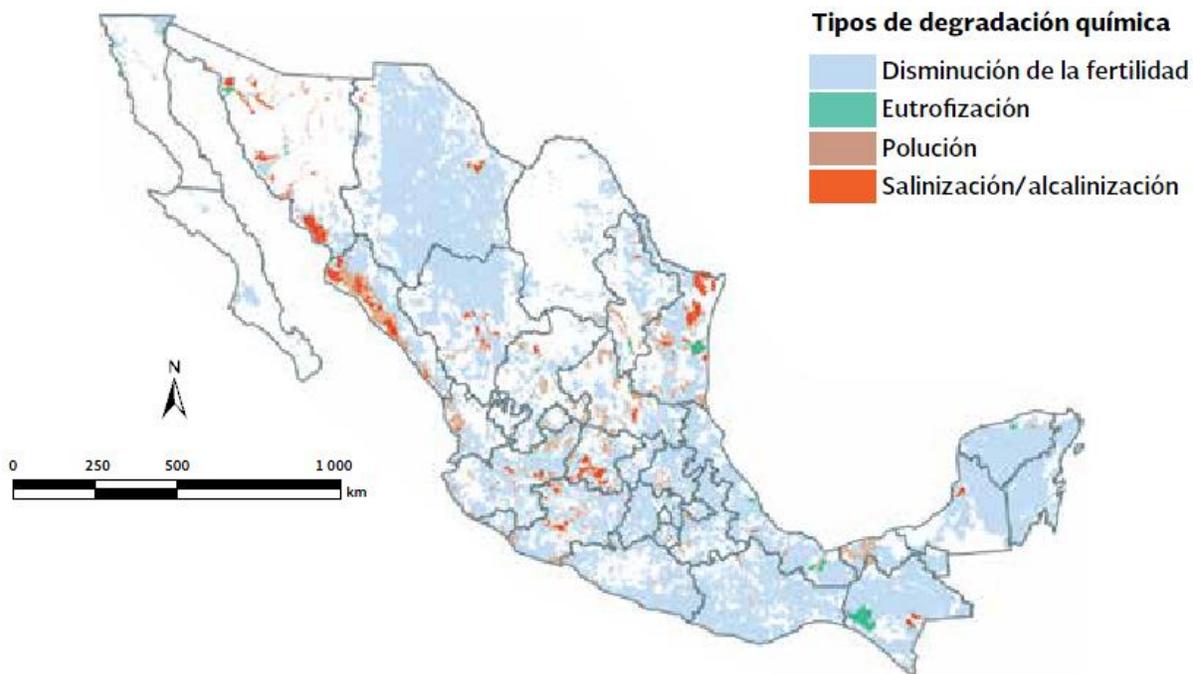


Figura 3.18. Degradación química de suelos según tipos específicos en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

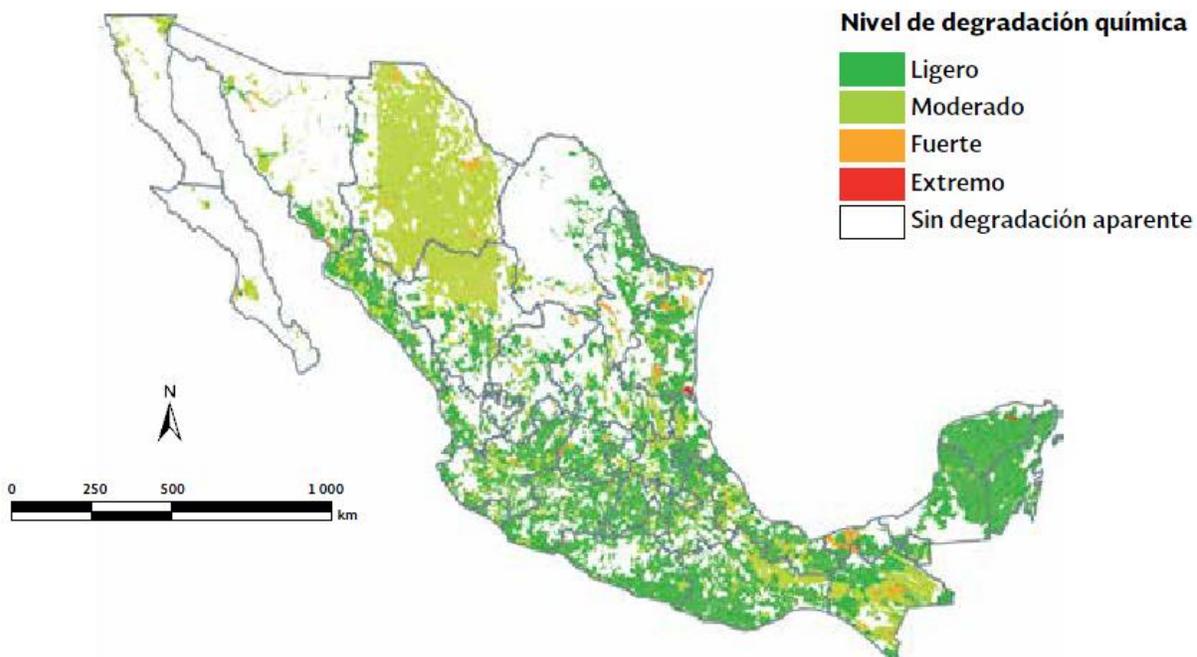


Figura 3.19. Degradación química de suelos según nivel en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

La degradación del suelo se calcula como porcentaje sobre unidad de área; a su vez se divide de acuerdo con su intensidad en ligera, moderada, severa y extrema, Figura 3.20, e incluye la erosión vertical con pérdida de fertilidad del suelo (Cardoza, et al., 2007).

Degradación ligera: Degradación del suelo apenas perceptible y donde se ha perdido hasta 25 % de la capa superficial, pero de 10 % a 20 % de la superficie total presenta problemas de canalillos y cárcavas pequeñas. Se nota alguna reducción en su productividad.

Degradación moderada: Presenta erosión en canalillos, canales y cárcavas pequeñas; se ha perdido de 26 % a 50 % de la capa superficial. Puede presentar niveles de degradación ligera o extrema en 10 % de la superficie total. Se observa una marcada reducción de su productividad.

Degradación severa o fuerte: Se presentan pérdidas de entre 51 % y 75 % de la capa superficial del suelo; ocurre en manchones de material consolidado, tipo tepetate o afloramientos rocosos, así como cárcavas de todos tamaños; presenta niveles con degradación ligera o moderada en 25 % del área total. Se pueden considerar con productividad irrecuperable.

Degradación extrema: Presenta pérdidas superiores a 75 % de la capa de suelo superficial, con cárcavas profundas; es prácticamente imposible recuperarlo en el mediano plazo. Se pierde la productividad de los terrenos.

En México los niveles de degradación del suelo se presentan, de acuerdo al total de la superficie nacional, en 22.8 % ligera, 20 % moderada, 1.4 % fuerte y 0.7 % en extrema; 55.1 % no tiene degradación aparente.

3.2.1.1 Erosión del Suelo

La erosión forma parte de la degradación del suelo y se define como la afectación del suelo por procesos de destrucción, desgaste, desprendimiento y arrastre de las partículas de suelo (arcilla, limo y arena) de un lugar para su depósito en otro, mediante agentes erosivos como: el impacto de las gotas de lluvia; las corrientes superficiales de agua, nieve o hielo; la acción del viento; los cambios de temperatura y la gravedad.



Figura 3.20. Nivel de degradación. (SEMARNAT, 2010).

Los procesos erosivos son impactos negativos prácticamente irreversibles caracterizados por ser rápidos en comparación con la velocidad de formación del suelo; se ven favorecidos por el deterioro y la pérdida de cobertura forestal dado que está actúa como protección del suelo y al eliminarla a causa de actividades antropogénicas se altera el equilibrio del ecosistema. La erosión eólica e hídrica son los fenómenos que provocan mayor afectación al suelo de nuestro país.

3.2.1.2 Erosión eólica

La erosión eólica se presenta cuando la acción constante del viento causa desgaste, desagregación, remoción y transporte de partículas de suelo en un terreno con superficie desnuda o escasa cobertura vegetal.

La cantidad de material erosionado depende principalmente de las características del suelo y la protección con la que cuenta (cobertura vegetal); se considera que la velocidad del viento que provoca erosión eólica se presenta entre 19 y 24 km/h. Este fenómeno se ve favorecido por la deforestación y la sequía ya que es en esta temporada cuando se incrementa la velocidad del viento (Escalante, 2012).

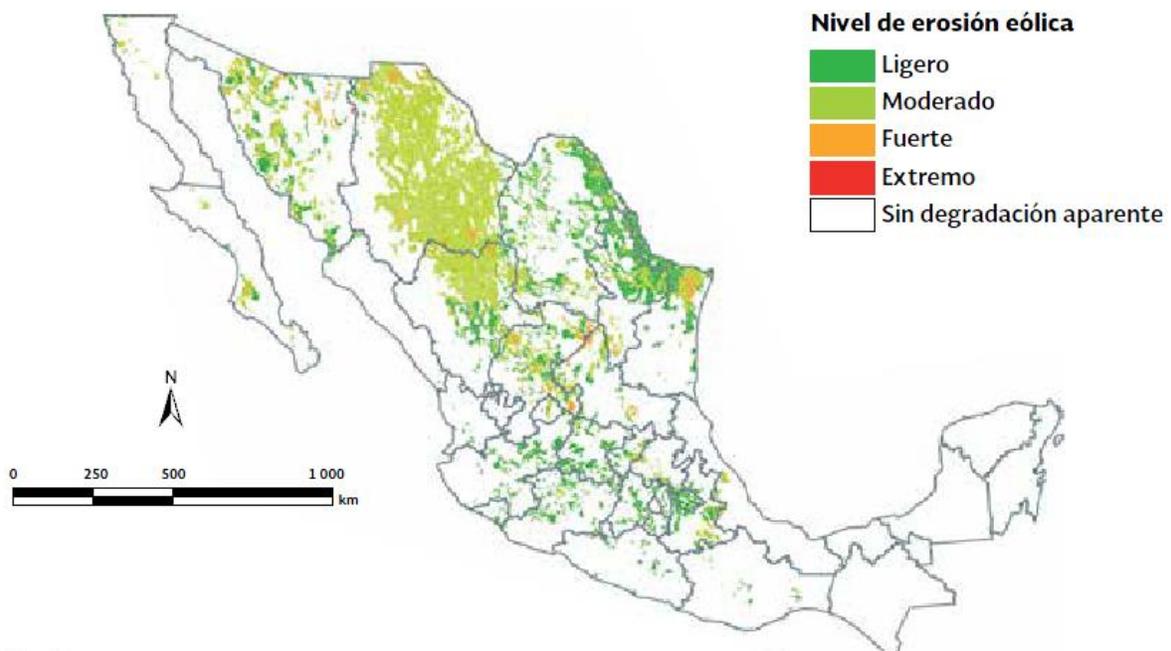


Figura 3.21. Erosión eólica de suelos según nivel en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

Entre sus efectos destacan el empobrecimiento del suelo de donde son removidas las partículas y cubrimiento de capas de suelo, vegetación y cosechas.

En México la erosión eólica afecta 18.12 millones de hectáreas (9.5 % del territorio nacional) principalmente en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país; los estados más afectados en proporción a su superficie son: Chihuahua (28.5 %), Tlaxcala (26 %), Nuevo León (18.9 %) y Durango (17.9 %). Se produce en tres diferentes formas: pérdida del suelo superficial por acción del viento (9.1 % del territorio nacional), deformación del terreno por acción del viento (0.04 %) y efectos fuera del sitio por erosión eólica (0.4 %). Los niveles de afectación por este tipo de erosión son del total nacional, Figura 3.21, 66.7 % en nivel moderado, 29.5 % en ligero y 3.8 % entre fuerte y extremo (SEMARNAT, 2013b).

3.2.1.3 Erosión hídrica

La erosión hídrica es el proceso de dispersión, desprendimiento, remoción, pérdida y transporte de las partículas de la capa superficial de suelo por la acción del agua de lluvia.

La erosión hídrica tiene como consecuencia la pérdida de suelo, Figura 3.22, su acumulación provoca el aumento de la carga sólida que arrastran los ríos disminuyendo sustancialmente la calidad del agua y la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos (Escalante y Reyes, 2005); esto es el azolve de ríos, lagos, lagunas y presas que deriva en la alteración del hábitat de especies silvestres de flora y fauna; también se ven afectados los ciclos hidrológicos teniendo una disminución de la recarga de los mantos acuíferos, así mismo es un detonante de la inestabilidad de laderas.

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes que afectan la capacidad de las tierras para la producción de alimentos (Escalante, 2012); al presentarse pendientes mayores al 1 % las superficies son más susceptibles a la erosión. Las primeras capas de suelo y una cubierta vegetal adecuada reducen la acción erosiva de la precipitación dando paso a la disminución de la cantidad y velocidad del escurrimiento favoreciendo la infiltración del agua de lluvia para aumentar la recarga de los acuíferos y regular el ciclo hidrológico.

Este tipo de erosión se produce por dos mecanismos: el primero es por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, que produce la destrucción de los

agregados o terrenos del suelo cuando este está desnudo; mientras que el segundo se genera por el escurrimiento superficial que arrastra partículas de suelo, materia orgánica, y nutrientes como el nitrógeno y fósforo provocando el empobrecimiento de este (Escalante, 2012). Ambos dependen de la cantidad, duración, intensidad y frecuencia de las lluvias así como de la época del año en que se presenten.

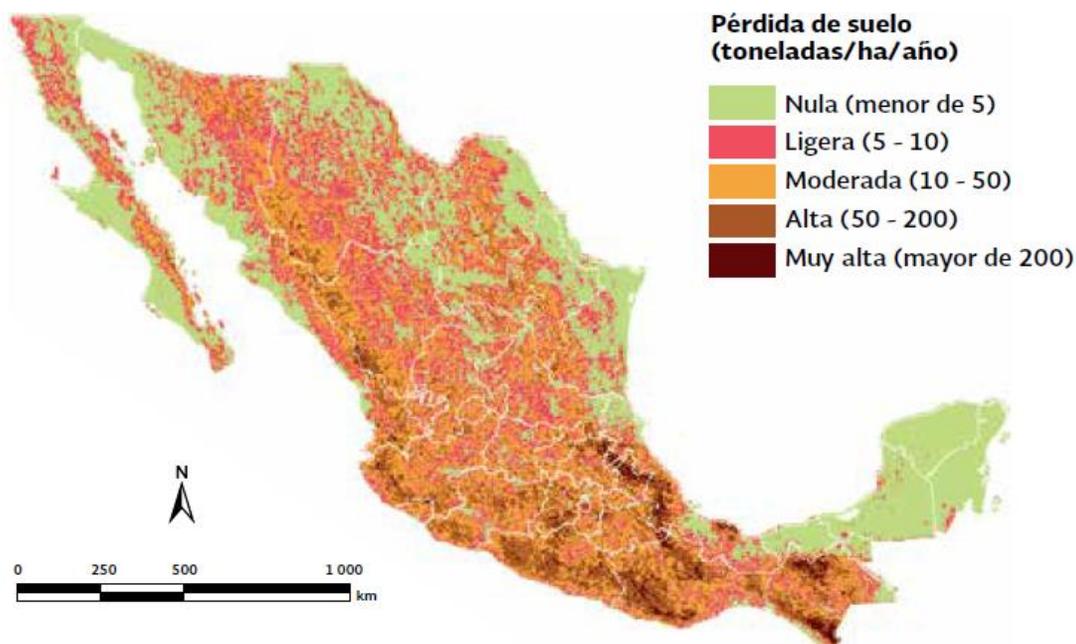


Figura 3.22. Erosión hídrica potencial de suelos según nivel, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

De acuerdo con la intensidad de lluvia, tipo de suelo y grado de protección de la superficie se producirá erosión hídrica de distinta gravedad. Así, se encontrara erosión laminar donde el suelo se pierde en capas muy delgadas. Luego puede aparecer la erosión digital en forma de dedos de una mano, donde el agua que escurre desde la parte alta a la baja es capaz de cortar el suelo y formar surcos de 5 a 10 cm de profundidad. Por último, la parte más grave de erosión se da en suelos pobres en materia orgánica, con mala estructura y escasa o nula protección vegetal cuando son sometidos a lluvias intensas, causando la formación de surcos y canales profundos, llamados cárcavas. Estas cárcavas pueden tener varios metros de ancho y profundidad, constituyendo pequeños arroyos (Escalante, 2012).

En el país la erosión hídrica abarca 22.73 millones de hectáreas que representan 11.9 % de la superficie total, de las cuales el 56.4 % se encuentra en nivel ligero, 39.7 % en nivel

moderado, 3.7 % en fuerte y 0.2 % en extremo, Figura 3.23. De los tipos de erosión que se presentan 1.4 % del territorio es afectado por deformación del terreno, 10.5 % por pérdida de suelo superficial y 0.03 % se da fuera de sitio. El estado más afectado es Guerrero ya que el 31.8 % de su superficie presenta erosión hídrica.

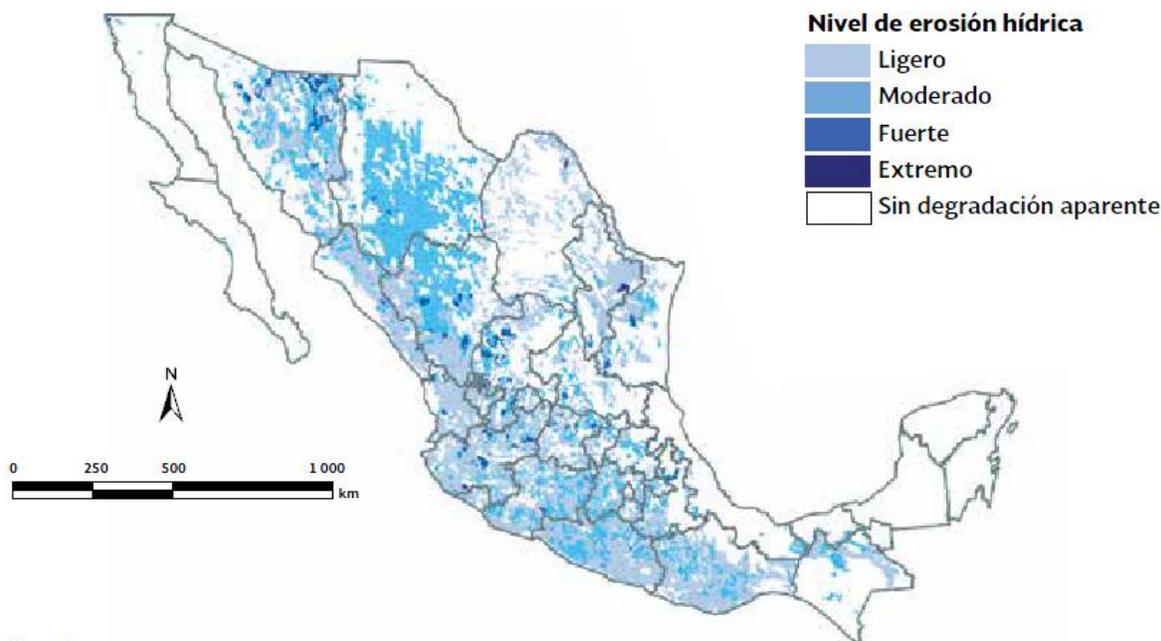


Figura 3.23. Erosión hídrica de suelos según nivel en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

Al existir una estrecha relación entre la degradación y los usos y tipos de suelo es necesario mencionar que el 35 % de la superficie nacional degradada se debe a las actividades agrícolas y pecuarias (17.5% cada una de ellas), 7.4% a la pérdida de la cubierta vegetal (deforestación) y el resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales, Figura 3.24.

En la Figura 3.25 se observa que la erosión hídrica afecta mayormente a los bosques templados, se asocia a que se localizan en zonas con pendientes importantes; mientras que la erosión eólica afecta en mayor medida a los ecosistemas de matorral xerófilo, pastizales naturales y la vegetación halófila y gipsófila, debido a la poca protección que estos tipos de vegetación brindan al suelo.

La identificación de las áreas con riesgos potenciales de erosión y la cuantificación de las pérdidas actuales y potenciales del suelo, constituyen aspectos importantes en la

planificación y manejo de las cuencas, sobre todo de las altas, donde la ocurrencia de los procesos erosivos se acelera por la intervención del hombre (Escalante y Reyes, 2005).

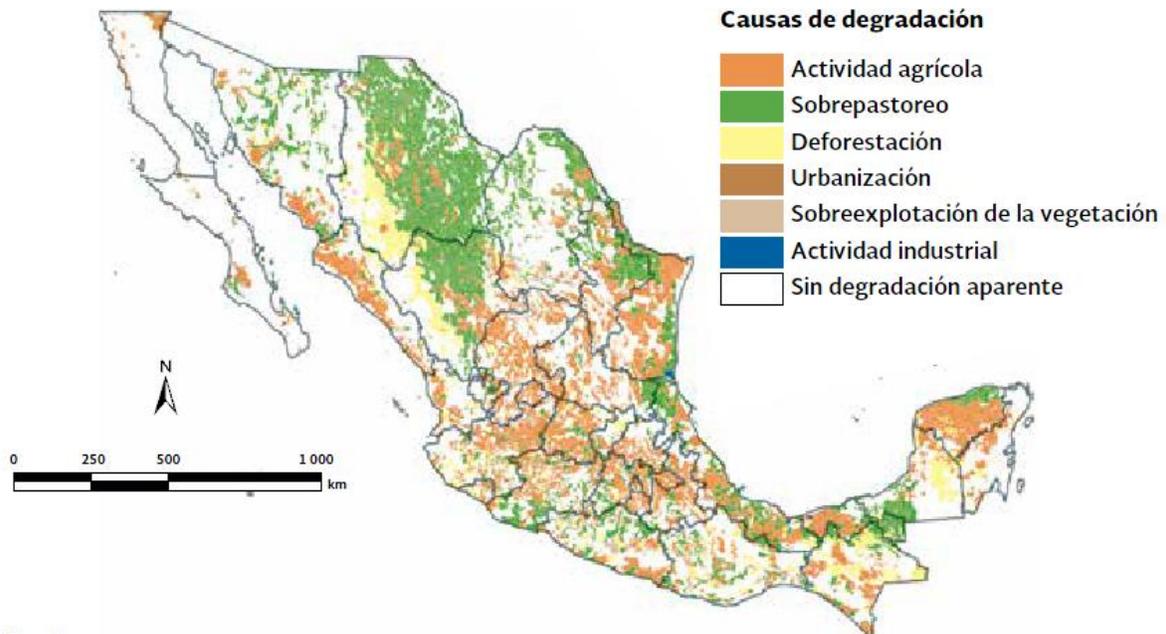


Figura 3.24. Principales causas de degradación del suelo en México, 2002. (SEMARNAT, 2013b).

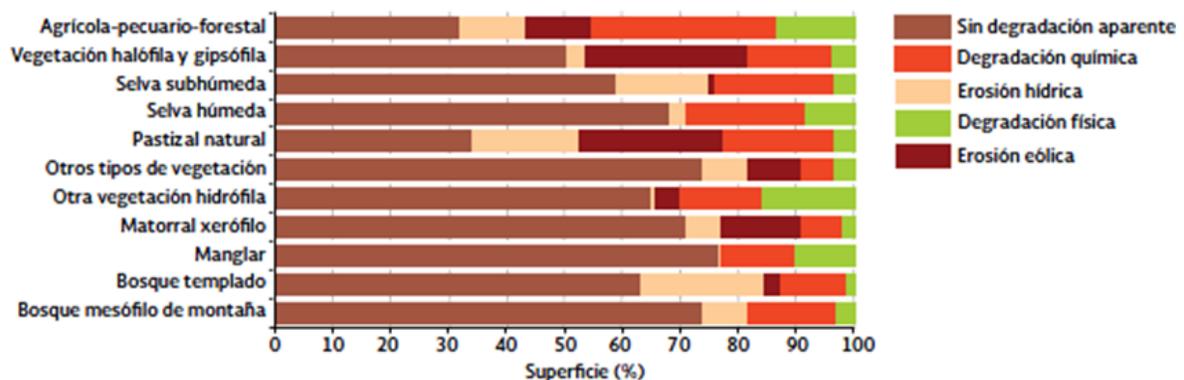


Figura 3.25. Tipos de degradación del suelo en diferentes usos del suelo y vegetación en México. (SEMARNAT, 2013b).

En el estudio realizado por la SEMARNAT y el Colegio de Posgraduados denominado Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000 se detallan los procesos de degradación del suelo así como sus causas, tipos específicos y niveles de afectación; puede consultarse en la referencia SEMARNAT, 2013b.

3.3 Conservación, protección y restauración de suelos

Las actividades antropogénicas han ocasionado la alteración de los ecosistemas; la situación del recurso suelo en nuestro país debe ser atendida realizando acciones de conservación, protección y restauración de suelos con el fin de mantener las condiciones naturales de la vegetación forestal en buen estado, controlar los procesos de degradación, mantener la productividad potencial de los suelos, la retención de azolves y la captación de agua.

De acuerdo con la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2003), la restauración forestal se define como el conjunto de actividades tendientes a la rehabilitación de un ecosistema forestal degradado, para recuperar parcial o totalmente las funciones originales del mismo y mantener las condiciones que propicien su persistencia y evolución.

La reforestación se refiere al establecimiento inducido de vegetación forestal en terrenos forestales, preferentemente forestales o temporalmente forestales (LGDFS, 2003); ha sido utilizada desde los años noventa ya que es la mejor opción para la conservación y restauración de suelos que han perdido la cubierta vegetal; a pesar de esto su práctica se limita a las zonas donde se presenta degradación severa a causa de la necesidad de contar con terrenos para actividades agropecuarias.

En el Anexo D se describen las obras utilizadas para el control de la erosión hídrica en México que se basan en una perspectiva de cuenca, enfocándose en primera instancia a contrarrestar la pérdida de suelo en zonas de ladera y, posteriormente, a controlar la erosión hídrica en las cárcavas.

3.4 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es un criterio empírico que cuantifica el material sólido que se pone en movimiento como producto de la erosión hídrica y se expresa como (Escalante, 2012):

$$A = R * K * SL * C * P \quad (3.1)$$

Donde:

A Pérdida de suelo anual [ton/ha]

R Factor que mide el potencial erosivo de la lluvia [N/h]

K Factor que toma en cuenta el tipo de suelo [ton-h/N-ha]

SL Factor de longitud y pendiente de la cuenca [adimensional]

C Factor de cobertura vegetal [adimensional]

P Factor de prácticas de cultivo y conservación de suelo [adimensional]

En la literatura se pueden encontrar diferencias en la estimación de la erosión de suelos *A* y el aporte de sedimentos *AS*. El primero corresponde a la cuantificación del material sólido que se pone en movimiento debido a la erosión hídrica en un cierto periodo de tiempo. En tanto que el segundo corresponde al material sólido real que aporta la cuenca a su salida considerando el redepósito así (Escalante, 2012):

$$AS = DR * A \quad (3.2)$$

Donde:

AS Aporte de sedimentos [ton/ha]

DR Relación de entrada de sedimentos

$$DR = 0.417662 Area^{-0.134958} - 0.127097 \quad (3.3)$$

Donde:

Area Superficie de la cuenca analizada [millas cuadradas]

Las variables que considera la USLE se describen a continuación:

Potencial erosivo de la lluvia (Factor R): Se define como la fuerza que tiene la lluvia para erosionar un tipo de suelo; una lluvia ligera y prolongada puede tener la misma energía que una precipitación de corta duración y mayor intensidad, según CONAGUA (1966) se obtiene como:

$$R = 1.702 \left\{ \frac{\left[\sum \left(1.213 + 0.890 * \log I_j \right) \left(I_j T_j \right) \right] I_{30}}{173.6} \right\} \quad (3.4)$$

Donde:

R Potencial erosivo de la lluvia [N/h]

I_j Intensidad de la precipitación [mm/h] para un incremento de tiempo específico T_j [horas]

I_{30} Intensidad máxima de la tormenta en 30 min [mm/h]

La ecuación ((3.4) se sustenta en el análisis de las lluvias acumuladas en 24 h; con ella se propone obtener el coeficiente R para cada una de las tormentas máximas anuales de 24 horas, y posteriormente encontrar una relación funcional entre estos factores, lo cual permitirá estimar los valores de R en sitios que solo cuentan con información pluviométrica utilizando la metodología descrita en Escalante (2005). Para la obtención del valor R solo se toman en cuenta las lluvias diarias consideradas como erosivas, es decir, aquellas mayores a 10 mm.

Erosionabilidad del suelo (Factor K): Representa la susceptibilidad de un tipo de suelo a la pérdida del mismo por efecto de la erosión hídrica, en la Tabla 3.1 se muestran los valores generales del factor K en [ton-h/N-ha].

Textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5%	2.0%	4.0%
Arena	0.066	0.040	0.026
Arena fina	0.211	0.184	0.132
Arena muy fina	0.553	0.474	0.369
Arena migajonosa	0.158	0.132	0.105
Arena fina migajonosa	0.316	0.263	0.211
Arena muy fina migajonosa	0.579	0.500	0.395
Migajón arenoso	0.356	0.316	0.250
Migajón arenoso fino	0.461	0.395	0.316
Migajón arenoso muy fino	0.619	0.540	0.435
Migajón	0.500	0.448	0.382
Migajón limoso	0.632	0.553	0.435
Limo	0.790	0.685	0.553
Migajón arcilloso arenoso	0.356	0.329	0.277
Migajón arcilloso	0.369	0.329	0.277
Migajón arcilloso limoso	0.487	0.421	0.342
Arcilla arenosa	0.184	0.171	0.158
Arcilla limosa	0.329	0.303	0.250
Arcilla	-	0.171-0.382	-

Tabla 3.1. Valores generales del factor K . (CONAGUA, 1966).

Factor topográfico Longitud-pendiente (SL): La longitud de pendiente (L) es definida como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto de salida. El factor de inclinación de la pendiente (S) refleja la influencia de esta en la erosión del suelo, el potencial erosivo se incrementa con la inclinación de la pendiente, Tabla 3.2.

Tipo de terreno	S [%]	SL
Terrenos normalmente de cultivo	≤ 5	1
Terrenos de cultivo en temporal, con necesidades más o menos importantes de prácticas de conservación	$5 < S \leq 20$	4
Terrenos forestales, pastizales o cultivos que requieren importantes medidas de conservación de suelo	≤ 5	7

Tabla 3.2. Valores generales de SL . (CONAGUA, 1966).

Factor de cobertura vegetal (C): Esta relación compara la pérdida de suelo con la de un campo sometido a un tratamiento estándar de barbecho (DDS, 1997), y mide como el potencial de pérdida de suelo será distribuido en el tiempo durante las prácticas de conservación y restauración de suelos, Tabla 3.3.

Cubierta vegetal		C
Suelo desnudo		1
Bosque o matorral denso, cultivos con capa gruesa de materia orgánica		0.001
Sabana, pradera en buenas condiciones		0.01
Sabana o pradera sobrepastoreadas		0.1
Cultivo de desarrollo lento o siembra tardía: primer año		0.3 a 0.8
Cultivo de desarrollo rápido o siembra temprana		0.01 a 0.1
Cultivo de desarrollo lento o siembra tardía: segundo año		0.01 a 0.1
Maíz, sorgo, mijo (establecidos)		0.4 a 0.9
Arroz		0.1 a 0.2
Algodón, tabaco (segundo ciclo)		0.5 a 0.7
Cacahuete		0.4 a 0.8
Primer año de casave y ñame		0.01
Palma, café, cacao con cubierta de cultivo		0.1 a 0.3
Piña en contorno:	Con residuo quemado	0.2 a 0.5
	Con residuo enterrado	0.1 a 0.3
	Con residuo superficial	0.2 a 0.8
Piña y siembra de relleno (pendiente 7 %)		0.1
Bosque, área cubierta:	del 75 al 100 %	0.003 a 0.011
	del 45 al 70 %	0.01 a 0.04
	del 25 al 40 % con residuos	0.41
	sin residuos	0.84
Zona de cultivo		0.4

Tabla 3.3. Factor de cobertura vegetal *C*. (CONAGUA, 1966).

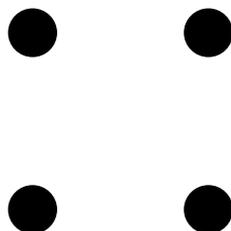
Factor de prácticas de cultivo y conservación de suelo (*P*): Es una relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo al que no se aplica ninguna práctica de conservación (DDS, 1997), Tabla 3.4.

Altura entre surcos	P mínimo
Nula	1
Muy baja	0.5
Baja	0.3
Moderado	0.15
Alto	0.08
Muy alto	0.05

Tabla 3.4. Valores de *P* mínimos para prácticas de contorno. (Miliarium, 2013).

4 APLICACIÓN

En este capítulo se describirá la zona de estudio; se desarrollará el análisis de datos climatológicos iniciando con la verificación de la cantidad y calidad de la información, continuando con el relleno de los datos faltantes haciendo uso de las técnicas de interpolación descritas en el capítulo dos, seguido del análisis de frecuencias de eventos extremos máximos necesario para construir las curvas intensidad-duración- periodo de retorno (i-d-Tr). Se finalizará con la caracterización de los trenes de lluvia para longitudes de tres a 10 días, ya que en México son los causantes de la erosión del suelo; y la obtención del factor erosivo, el aporte de sedimentos y la determinación del nivel de pérdida de suelo para la subcuenca en estudio considerando alturas de precipitación puntuales y trenes de lluvia.



4.1 Descripción del área en estudio

La Figura 4.1 realizada con información obtenida de INEGI (2010) y CENAPRED (2013) muestra el área de estudio, misma que se limita a la subcuenca del río Apatlaco (RH18Fd) ubicada dentro de la cuenca del río Grande de Amacuzac (RH18F) perteneciente a la Región Hidrológica Balsas (RH18); comprende en mayor extensión el estado de Morelos, y pequeñas porciones del Estado de México y Distrito Federal. Se localiza en la región del Eje Neovolcánico clasificada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) como potencial de deslizamiento de laderas, Figura 4.2.

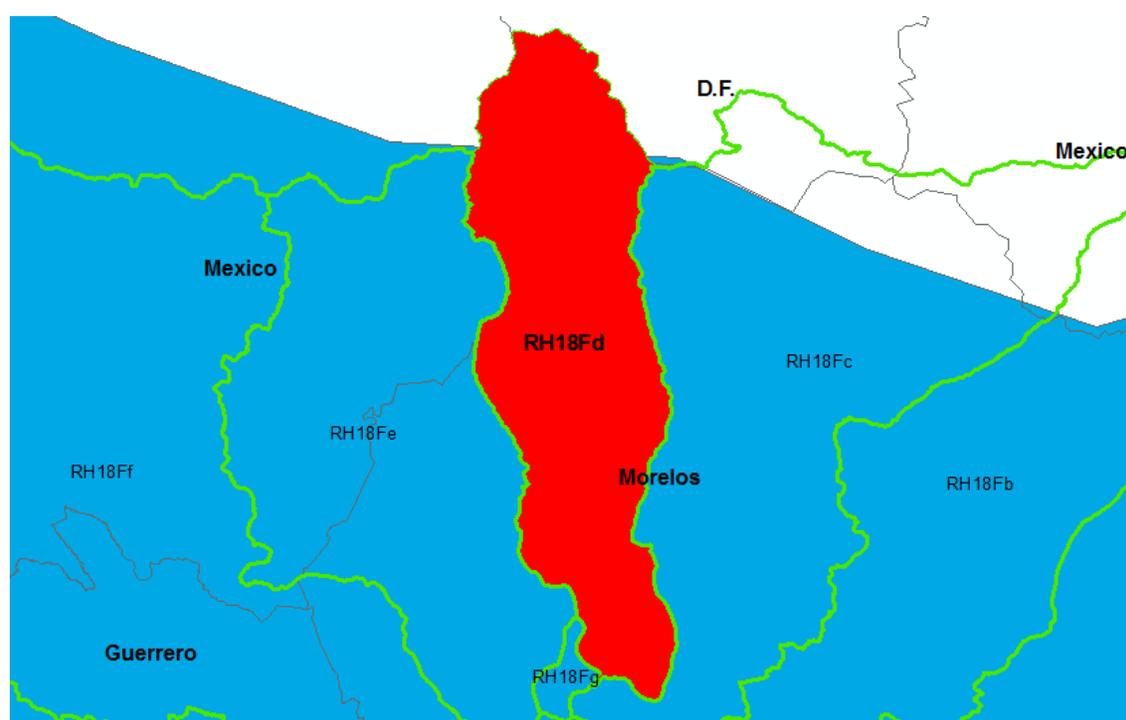


Figura 4.1. Localización de la subcuenca del río Apatlaco (RH18Fd).

El río Apatlaco nace en el arroyo o barranca denominada Chalchihuapan, al noroeste de Cuernavaca y suroeste del Municipio de Huitzilac, y desemboca en el río Yautepec dentro de la subcuenca del río Yautepec (RH18Fc) afluente del río Amacuzac que finalmente descarga al río Balsas.

La superficie de la subcuenca es de 809.95 Km², de los cuales 660.83 Km² (81.59 %) se ubican dentro del estado de Morelos, 85.02 Km² (10.50 %) pertenecen a la delegación Tlalpan, del Distrito Federal y 64.1 Km² (7.91 %) al Estado de México.

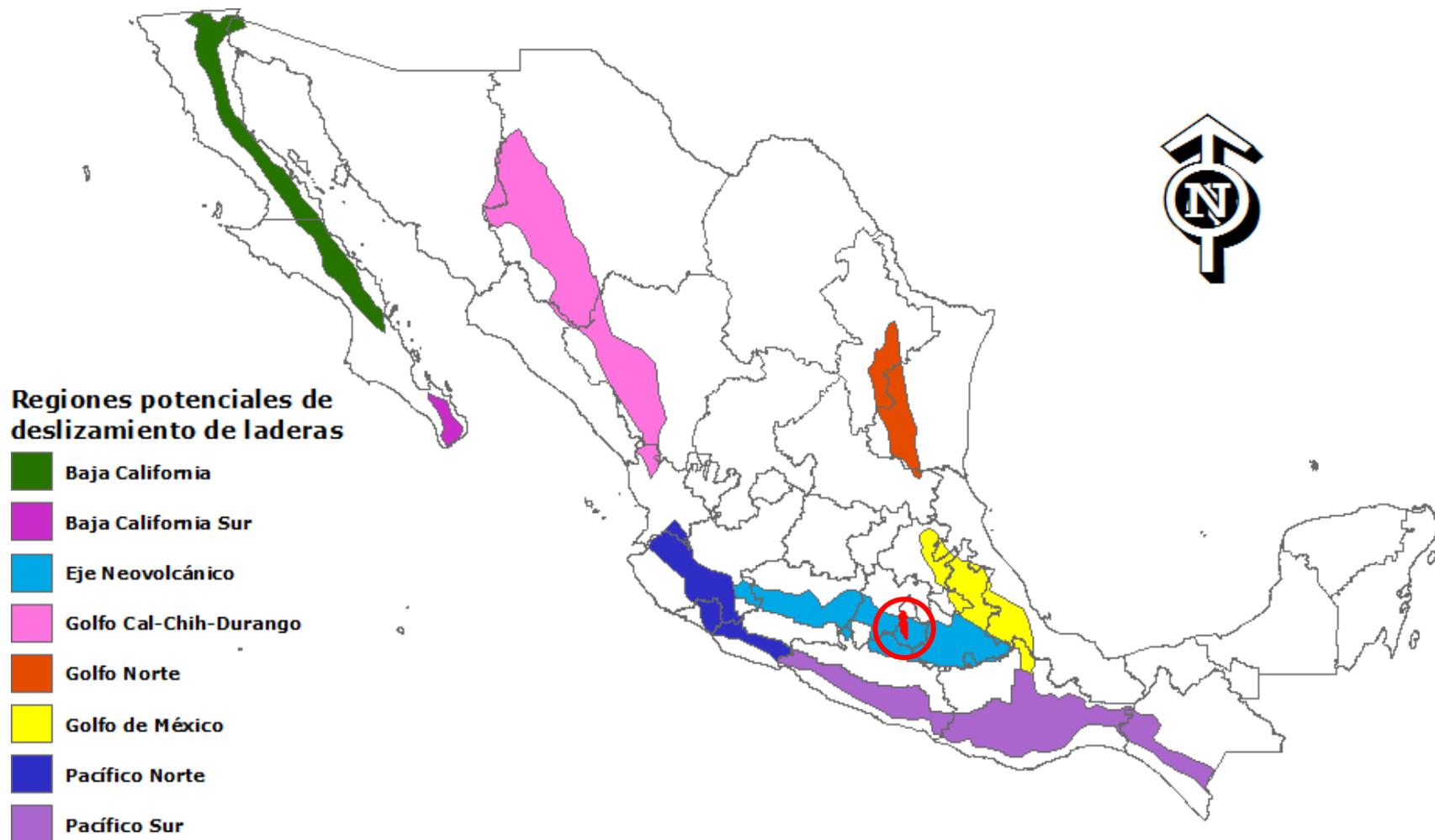


Figura 4.2. Ubicación de la subcuenca del río Apatlaco con relación a las regiones potenciales de deslizamiento de laderas.

CONAGUA (2010) menciona que la población de la subcuenca dentro del estado de Morelos es de 824,579 habitantes, esto es el 51 % a nivel estatal; aquí se encuentran 290 localidades de las cuales 23 son urbanas y 267 rurales. Los municipios con importante participación poblacional en la subcuenca son: Xochitepec, Zacatepec, Cuernavaca, Temixco, Emiliano Zapata, Huitzilac y Jiutepec.

Con relación al uso de los recursos hídricos, el volumen de extracción anual de agua superficial total en la subcuenca asciende a 199.54 hm³, de los cuales 187.53 hm³ se destinan a la agricultura, 7.98 hm³ al uso público urbano y 4.03 hm³ a la industria, Figura 4.3.

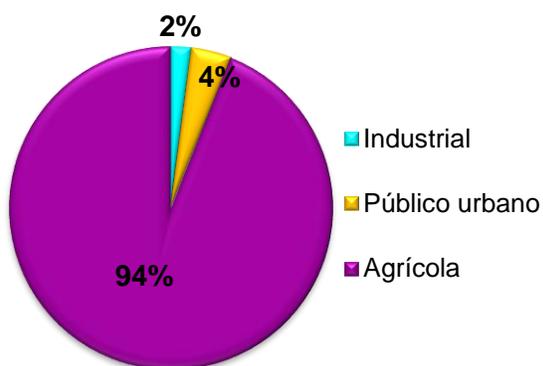


Figura 4.3. Uso de agua superficial en la subcuenca. (CONAGUA, 2010).

4.3.

Se calcula que anualmente se extrae de pozos y norias un volumen total de 186 hm³ de agua. Este volumen de extracción se satisface principalmente con agua proveniente del acuífero de Cuernavaca, del que se extraen alrededor de 168 hm³ al año, lo que representa el 90 % del total, los 18 hm³ restantes (10 %) se obtienen del acuífero de Zacatepec, Figura 4.4.



Figura 4.4. Fuentes de extracción de agua subterránea en la subcuenca del río Apatlaco.

El principal destino del agua subterránea es el uso público urbano con el 91 %, seguido del uso industrial con un 6 %, Figura 4.5.

Además, se estima que se descargan anualmente 57.11 hm³ de aguas residuales, de las cuales el 74% lo hace a fosas sépticas, pozos de absorción, ríos, arroyos y barrancas, y el 68% son de origen público urbano.

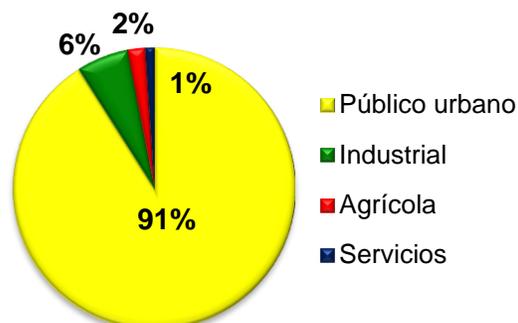


Figura 4.5. Uso de agua subterránea en la subcuenca. (CONAGUA, 2010).

Del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 Serie V (INEGI, 2013a) se obtiene la Figura 4.6 donde se muestran los usos del suelo dentro de la subcuenca, en la Tabla 4.1 se obtuvieron sus áreas correspondientes y se puede observar que el 44.3 % de la superficie total es destinada al uso agropecuario mientras que el 17.94 % pertenece a zonas urbanas y asentamientos humanos. Las principales actividades económicas son: agricultura, ganadería y silvicultura; los productos agrícolas mayormente cultivados son: caña de azúcar, nochebuena, rosa, nopales, aguacate y gladiolas.

Uso de Suelo y Vegetación	Área [km ²]	Área [%]
Agricultura	250.99	31.01
Asentamientos Humanos	52.81	6.53
Bosque de Coníferas	235.08	29.05
Bosque de Encino	6.88	0.85
Bosque Mesófilo de Montaña	17.12	2.12
Cuerpo de Agua	0.21	0.03
Pecuario (pastizal inducido)	107.58	13.29
Selva Caducifolia	46.29	5.72
Zona Urbana	92.37	11.41
Total general	809.32*	100.00

Tabla 4.1. Áreas por uso de suelo y vegetación dentro de la subcuenca del río Apatlaco. (INEGI, 2013a).

*La diferencia entre el área de la subcuenca (809.95 km²) y el total se debe al archivo *shape* utilizado en el *software* para SIG.

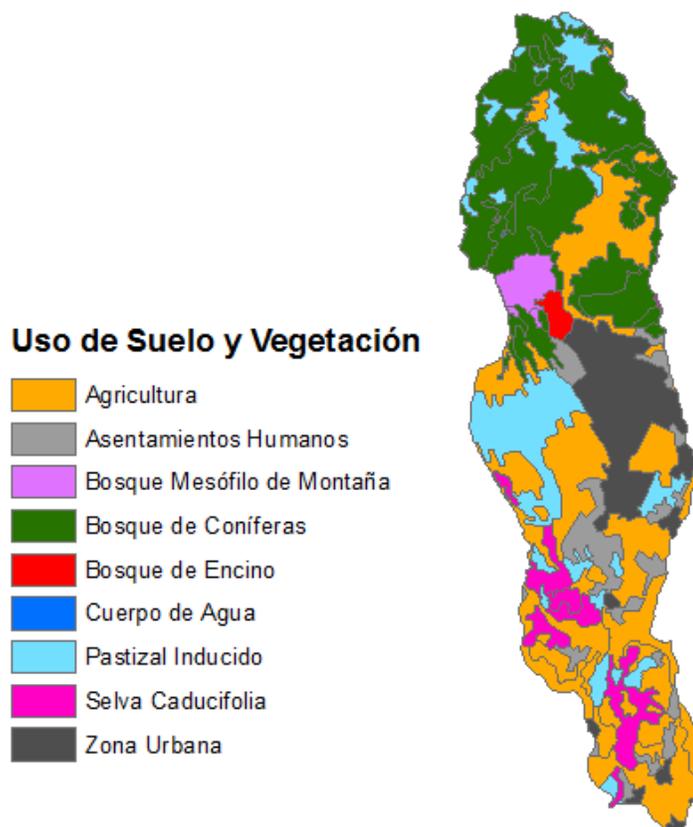


Figura 4.6. Uso de suelo y vegetación dentro de la subcuenca del río Apatlaco de acuerdo con el Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 Serie V elaborado por el INEGI. (INEGI, 2013a).

Análogamente del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 2013b) se extrae la Figura 4.7 donde se muestran los grupos de suelo de referencia dentro de la subcuenca, en la Tabla 4.2 se escribe el porcentaje de las áreas correspondientes a cada grupo. Se observa que el 54.34 % de la superficie está cubierta por suelos susceptibles a la erosión hídrica y eólica, de los cuales 39.19 % es de tipo Andosol seguido de 15.1 % de Phaeozem. Realizando una comparación entre las Figuras 4.6 y 4.7 se tiene que del área comprendida por estos dos grupos de suelo, el 48.90 % es bosque de coníferas, el 27.79 % de uso agrícola y el 13.72 % de uso pecuario.

Tipo de suelo	Símbolo	Área [km ²]	Área [%]
Andosol	AN	316.77	39.19
Leptosol	LP	53.76	6.65
Luvisol	LV	47.52	5.88
Phaeozem	PH	122.41	15.15
Regosol	RG	87.22	10.79
Vertisol	VR	88.17	10.91
Zona Urbana	-	92.37	11.42
Total		808.22*	100.00

Tabla 4.2. Áreas por tipo de suelo dentro de la subcuenca del río Apatlaco. (INEGI, 2013b).

*La diferencia entre el área de la subcuenca (809.95 km²) y el total se debe al archivo *shape* utilizado en el *software* para SIG.

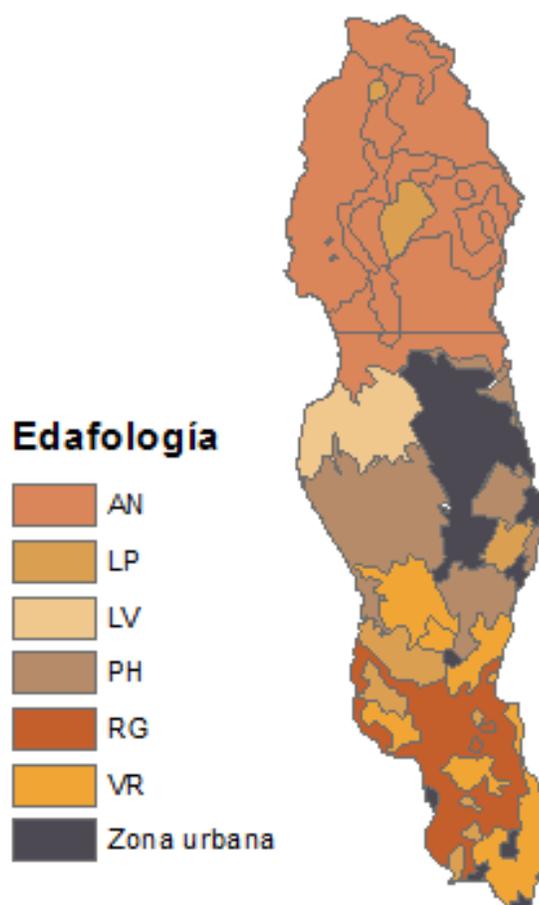


Figura 4.7. Grupos de suelo de referencia dentro de la subcuenca del río Apatlaco de acuerdo con el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico escala 1:250 000 Serie II elaborado por el INEGI. (INEGI, 2013b).

Uso de Suelo y Vegetación	Área [km²]	Área [%]
Agricultura	122.05	27.79
Asentamientos Humanos	15.10	3.44
Bosque de Coníferas	214.74	48.90
Bosque de Encino	6.73	1.53
Bosque Mesófilo de Montaña	17.12	3.90
Cuerpo de Agua	0.007	0.002
Pastizal Inducido	60.26	13.72
Selva Caducifolia	2.94	0.67
Zona Urbana	0.21	0.05
Total general	439.18	100.00

Tabla 4.3. Usos de suelo y vegetación correspondientes al área cubierta por los grupos de suelo Andosol y Phaeozem dentro de la subcuenca del río Apatlaco. (INEGI, 2013a).

4.2 Análisis de datos climatológicos

Dentro de la subcuenca existen 16 estaciones climatológicas, dos pertenecientes al Estado de México (15354, 15173), y 14 dentro del estado de Morelos (17047, 17009, 17022, 17037, 17002, 17004, 17067, 17014, 17070, 17072, 17069, 17077, 17042, 17026). La Estación Meteorológica Automática IMTA es la más cercana a la subcuenca, es operada por el SMN y se ubica en el municipio de Jiutepec, Morelos a una altitud de 1355 msnm.

La información de las estaciones climatológicas se obtuvo de la base de datos CLIma COMputarizado (CLICOM), al analizarlas se observó que las estaciones 15354, 15173, 17009, 17037, 17067, 17070, 17072, 17069, 17077, 17042 no cuentan con información suficiente (más de 30 años de registro) para el análisis por lo que se decide no utilizarlas. Como solo 6 estaciones son útiles, para el análisis se utilizaron estaciones cercanas a la subcuenca que cuentan con una longitud de registro apropiada, estas son: 17006, 17039, 17018 y 17013.

Finalmente las estaciones 17002, 17004, 17014, 17022, 17047, 17026, 17006, 17039, 17018 y 17013 se utilizarán para el análisis de precipitaciones, Figura 4.8. La descripción de las estaciones climatológicas se muestra en la Tabla 4.4.

Clave	Nombre	Municipio	Estado	Organismo de cuenca	Inicio
17002	Colonia Empleado	Cuernavaca	Morelos	Balsas	01/01/1939
17004	Cuernavaca (DGE)	Cuernavaca	Morelos	Balsas	01/04/1955
17006	El Rodeo	Miacatlan	Morelos	Balsas	01/03/1952
17013	Temilpa	Tlaltizapan	Morelos	Balsas	01/04/1955
17014	Temixco	Temixco	Morelos	Balsas	01/04/1957
17018	Ticuman	Tlaltizapan	Morelos	Balsas	01/09/1955
17022	Tres Cumbres	Huitzilac	Morelos	Aguas del Valle de México	01/01/1961
17026	C. A. E. La Victoria	Zacatepec	Morelos	Balsas	01/01/1961
17039	San Juan Tlacotenco	Tepoztlán	Morelos	Aguas del Valle de México	01/07/1975
17047	Huitzilac (DGE)	Huitzilac	Morelos	Balsas	01/12/1961

Clave	Fin	Situación	Latitud	Longitud	Altura [msnm]
17002	31/01/2002	Operando	18°56'54"	99°13'51"	1560
17004	31/07/2006	Operando	18°50'36"	99°05'06"	1300
17006	31/12/2005	Operando	18°41'25"	99°17'10"	1431
17013	30/11/2004	Operando	18°42'21"	99°05'38"	2366
17014	31/05/2006	Operando	18°54'59"	99°22'42"	1060
17018	30/11/2004	Operando	18°45'33"	99°07'16"	1130
17022	30/09/2006	Operando	19°02'12"	99°15'29"	2800
17026	31/10/2005	Operando	18°38'12"	99°12'03"	910
17039	31/05/2006	Operando	19°02'21"	99°05'38"	2366
17047	30/06/2007	Operando	19°03'30"	99°16'27"	1049

Tabla 4.4. Descripción de las estaciones climatológicas analizadas.

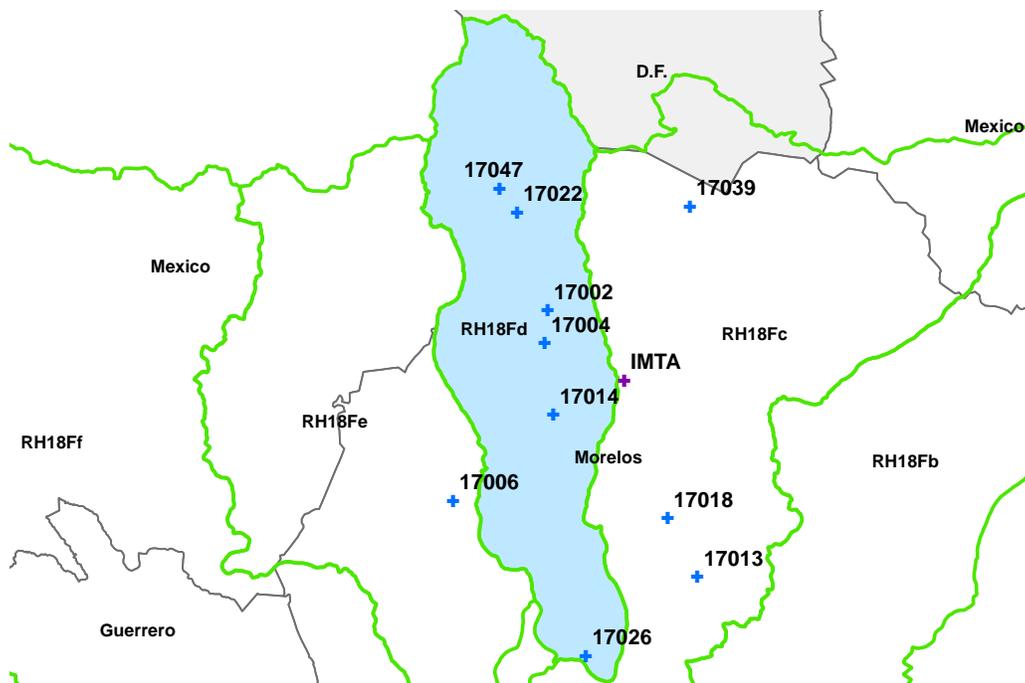


Figura 4.8. Estaciones climatológicas y EMA utilizadas en el análisis.

4.2.1 Cantidad y calidad de la información climatológica

El análisis se inició con la delimitación de la región homogénea de las estaciones climatológicas utilizando las técnicas de coeficiente de variación-L, parámetro β de la distribución General de Valores Extremos y región de influencia. Las bases de datos de precipitación diaria extraídas del CLICOM se analizaron para conocer el periodo común entre las estaciones en estudio, este comprende los años 1976, 1979, 1981, 1983, 1984, 1989, 1990, 1996, 1998 y 2001; al contar con 10 años de datos en común es factible aplicar las técnicas.

Para cada estación y cada año del periodo común se obtuvieron los diferentes atributos considerados en la delimitación de regiones homogéneas: elevación, Hp acumulada mensual, Hp acumulada anual, Hp máxima anual, número de días con Hp ligera, número de días con Hp moderada, número de días con Hp fuerte, número de días con Hp intensa, número de días con lluvia apreciable. Del análisis se concluye que la estación 17006 no es homogénea con ninguna estación mientras que, las estaciones 17018 y 17013 son homogéneas entre ellas, finalmente se considera que toda la región comprendida por las estaciones 17002, 17004, 17014, 17022, 17047, 17026, 17039, 17018 y 17013 es una sola.

Para cada estación en estudio se obtienen los valores de Hp máxima anual, Tabla 4.5, y Hp acumulada anual, Tabla 4.6, así como sus estadísticos muestrales, Tablas 4.7 y 4.8; con ellos se verifica que los datos sean variables aleatorias al realizar preliminarmente la prueba de independencia de Anderson (Escalante y Reyes, 2008) donde se utilizaron solo los años de la muestra que estuvieron completos, como los registros fueron porosos se consideró la serie más larga de cada estación. En general se observa que todas las series son independientes en las dos variables.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1956	73.3							42.0	
1957	80.0								37.1
1958	80.0	62.5	51.2					59.0	
1959	91.0	57.6							52.2
1960	59.5	63.5	60.0						40.1
1961	110.0	76.6	65.5	96.8		47.2		30.0	43.8
1962	52.0		53.0	60.5	72.0	58.8		45.0	60.9
1963	56.0		70.6	80.1	27.0	38.9		48.5	49.0
1964	74.0		45.7	40.0		34.8		30.0	62.0
1965	51.5	49.8	55.5	40.8	76.5	91.3		46.0	
1966	83.0	85.0		80.6	60.1	36.6		53.0	45.2
1967	119.2	119.2	48.3	100.5		47.1		52.0	58.0
1968		69.0	71.9	70.6	91.1	36.0		71.5	41.5
1969		68.0		70.0	89.1	65.9		81.0	
1970	55.0	55.0	42.0	80.6	80.2	53.1		35.0	31.0
1971	61.0	84.5	58.0	30.0	62.7	47.0		75.0	
1972	64.0	60.0	73.0	60.4		74.3		59.0	70.0
1973	83.0		75.5	80.4	82.5	48.2			
1974	58.0	60.5	50.5	88.0		49.9		57.0	64.0
1975	52.5	52.5	60.0	76.0	82.7			41.5	43.7
1976	127.0	129.0	57.0	124.5	68.1	61.8	147.5	78.2	54.0
1977	60.0	48.5	45.0	37.5	70.2	76.3	61.0		87.0
1978	109.3	102.5	36.5	79.5	78.0	63.4		65.5	68.4
1979	46.5	46.0	75.0	66.5	80.2	43.9	81.1	58.8	65.6
1980	107.2	71.6	58.0	106.0	85.2	65.5		76.1	64.3
1981	68.4	64.4	65.0	70.5	102.5	57.1	76.1	66.9	71.8
1982	69.5	51.8	43.0	70.0		60.6	91.4	63.2	
1983	72.0	56.8	55.0	58.0	60.3	90.0	74.0	44.7	89.8

Tabla 4.5. Valores de Hp máxima anual [mm] para las estaciones en estudio (solo se toman en cuenta los años que están completos).

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1984	92.5	59.0	42.0	81.0	74.0	64.7	59.5	68.2	48.5
1985	76.0	66.0	73.0	68.5		67.4	68.6	62.0	59.6
1986	52.7	53.3	46.0	56.5	34.5	74.2		59.6	
1987	88.4	93.0	58.5	84.5	93.0	51.3	72.7	69.6	
1988	98.3	95.4	42.0	114.0		69.9	107.3		41.4
1989	65.5	57.3	65.0	112.0	80.0	99.0	83.0	42.6	32.0
1990	61.2	83.2	40.5	83.0	78.0	44.4	70.5	48.2	46.0
1991	75.7	61.8	46.0		87.0	56.3	82.0	73.8	65.1
1992	47.6	51.3	55.0		66.0	58.9	87.0	79.4	
1993	73.6	55.6	51.0		82.0	54.3	98.3	55.5	49.0
1994	40.2	71.0	37.0		55.0	49.9	74.9	89.8	79.7
1995	67.3	64.6	69.0		157.5	57.5	68.6	89.2	85.5
1996	57.8	90.7	62.0	81.0	66.8	71.2	84.5	60.8	75.0
1997	69.5	65.3	62.0	64.5	80.3	50.1	51.5	55.8	58.2
1998	83.4	93.4	72.0	65.5	78.1	62.3	101.9	67.7	69.1
1999	99.9	82.3	88.0		93.3	66.7	76.0	40.0	89.0
2000	64.5	48.4	59.0	52.0		65.9	85.0	63.0	
2001	78.3	78.3	112.0	68.5	63.5	57.5	57.5	80.0	73.0
2002		68.0	58.0	77.0	106.4	60.5	63.9	67.4	65.0
2003		70.1	56.0		81.3			75.0	76.0
2004		108.5	68.0		80.0	64.0		82.0	82.0
2005		82.6	104.0		78.1	54.2	80.0	85.0	68.7
2006		69.7	62.0		82.5	72.1	55.6	78.0	48.0
2007		62.8	60.0		98.5		70.0		61.5
2008		99.4	64.0		79.9	71.3	99.0	68.0	62.0
2009		61.0	80.0		80.0	48.4	99.0	86.0	66.0
2010		77.3	64.0		140.1	60.7	160.6	57.0	68.0
2011		88.0	60.0		103.7	109.0	218.3	77.0	66.0
2012		63.5			89.3	45.6		58.0	
2013			64.0						

Tabla 4.5. Valores de Hp máxima anual [mm] para las estaciones en estudio (solo se toman en cuenta los años que están completos). Continuación.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1956	1315.6							686.3	
1957	1087.6								711.5
1958	1888.8	1833.5	1236					1326.5	
1959	1224.2	1027.3							965.8
1960	1034.3	1037.9	781.7						678

Tabla 4.6. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio (solo se toman en cuenta los años que están completos).

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1961	1311.2	1151.6	1000.5	2209.6		759.6		495.5	870.7
1962	1194.4		919.2	1827.7	1524.6	715		643	865.7
1963	1195.8		942.9	2316.3	760.5	828.8		715.8	846.6
1964	1296.5		845.3	1724.9		799.9		730.5	829.6
1965	1206.7	1152.9	917.1	1605.3	1390.2	1000.7		989	
1966	1143.3	1198.6		1712.3	1344.5	699		898.5	831
1967	1535.2	1508.2	1077.9	2193		941.3		867.1	944.3
1968		1219.3	859.8	1448	1623.4	737.8		882.5	714.6
1969		1170.3		1698.7	1609.9	772.5		1064.3	
1970	1217.7	966.2	693.7	1232	1140	709.2		649.5	676.8
1971	1400.5	1386.6	1058.8	1128.6	1158.3	972.5		1061	
1972	1179.6	1076.7	805	1622.3		747.1		661.8	611
1973	1473.7		1114.5	3195.2	2041.8	886.7			
1974	1030.3	1085.9	782.5	1964.6		871.7		768.8	834.6
1975	1126.1	1097.8	904.5	1551	1566.3			752.5	923.4
1976	1678.5	1635	1035.2	1943.5	1900.9	925.1	2040.2	803	816.5
1977	1069.5	954.1	805.5	1217	1518.3	982.4	1470.3		913.3
1978	1395.9	1388.5	850	1426.5	1596	930.4		901.3	932
1979	910.1	849.8	775.5	1127.5	1427.1	745.9	1183	778.4	760.3
1980	1328.8	1227.7	1001.6	1600	1865.1	809.5		952.2	924.2
1981	1635.8	1597.6	1159.1	1834.5	1876.6	1081	2097.8	1244.1	1154.9
1982	981.3	934.1	547	1276.5		616.2	1060.1	762.3	
1983	1239.5	1230.8	1021.1	1393	1628.1	782.4	1465.1	760.83	824.1
1984	1185.5	1228.6	786.1	1455.8	1247.9	865.6	1697.8	947.8	865.6
1985	1350.5	1266.5	1045.5	1250.5		1048	1499.1	1034.4	1108.6
1986	920	1308.8	777.1	1125	1416.9	680		770.3	
1987	1277.2	1291.7	648	1521.5	1596.3	858.5	1369.4	996.4	
1988	1087.7	1084.3	706	1581		734.6	1620.7		543.7
1989	1076.9	1062.6	667.5	1028.1	1314.6	1245	1346.2	698.8	582.5
1990	1483.5	1496.1	1165.5	1547	1881.9	1084	1927.8	1171.6	1081.7
1991	1279.9	1273.2	884.5		1384	803.1	1616.9	1175.1	942.8
1992	1172.3	1361.8	1055.5		1614	893.2	1637.4	1204.4	
1993	934.3	1121.8	872		1488.6	692.3	1670.9	867.9	769.9
1994	768.9	1109	742		1465.3	754.9	1532.7	771.9	807.4
1995	1489.6	1692	1262.5		1831.6	1129	1515	1259.9	1351.5
1996	1022.9	1076.5	824.1	1378	1521	731.7	1504.2	951.1	1269.2
1997	1166.8	1344.6	879	1658.5	1571.2	955.7	1393.2	1042.5	948.5
1998	1475.8	1766.7	1058	1476.5	1609.1	872.3	1892.1	1170.7	1221.6
1999	1283	1375.4	1023		1377	1000.1	1372.7	952.9	892.4

Tabla 4.6. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio (solo se toman en cuenta los años que están completos). Continuación.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
2000	987.4	1095.8	982.5	1162.1		633.9	1545.5	742.5	
2001	1302.9	1303.4	997.5	1438	1674.1	952.1	1583.1	1249	1127.7
2002		1384.3	1031	1726.5	2018.4	792.4	1704	894.7	925.6
2003		1486.6	1299.3		1910.6			1079.9	1221.1
2004		1474.3	1124.5		1932	968.4		1135.5	1181.4
2005		1142	811		1590.2	662.8	1359.6	736.5	655.7
2006		1327.6	1051.6		1886.1	819.3	1051.2	898.3	851.2
2007			908.5		1706.9		1351.6		780.9
2008		1693.3	1296.8		1600.8	1065.6	1854.5	996	930.8
2009		1284.7	1099		1437.1	1006.9	1651.6	998	1044
2010		1663.4	1228		2086.7	902.3	2021.4	1128.1	1334.7
2011		1432.2	953.6		1580.3	777.1	1901.6	1010.5	826.6
2012		1250.8			1373.9	848.2		972	
2013			1216.5						

Tabla 4.6. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio (solo se toman en cuenta los años que están completos). Continuación.

Estadísticos Muestrales	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
Número de datos	44	51	52	36	43	49	31	50	45
Media	73.98	71.67	60.29	74.33	80.87	60.31	87.30	62.35	60.75
Varianza	413.31	351.72	223.43	451.58	476.87	238.35	1153.29	240.39	230.38
Desviación estándar	20.33	18.75	14.95	21.25	21.84	15.44	33.96	15.50	15.18
Coficiente de asimetría	0.77	1.07	1.17	0.20	0.95	0.97	2.44	-0.22	-0.01
Curtosis	3.13	3.91	5.64	3.30	7.27	4.55	10.15	2.31	2.38

Tabla 4.7. Estadísticos muestrales para las estaciones en estudio de la variable Hp máxima anual.

Estadísticos Muestrales	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
Número de datos	44	50	52	36	43	49	31	50	45
Media	1235.59	1282.57	952.51	1599.90	1583.44	859.01	1578.60	925.03	908.76
Varianza	49268.30	52238.16	31680.86	174710.81	71148.37	19706.07	71704.19	37089.23	38174.69
Desviación estándar	221.96	228.56	177.99	417.98	266.74	140.38	267.78	192.59	195.38
Coeficiente de asimetría	0.57	0.53	0.05	1.73	-0.40	0.51	0.09	0.12	0.49
Curtosis	3.78	2.78	2.46	7.96	3.98	2.84	2.73	2.32	2.87

Tabla 4.8. Estadísticos muestrales para las estaciones en estudio de la variable Hp acumulada anual.

4.2.2 Rellenado de datos

El relleno de las nueve estaciones en estudio se realizó con el método de la interpolación inversa al cuadrado, subcapítulo 2.2.3, para empleo de esta técnica se hace uso de la ubicación de las estaciones en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), Tabla 4.9.

Para esto se comenzó por rellenar la estación con mayor longitud de registro, 17014, interpolando las estaciones que tuvieran precipitaciones del mismo orden para así no sub o sobreestimar los eventos; analizando los días en los que la precipitación estimada era muy baja y revisando con las estaciones más cercanas se decidió tomar en cuenta el valor o considerarlo cero para preservar la tendencia de las series. Las bases de datos rellenas para las variables Hp máxima anual y Hp acumulada anual, así como sus estadísticos muestrales se presentan en las Tablas 4.10 a 4.13.

Estación	X [UTM]	Y [UTM]
17018	487234.835	2074184.5
17013	490100.966	2068281.7
17026	478816.824	2060638.1
17039	490120.515	2105163.8
17047	471153.971	2107304.5
17022	472845.562	2104904.5
17014	476064.118	2084737.5
17004	475341.971	2091838.3
17002	475697.276	2095126.6

Tabla 4.9. Coordenadas de las estaciones en estudio en el sistema UTM.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1956	73.7	66.7	62.8	114.5	113.2	48.4	96.5	42.0	35.9
1957	80.0	58.7	70.4	61.0	60.6	36.0	53.3	33.0	37.1
1958	80.0	62.5	51.2	61.3	60.9	36.6	54.2	59.0	65.5
1959	91.0	57.6	60.0	54.0	53.9	52.3	53.6	62.0	52.2
1960	59.5	63.5	60.0	39.7	39.3	24.6	35.6	50.0	40.1
1961	110.0	76.6	65.5	96.8	91.3	47.2	76.6	30.0	43.8
1962	52.0	46.1	53.0	60.5	72.0	58.8	30.9	45.0	60.9
1963	56.0	44.1	70.6	80.1	27.0	38.9	32.7	48.5	49.0
1964	74.0	62.0	45.7	40.0	35.0	34.8	33.6	30.0	62.0
1965	51.5	49.8	55.5	40.8	76.5	91.3	34.7	46.0	41.0
1966	83.0	85.0	48.8	80.6	60.1	36.6	39.1	53.0	45.2
1967	119.2	119.2	48.3	100.5	95.4	47.1	78.9	52.0	58.0
1968	69.0	69.0	71.9	70.6	91.1	36.0	49.4	71.5	41.5
1969	56.8	68.0	50.4	70.0	89.1	65.9	47.5	81.0	45.0
1970	55.0	55.0	42.0	80.6	80.2	53.1	35.9	35.0	31.0
1971	61.0	84.5	58.0	30.0	62.7	47.0	34.4	75.0	74.0
1972	64.0	60.0	73.0	60.4	74.3	74.3	38.7	59.0	70.0
1973	83.0	80.4	75.5	80.4	82.5	48.2	57.5	84.0	45.0
1974	58.0	60.5	50.5	88.0	46.1	49.9	35.9	57.0	64.0
1975	52.5	52.5	60.0	76.0	82.7	64.4	80.9	41.5	43.7
1976	127.0	129.0	57.0	124.5	68.1	61.8	147.5	78.2	54.0
1977	60.0	48.5	45.0	37.5	70.2	76.3	61.0	41.6	87.0
1978	109.3	102.5	36.5	79.5	78.0	63.4	118.0	65.5	68.4
1979	46.5	46.0	75.0	66.5	80.2	43.9	81.1	58.8	65.6
1980	107.2	71.6	58.0	106.0	85.2	65.5	85.0	76.1	64.3
1981	68.4	64.4	65.0	70.5	102.5	57.1	76.1	66.9	71.8
1982	69.5	51.8	43.0	70.0	81.5	60.6	91.4	63.2	64.9

Tabla 4.10. Valores de Hp máxima anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1983	72.0	56.8	55.0	58.0	60.3	90.0	74.0	44.7	89.8
1984	92.5	59.0	42.0	81.0	74.0	64.7	59.5	68.2	48.5
1985	76.0	66.0	73.0	68.5	59.5	67.4	68.6	62.0	59.6
1986	52.7	53.3	46.0	56.5	34.5	74.2	83.5	59.6	48.5
1987	88.4	93.0	58.5	84.5	93.0	51.3	72.7	69.6	80.0
1988	98.3	95.4	42.0	114.0	123.9	69.9	107.3	73.4	41.4
1989	65.5	57.3	65.0	112.0	80.0	99.0	83.0	42.6	32.0
1990	61.2	83.2	40.5	83.0	78.0	44.4	70.5	48.2	46.0
1991	75.7	61.8	46.0	78.7	87.0	56.3	82.0	73.8	65.1
1992	47.6	51.3	55.0	60.4	66.0	58.9	87.0	79.4	75.4
1993	73.6	55.6	51.0	69.0	82.0	54.3	98.3	55.5	49.0
1994	40.2	71.0	37.0	52.0	55.0	49.9	74.9	89.8	79.7
1995	67.3	64.6	69.0	134.3	157.5	57.5	68.6	89.2	85.5
1996	57.8	90.7	62.0	81.0	66.8	71.2	84.5	60.8	75.0
1997	69.5	65.3	62.0	64.5	80.3	50.1	51.5	55.8	58.2
1998	83.4	93.4	72.0	65.5	78.1	62.3	101.9	67.7	69.1
1999	99.9	82.3	88.0	87.5	93.3	66.7	76.0	40.0	89.0
2000	64.5	48.4	59.0	52.0	66.3	65.9	85.0	63.0	62.5
2001	78.3	78.3	112.0	68.5	63.5	57.5	57.5	80.0	73.0
2002	58.8	68.0	58.0	77.0	106.4	60.5	63.9	67.4	65.0
2003	64.7	70.1	56.0	61.0	81.3	64.6	79.0	75.0	76.0
2004	84.8	108.5	68.0	66.0	80.0	64.0	75.0	82.0	82.0
2005	78.9	82.6	104.0	72.0	78.1	54.2	80.0	85.0	68.7
2006	59.0	69.7	62.0	78.0	82.5	72.1	55.6	78.0	48.0
2007	47.4	44.4	60.0	89.3	98.5	60.0	70.0	36.0	61.5
2008	85.7	99.4	64.0	73.0	79.9	71.3	99.0	68.0	62.0
2009	55.2	61.0	80.0	70.1	80.0	48.4	99.0	86.0	66.0
2010	72.3	77.3	64.0	130.1	140.1	60.7	160.6	57.0	68.0
2011	86.3	88.0	60.0	96.1	103.7	109.0	218.3	77.0	66.0
2012	61.6	63.5	73.0	80.6	89.3	45.6	95.0	58.0	52.3
2013	92.1	103.2	64.0	111.7	124.1	62.2	67.4	34.0	34.8

Tabla 4.10. Valores de Hp máxima anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado. Continuación.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1956	1315.6	994.2	1090.7	1293.5	1285.3	859.7	1193.6	686.3	752.4
1957	1087.6	799.8	693.9	819.6	810.6	607.6	757.8	484.5	711.5
1958	1888.8	1833.5	1236.0	1667.0	1659.8	1369.1	1600.6	1326.5	1409.6
1959	1224.2	1027.3	1039.2	1049.5	1047.8	894.0	1018.2	818.4	965.8

Tabla 4.11. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
1960	1034.3	1037.9	781.7	918.0	904.4	637.4	856.9	523.4	678.0
1961	1311.2	1151.6	1000.5	2209.6	1878.9	759.6	1362.9	495.5	870.7
1962	1194.4	838.5	919.2	1827.7	1524.6	715.0	1130.1	643.0	865.7
1963	1195.8	873.2	942.9	2316.3	760.5	828.8	1092.8	715.8	846.6
1964	1296.5	1328.0	845.3	1724.9	1234.3	799.9	1154.4	730.5	829.6
1965	1206.7	1152.9	917.1	1605.3	1390.2	1000.7	1123.0	989.0	836.3
1966	1143.3	1198.6	858.7	1712.3	1344.5	699.0	1141.6	898.5	831.0
1967	1535.2	1508.2	1077.9	2193.0	1890.3	941.3	1484.4	867.1	944.3
1968	1218.0	1219.3	859.8	1448.0	1623.4	737.8	1088.4	882.5	714.6
1969	1109.6	1170.3	846.2	1698.7	1609.9	772.5	1192.3	1064.3	765.2
1970	1217.7	966.2	693.7	1232.0	1140.0	709.2	949.2	649.5	676.8
1971	1400.5	1386.6	1058.8	1128.6	1158.3	972.5	1097.5	1061.0	1082.8
1972	1179.6	1076.7	805.0	1622.3	1316.4	747.1	1073.4	661.8	611.0
1973	1473.7	1562.8	1114.5	3195.2	2041.8	886.7	1754.8	910.0	972.4
1974	1030.3	1085.9	782.5	1964.6	1431.6	871.7	1161.2	768.8	834.6
1975	1126.1	1097.8	904.5	1551.0	1566.3	729.2	1610.6	752.5	923.4
1976	1678.5	1635.0	1035.2	1943.5	1900.9	925.1	2040.2	803.0	816.5
1977	1069.5	954.1	805.5	1217.0	1518.3	982.4	1470.3	821.0	913.3
1978	1395.9	1388.5	850.0	1426.5	1596.0	930.4	1734.8	901.3	932.0
1979	910.1	849.8	775.5	1127.5	1427.1	745.9	1183.0	778.4	760.3
1980	1328.8	1227.7	1001.6	1600.0	1865.1	809.5	1655.8	952.2	924.2
1981	1635.8	1597.6	1159.1	1834.5	1876.6	1081.0	2097.8	1244.1	1154.9
1982	981.3	934.1	547.0	1276.5	1288.3	616.2	1060.1	762.3	585.6
1983	1239.5	1230.8	1021.1	1393.0	1628.1	782.4	1465.1	760.8	824.1
1984	1185.5	1228.6	786.1	1455.8	1247.9	865.6	1697.8	947.8	865.6
1985	1350.5	1266.5	1045.5	1250.5	1233.6	1048.0	1499.1	1034.4	1108.6
1986	920.0	1308.8	777.1	1125.0	1416.9	680.0	1528.3	770.3	727.7
1987	1277.2	1291.7	648.0	1521.5	1596.3	858.5	1369.4	996.4	735.5
1988	1087.7	1084.3	706.0	1581.0	1743.0	734.6	1620.7	948.1	543.7
1989	1076.9	1062.6	667.5	1028.1	1314.6	1245.0	1346.2	698.8	582.5
1990	1483.5	1496.1	1165.5	1547.0	1881.9	1084.0	1927.8	1171.6	1081.7
1991	1279.9	1273.2	884.5	1305.0	1384.0	803.1	1616.9	1175.1	942.8
1992	1172.3	1361.8	1055.5	1371.1	1614.0	893.2	1637.4	1204.4	588.7
1993	934.3	1121.8	872.0	1294.6	1488.6	692.3	1670.9	867.9	769.9
1994	768.9	1109.0	742.0	1265.8	1465.3	754.9	1532.7	771.9	807.4
1995	1489.6	1692.0	1262.5	1627.5	1831.6	1129.0	1515.0	1259.9	1351.5
1996	1022.9	1076.5	824.1	1378.0	1521.0	731.7	1504.2	951.1	1269.2
1997	1166.8	1344.6	879.0	1658.5	1571.2	955.7	1393.2	1042.5	948.5
1998	1475.8	1766.7	1058.0	1476.5	1609.1	872.3	1892.1	1170.7	1221.6
1999	1283.0	1375.4	1023.0	1334.2	1377.0	1000.1	1372.7	952.9	892.4

Tabla 4.11. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado. Continuación.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
2000	987.4	1095.8	982.5	1162.1	1443.9	633.9	1545.5	742.5	631.0
2001	1302.9	1303.4	997.5	1438.0	1674.1	952.1	1583.1	1249.0	1127.7
2002	1318.9	1384.3	1031.0	1726.5	2018.4	792.4	1704.0	894.7	925.6
2003	1448.7	1486.6	1299.3	1845.7	1910.6	904.9	1793.9	1079.9	1221.1
2004	1394.5	1474.3	1124.5	1670.1	1932.0	968.4	1726.3	1135.5	1181.4
2005	1096.8	1142.0	811.0	1500.7	1590.2	662.8	1359.6	736.5	655.7
2006	1282.8	1327.6	1051.6	1734.7	1886.1	819.3	1051.2	898.3	851.2
2007	1102.1	1075.2	908.5	1527.5	1706.9	899.8	1351.6	841.0	780.9
2008	1551.7	1693.3	1296.8	1450.1	1600.8	1065.6	1854.5	996.0	930.8
2009	1201.4	1284.7	1099.0	1252.5	1437.1	1006.9	1651.6	998.0	1044.0
2010	1586.1	1663.4	1228.0	1897.7	2086.7	902.3	2021.4	1128.1	1334.7
2011	1325.8	1432.2	953.6	1404.2	1580.3	777.1	1901.6	1010.5	826.6
2012	1133.1	1250.8	979.3	1151.0	1373.9	848.2	1613.4	972.0	798.8
2013	1419.7	1537.2	1216.5	1613.0	1801.1	791.8	1347.8	788.0	835.0

Tabla 4.11. Valores de Hp acumulada anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado. Continuación.

	Estaciones								
Estadísticos muestrales	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
Número de datos	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Media	72.90	70.65	60.36	76.14	79.35	58.69	74.30	60.89	59.63
Varianza	360.41	367.79	208.68	512.90	566.18	244.93	1074.94	266.47	232.68
Desviación estándar	18.98	19.18	14.45	22.65	23.79	15.65	32.79	16.32	15.25
Coficiente de asimetría	0.80	0.97	1.15	0.56	0.65	0.74	1.82	-0.15	0.03
Curtosis	3.37	3.65	5.74	3.38	4.86	4.56	9.07	2.08	2.20

Tabla 4.12. Estadísticos muestrales para las estaciones en estudio rellenas con el método de la interpolación inversa al cuadrado de la variable Hp máxima anual.

	Estaciones								
Estadísticos Muestrales	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17039	17018	17013
Número de datos	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Media	1250.95	1260.99	948.94	1527.41	1535.47	858.37	1451.39	903.20	889.91
Varianza	44112.74	59685.38	30338.42	145104.95	87620.76	23591.72	97809.38	38488.81	41385.13
Desviación estándar	210.03	244.31	174.18	380.93	296.01	153.60	312.74	196.19	203.43
Coefficiente de asimetría	0.45	0.32	0.06	1.57	-0.42	0.86	-0.04	0.07	0.67
Curtosis	3.60	2.60	2.50	8.47	3.17	4.21	2.37	2.61	3.09

Tabla 4.13. Estadísticos muestrales para las estaciones en estudio rellenas con el método de la interpolación inversa al cuadrado de la variable Hp acumulada anual.

Posterior al relleno de las muestras nuevamente se realizó la prueba de independencia de Anderson (Escalante y Reyes, 2008), se obtuvieron 58 valores de r_k para cada serie arrojando como resultado que las muestras fueron independientes en las variables Hp máxima anual y Hp acumulada anual.

Estación	T-Student	Cramer	Helmert	Pettitt	Normal Estándar	Buishand	Von Newman	Fisher	Conclusión
17002	H	H	NH	H	H	H	H	H	Homogénea
17004	H	H	NH	H	H	H	H	H	Homogénea
17014	H	H	H	NH	NH	NH	H	H	Homogénea
17022	H	H	H	H	H	H	H	H	Homogénea
17047	NH	NH	H	NH	NH	NH	H	H	No Homogénea
17026	NH	NH	H	NH	NH	NH	H	NH	No Homogénea
17039	NH	NH	NH	NH	NH	NH	NH	H	No Homogénea
17018	NH	NH	H	NH	NH	NH	H	H	No Homogénea
17013	H	NH	NH	NH	NH	NH	NH	H	No Homogénea

H: Homogénea; NH: No Homogénea

Tabla 4.14. Resultados de las pruebas de homogeneidad para las estaciones en estudio.

Para verificar que las series de datos de las estaciones en estudio sean homogéneas, es decir correspondan a procesos estacionarios, se realizaron las pruebas de homogeneidad: T-Student, Cramer, Helmert, Pettitt, Normal Estándar, Buishand, Von Newman y Fisher (Escalante y Reyes, 2008); sus resultados se muestran en la Tabla 4.14 e indican que las series de las estaciones 17002, 17004, 17014 y 17022 son estacionarias; mientras que las estaciones restantes ya presentan cambio, es decir, son no homogéneas.

El análisis de tendencia de las series se realizó con la prueba de Mann Kendall para un nivel de significancia de 5 %, Tabla 4.15; se observa que la precipitación acumulada anual en la estación 17004 presenta un incremento, las estaciones que resultaron no homogéneas ya muestran una tendencia creciente, por lo tanto los resultados del análisis de frecuencias para estas estaciones deben tomarse con reserva.

Estación	Hp acumulada anual	Hp máxima anual
17002	Sin tendencia	Sin tendencia
17004	Tendencia creciente	Sin tendencia
17014	Sin tendencia	Sin tendencia
17022	Sin tendencia	Sin tendencia
17047	Tendencia creciente	Tendencia creciente
17039	Tendencia creciente	Tendencia creciente
17026	Sin tendencia	Tendencia creciente
17018	Tendencia creciente	Tendencia creciente
17013	Tendencia creciente	Tendencia creciente

Tabla 4.15. Resultados de las pruebas de tendencia en la variable Hp máxima anual para cada estación en estudio.

Al contar con los registros completos de las estaciones en estudio y verificando que la información es de calidad, se obtuvo la precipitación media de la subcuenca por el método de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1992), Figura 4.10, esta fue de 1232.12 mm por año y se comprobó que es un proceso homogéneo y no presenta tendencia.

Al trazar los polígonos, Figura 4.9, se observa que las estaciones 17039 y 17013 no pertenecen a la subcuenca en estudio por lo tanto se decide eliminarlas de los análisis posteriores; las áreas de influencia de cada estación se muestran en la Tabla 4.16.

Estación	Área [km ²]
17002	82.32
17004	97.50
17014	191.95
17022	93.56
17047	221.72
17026	104.41
17018	17.87
Total	809.32

Tabla 4.16. Áreas de influencia de las estaciones en estudio dentro de la subcuenca del río Apatlaco.

Polígonos de Thiessen

- 17002
- 17004
- 17014
- 17018
- 17022
- 17026
- 17047

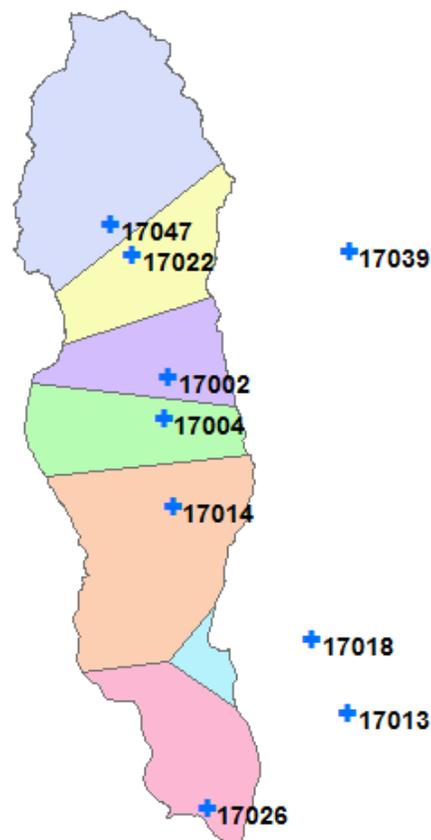


Figura 4.9. Polígonos de Thiessen para la subcuenca en estudio.

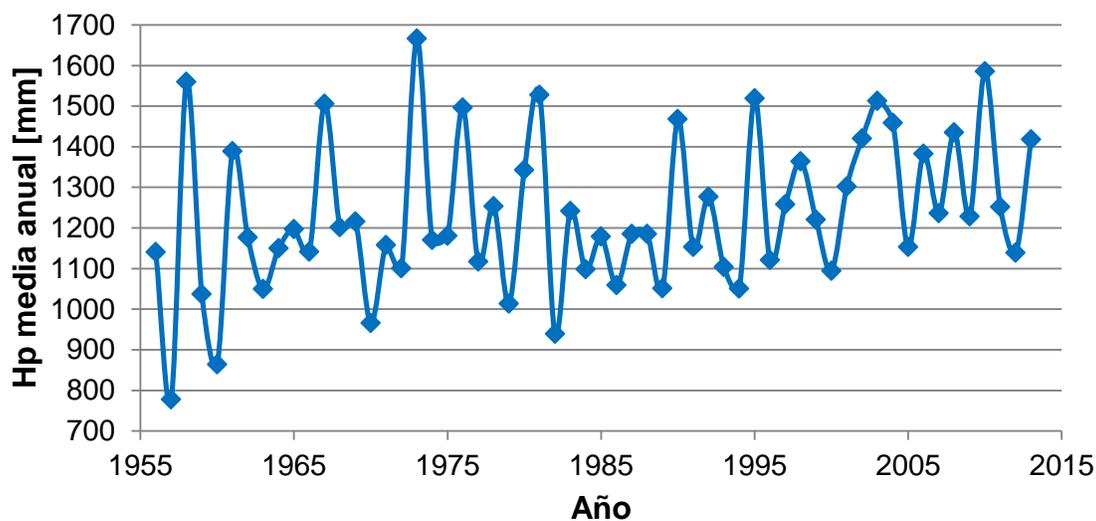


Figura 4.10. Precipitación media anual histórica en la subcuenca del río Apatlaco.

4.2.3 Análisis de frecuencias de eventos extremos máximos

El análisis de frecuencias de eventos máximos se realizó utilizando las distribuciones: Exponencial 1P, Exponencial 2P, Normal, Lognormal 2P, Lognormal 3P, Gamma 2P, Gamma 3P, Gumbel y GVE por la técnica de Momentos (Escalante y Reyes, 2008). Los eventos de diseño para diferentes periodos de retorno, la distribución con la cual fueron obtenidos y el Error Estándar de Ajuste (Escalante y Reyes, 2008) correspondiente se muestran en la Tabla 4.17.

Tr	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
2	79.22	76.44	65.51	82.28	85.55	64.04	69.24
5	98.37	96.26	79.93	106.60	112.07	80.39	85.08
10	110.67	108.77	89.49	122.07	129.08	90.55	92.73
20	122.18	120.30	98.66	136.53	145.05	99.89	98.47
50	136.70	134.64	110.55	154.85	165.39	111.56	104.14
100	147.29	145.03	119.46	168.40	180.51	120.09	107.37
500	170.86	168.24	140.08	199.57	215.47	139.39	112.52
1000	180.61	177.96	148.95	213.03	230.64	147.61	114.01
Distribución	GVE	Gamma 3P	Gumbel	Lognormal 2P	Lognormal 2P	Lognormal 2P	GVE
EEA	2.13	2.49	3.36	3.90	6.07	3.90	2.00

Tabla 4.17. Eventos de diseño obtenidos del análisis de frecuencias de eventos máximos para diferentes periodos de retorno en [mm].

4.2.4 Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (i-d-Tr)

El cálculo de las i-d-Tr se realizó con el método empírico del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-USA) (Escalante, 2013) debido a que solo se contó con información pluviométrica; los valores promedio de los días con lluvia apreciable en el año y de Hp máxima en 24 horas de las series rellenadas se mantuvieron en el orden de los valores registrados, Tabla 4.18.

Estaciones	Días con lluvia apreciable	Días con lluvia apreciable (registro rellenado)	Hp máxima en 24 horas [mm]	Hp máxima en 24 horas (registro rellenado) [mm]
17002	89	89	83.60	82.38
17004	93	93	80.99	79.84
17014	76	76	68.13	68.20
17022	101	99	83.99	86.04
17047	105	106	91.38	89.67
17026	77	77	68.15	66.32
17018	75	75	70.46	68.80

Tabla 4.18. Valores promedio de días con lluvia apreciable en el año y hp máxima anual de los registros reales y rellenados para las estaciones en estudio.

Se obtuvo también el valor del porcentaje de la lluvia de 24 horas que precipita en una hora, R, Tabla 4.19. En México el valor máximo de esta relación, en promedio, es de 0.7, de los resultados obtenidos se puede inferir que la probabilidad de inundación en la zona es alta.

Estación	R
17002	0.598
17004	0.607
17014	0.626
17022	0.593
17047	0.586
17026	0.628
17018	0.595

Tabla 4.19. Valor del coeficiente R para las estaciones en estudio.

Los valores y las gráficas de las curvas i-d-Tr para las estaciones en estudio se muestran en las Tablas 4.20 a 4.33 y las Figuras 4.11 a 4.24.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	91.01	113.01	127.14	140.37	157.05	169.21
20	76.79	95.35	107.28	118.44	132.51	142.77
30	67.31	83.58	94.03	103.82	116.15	125.15
40	58.30	72.40	81.45	89.93	100.61	108.40
50	51.76	64.28	72.31	79.84	89.32	96.24
60	47.40	58.86	66.22	73.11	81.80	88.13

Tabla 4.20. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17002.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	47.40	58.86	66.22	73.11	81.80	88.13
2	24.39	30.29	34.08	37.62	42.09	45.35
3	16.72	20.77	23.36	25.79	28.86	31.09
4	12.89	16.00	18.00	19.88	22.24	23.96
5	10.59	13.15	14.79	16.33	18.27	19.68
6	9.05	11.24	12.65	13.96	15.62	16.83
7	7.96	9.88	11.12	12.27	13.73	14.80
8	7.14	8.86	9.97	11.01	12.31	13.27
9	6.50	8.07	9.08	10.02	11.21	12.08
10	5.99	7.43	8.36	9.23	10.33	11.13
11	5.57	6.91	7.78	8.59	9.61	10.35
12	5.22	6.48	7.29	8.05	9.00	9.70
13	4.92	6.11	6.88	7.59	8.50	9.15
14	4.67	5.80	6.52	7.20	8.06	8.68
15	4.45	5.53	6.22	6.87	7.68	8.28
16	4.26	5.29	5.95	6.57	7.35	7.92
17	4.09	5.08	5.71	6.31	7.06	7.61
18	3.94	4.89	5.50	6.08	6.80	7.33
19	3.81	4.73	5.32	5.87	6.57	7.08
20	3.68	4.58	5.15	5.68	6.36	6.85
21	3.58	4.44	4.99	5.51	6.17	6.65
22	3.48	4.32	4.86	5.36	6.00	6.46
23	3.38	4.20	4.73	5.22	5.84	6.29
24	3.30	4.10	4.61	5.09	5.70	6.14

Tabla 4.21. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17002.

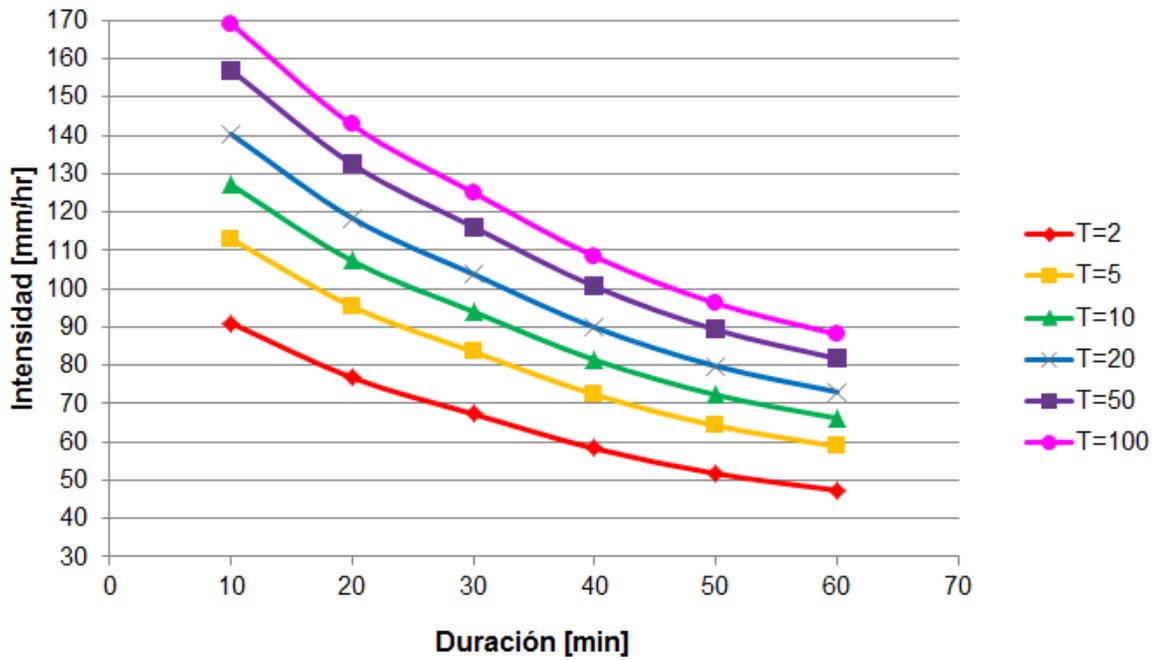


Figura 4.11. Curvas i-d-Tr de la estación 17002 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

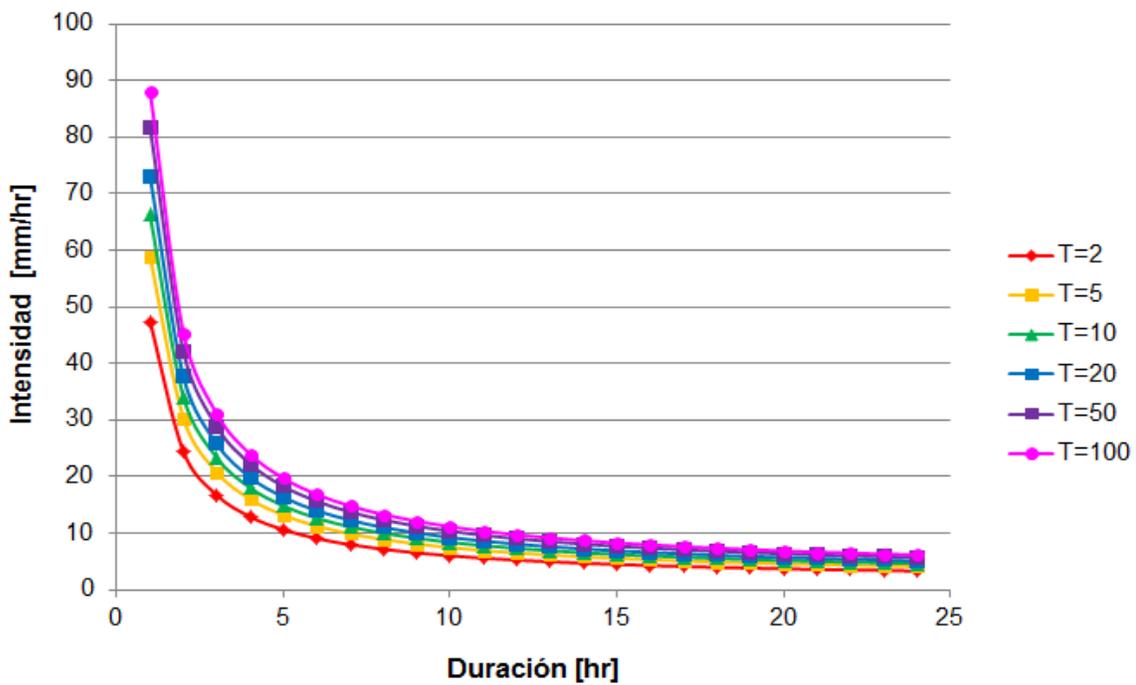


Figura 4.12. Curvas i-d-Tr de la estación 17002 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	89.09	112.19	126.77	140.20	156.91	169.03
20	75.17	94.66	106.96	118.29	132.39	142.62
30	65.89	82.97	93.75	103.69	116.05	125.01
40	57.07	71.87	81.21	89.82	100.52	108.28
50	50.67	63.81	72.10	79.74	89.24	96.13
60	46.40	58.43	66.02	73.02	81.72	88.04

Tabla 4.22. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17004.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	46.40	58.43	66.02	73.02	81.72	88.04
2	23.85	30.04	33.94	37.54	42.01	45.26
3	16.34	20.57	23.25	25.71	28.78	31.00
4	12.58	15.84	17.90	19.80	22.16	23.87
5	10.33	13.00	14.69	16.25	18.19	19.59
6	8.82	11.11	12.55	13.88	15.54	16.74
7	7.75	9.76	11.03	12.19	13.65	14.70
8	6.94	8.74	9.88	10.93	12.23	13.17
9	6.32	7.95	8.99	9.94	11.13	11.98
10	5.82	7.32	8.28	9.15	10.24	11.03
11	5.41	6.81	7.69	8.51	9.52	10.26
12	5.06	6.38	7.21	7.97	8.92	9.61
13	4.78	6.01	6.79	7.51	8.41	9.06
14	4.53	5.70	6.44	7.12	7.97	8.59
15	4.31	5.43	6.14	6.79	7.60	8.18
16	4.12	5.19	5.87	6.49	7.26	7.83
17	3.96	4.99	5.63	6.23	6.97	7.51
18	3.81	4.80	5.42	6.00	6.71	7.23
19	3.68	4.63	5.24	5.79	6.48	6.98
20	3.56	4.48	5.07	5.60	6.27	6.76
21	3.45	4.35	4.91	5.44	6.08	6.55
22	3.36	4.23	4.78	5.28	5.91	6.37
23	3.27	4.11	4.65	5.14	5.75	6.20
24	3.19	4.01	4.53	5.01	5.61	6.04

Tabla 4.23. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17004.

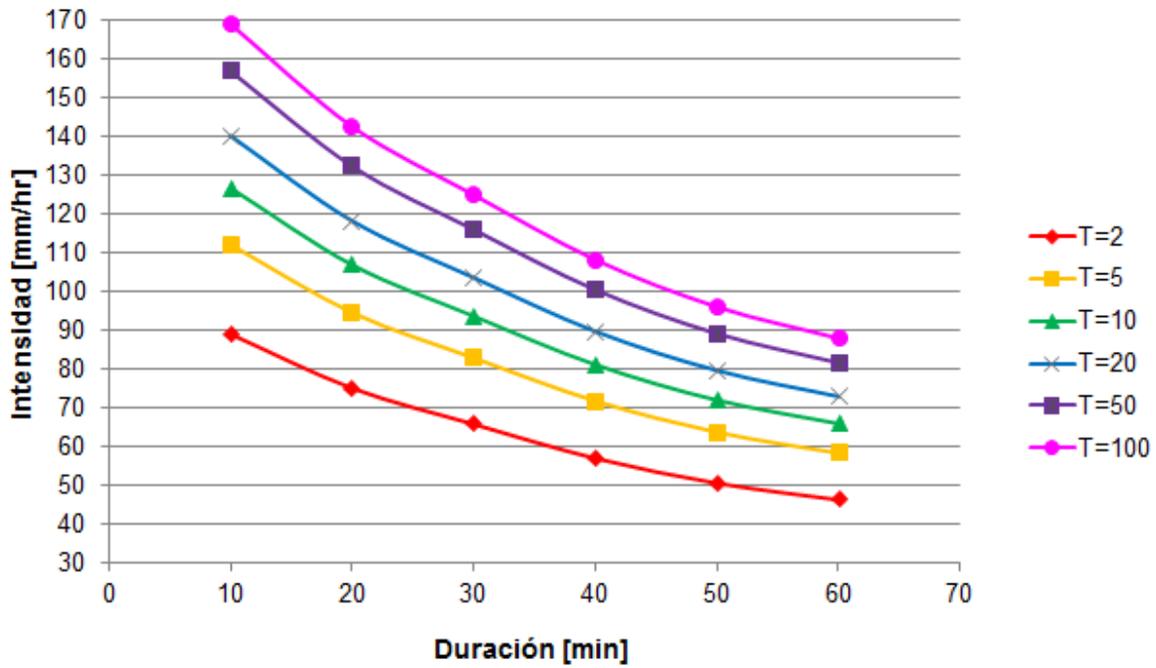


Figura 4.13. Curvas i-d-Tr de la estación 17004 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

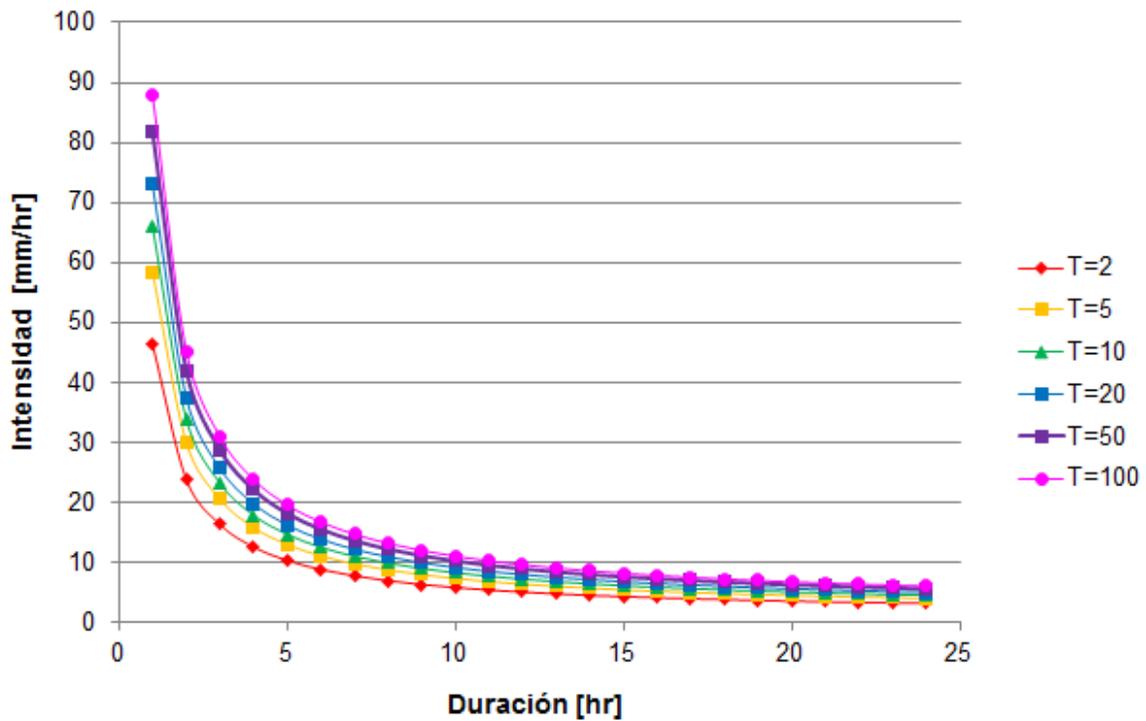


Figura 4.14. Curvas i-d-Tr de la estación 17004 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	78.72	96.06	107.54	118.55	132.80	143.48
20	66.42	81.05	90.74	100.03	112.05	121.06
30	58.22	71.04	79.53	87.68	98.22	106.12
40	50.43	61.54	68.89	75.95	85.08	91.92
50	44.77	54.63	61.16	67.43	75.53	81.61
60	41.00	50.03	56.01	61.75	69.17	74.73

Tabla 4.24. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17014.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	41.00	50.03	56.01	61.75	69.17	74.73
2	21.03	25.67	28.73	31.68	35.48	38.34
3	14.38	17.54	19.64	21.65	24.26	26.21
4	11.05	13.48	15.10	16.64	18.64	20.14
5	9.05	11.05	12.37	13.63	15.27	16.50
6	7.72	9.42	10.55	11.63	13.03	14.08
7	6.77	8.26	9.25	10.20	11.42	12.34
8	6.06	7.39	8.28	9.12	10.22	11.04
9	5.50	6.72	7.52	8.29	9.28	10.03
10	5.06	6.17	6.91	7.62	8.54	9.22
11	4.70	5.73	6.42	7.07	7.92	8.56
12	4.39	5.36	6.00	6.62	7.41	8.01
13	4.14	5.05	5.65	6.23	6.98	7.54
14	3.92	4.78	5.35	5.90	6.61	7.14
15	3.73	4.55	5.09	5.62	6.29	6.80
16	3.56	4.35	4.87	5.36	6.01	6.49
17	3.42	4.17	4.67	5.14	5.76	6.23
18	3.29	4.01	4.49	4.95	5.54	5.99
19	3.17	3.87	4.33	4.77	5.34	5.77
20	3.06	3.74	4.18	4.61	5.17	5.58
21	2.97	3.62	4.05	4.47	5.01	5.41
22	2.88	3.52	3.94	4.34	4.86	5.25
23	2.80	3.42	3.83	4.22	4.73	5.11
24	2.73	3.33	3.73	4.11	4.61	4.98

Tabla 4.25. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17014.

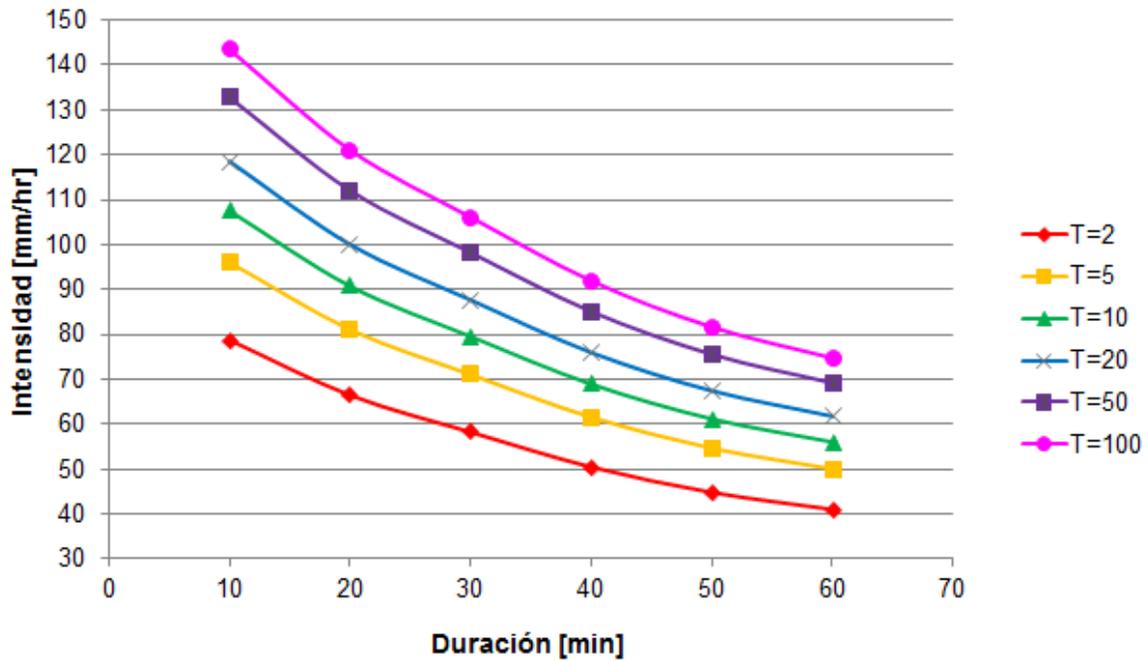


Figura 4.15. Curvas i-d-Tr de la estación 17014 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

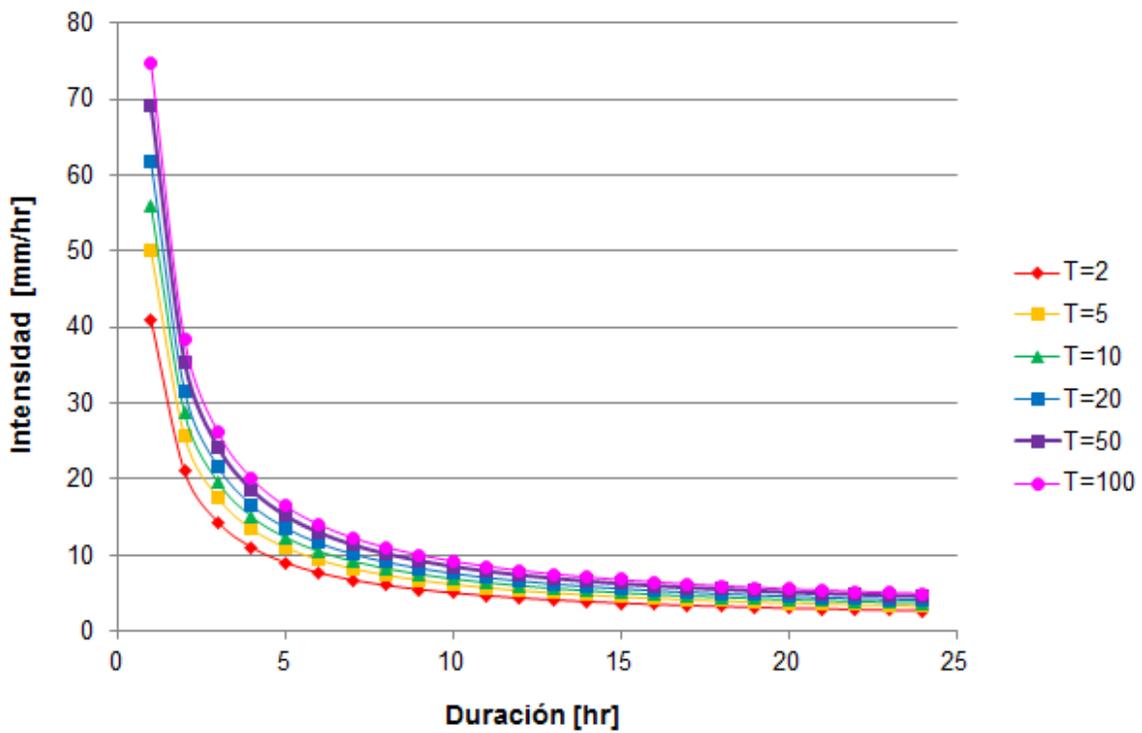


Figura 4.16. Curvas i-d-Tr de la estación 17014 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	93.70	121.40	139.02	155.48	176.34	191.78
20	79.06	102.43	117.30	131.19	148.79	161.81
30	69.30	89.79	102.82	114.99	130.42	141.83
40	60.02	77.77	89.06	99.60	112.97	122.86
50	53.29	69.05	79.07	88.43	100.29	109.07
60	48.80	63.23	72.41	80.98	91.84	99.88

Tabla 4.26. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17022.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	48.80	63.23	72.41	80.98	91.84	99.88
2	25.13	32.56	37.28	41.70	47.29	51.43
3	17.24	22.33	25.58	28.60	32.44	35.28
4	13.29	17.22	19.72	22.06	25.02	27.21
5	10.92	14.15	16.21	18.13	20.56	22.36
6	9.35	12.11	13.87	15.51	17.59	19.13
7	8.22	10.65	12.20	13.64	15.47	16.82
8	7.37	9.55	10.94	12.24	13.88	15.09
9	6.72	8.70	9.97	11.14	12.64	13.75
10	6.19	8.02	9.18	10.27	11.65	12.67
11	5.76	7.46	8.55	9.56	10.84	11.79
12	5.40	7.00	8.01	8.96	10.17	11.05
13	5.10	6.60	7.56	8.46	9.59	10.43
14	4.84	6.27	7.18	8.03	9.10	9.90
15	4.61	5.98	6.84	7.65	8.68	9.44
16	4.41	5.72	6.55	7.33	8.31	9.04
17	4.24	5.49	6.29	7.04	7.98	8.68
18	4.09	5.29	6.06	6.78	7.69	8.36
19	3.95	5.11	5.86	6.55	7.43	8.08
20	3.82	4.95	5.67	6.34	7.19	7.82
21	3.71	4.81	5.51	6.16	6.98	7.59
22	3.61	4.67	5.35	5.99	6.79	7.38
23	3.51	4.55	5.21	5.83	6.61	7.19
24	3.43	4.44	5.09	5.69	6.45	7.02

Tabla 4.27. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17022.

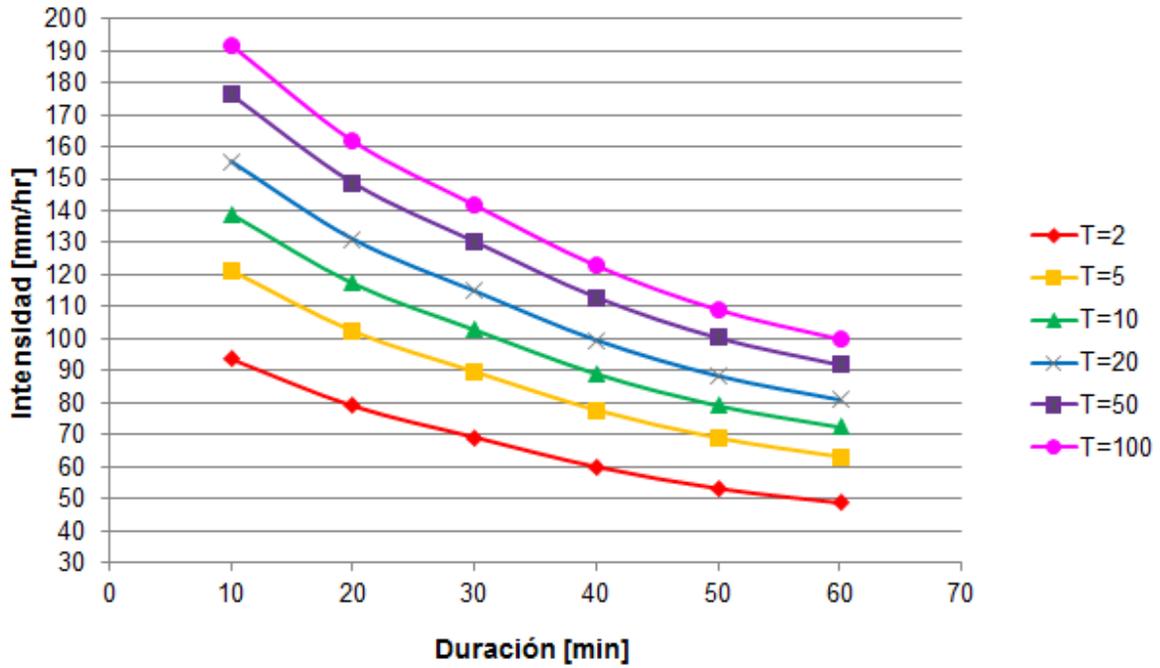


Figura 4.17. Curvas i-d-Tr de la estación 17022 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

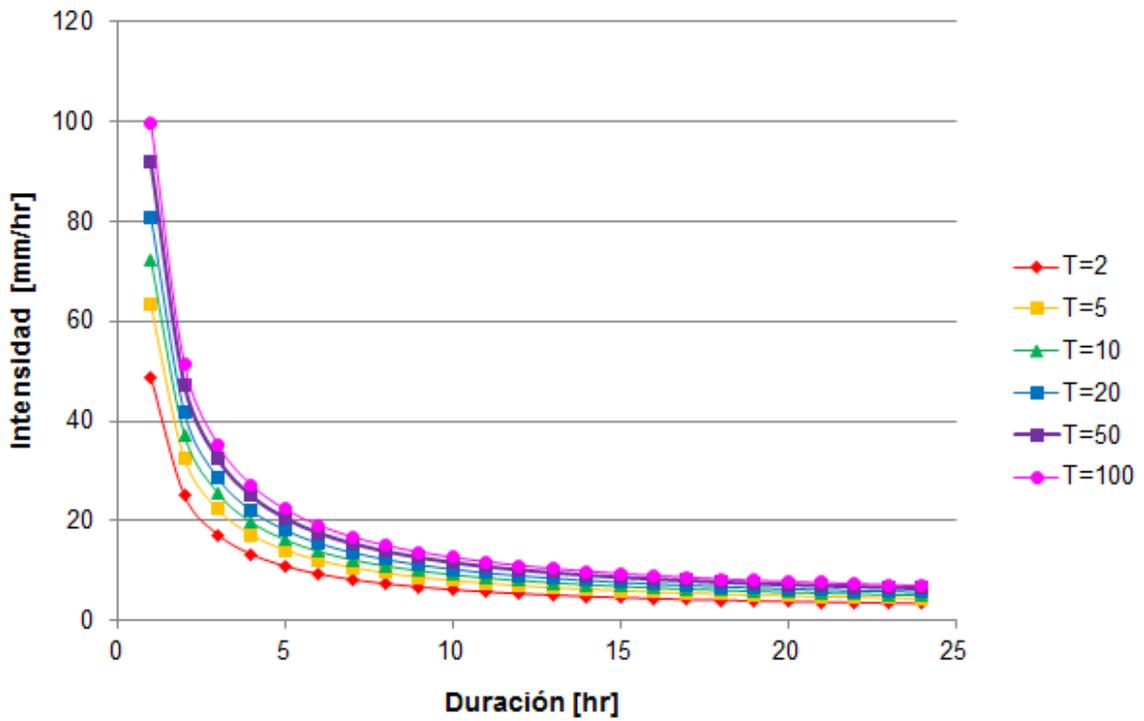


Figura 4.18. Curvas i-d-Tr de la estación 17022 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	96.19	126.01	145.14	163.09	185.96	202.97
20	81.16	106.32	122.46	137.61	156.91	171.25
30	71.14	93.20	107.34	120.62	137.54	150.11
40	61.62	80.73	92.98	104.48	119.13	130.02
50	54.71	71.67	82.55	92.76	105.77	115.44
60	50.10	65.63	75.59	84.95	96.86	105.71

Tabla 4.28. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17047.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	50.10	65.63	75.59	84.95	96.86	105.71
2	25.82	33.83	38.96	43.78	49.92	54.48
3	17.73	23.22	26.75	30.06	34.27	37.41
4	13.68	17.92	20.64	23.20	26.45	28.87
5	11.25	14.74	16.98	19.08	21.76	23.74
6	9.63	12.62	14.54	16.34	18.63	20.33
7	8.48	11.11	12.79	14.38	16.39	17.89
8	7.61	9.97	11.48	12.91	14.71	16.06
9	6.94	9.09	10.47	11.76	13.41	14.64
10	6.40	8.38	9.65	10.85	12.37	13.50
11	5.96	7.80	8.99	10.10	11.51	12.57
12	5.59	7.32	8.43	9.47	10.80	11.79
13	5.28	6.91	7.96	8.95	10.20	11.13
14	5.01	6.56	7.56	8.49	9.69	10.57
15	4.78	6.26	7.21	8.10	9.24	10.08
16	4.58	6.00	6.91	7.76	8.85	9.66
17	4.40	5.76	6.64	7.46	8.50	9.28
18	4.24	5.55	6.40	7.19	8.20	8.94
19	4.10	5.37	6.18	6.95	7.92	8.65
20	3.97	5.20	5.99	6.73	7.67	8.38
21	3.85	5.05	5.81	6.53	7.45	8.13
22	3.75	4.91	5.66	6.36	7.25	7.91
23	3.65	4.79	5.51	6.19	7.06	7.71
24	3.57	4.67	5.38	6.04	6.89	7.52

Tabla 4.29. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17047.

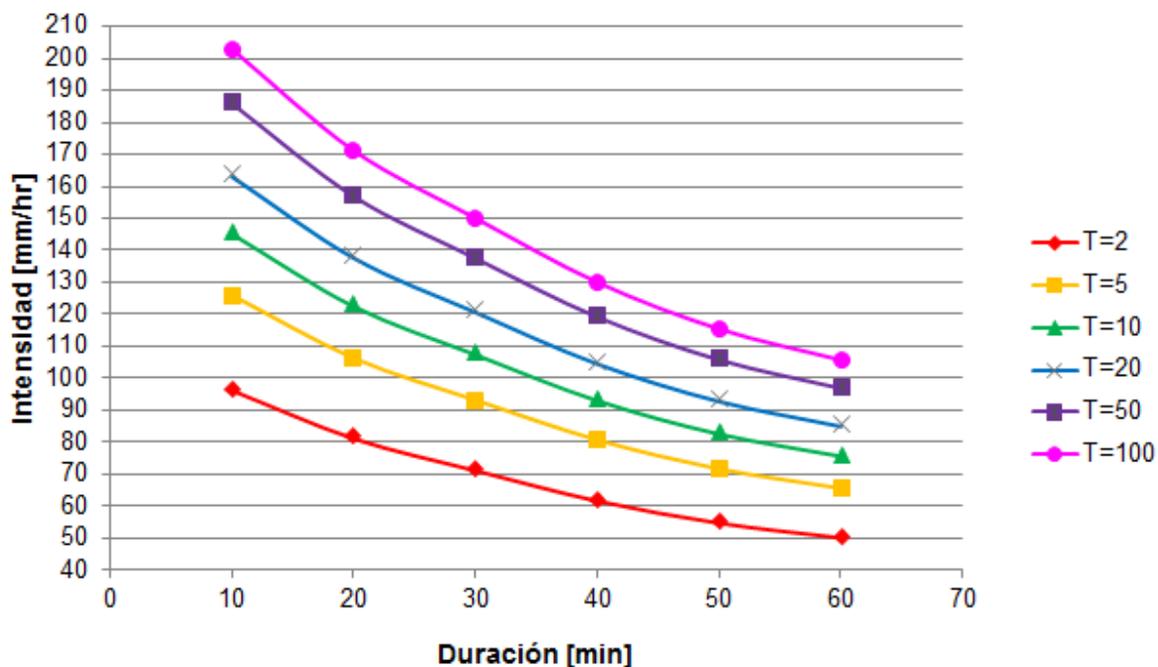


Figura 4.19. Curvas i-d-Tr de la estación 17047 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

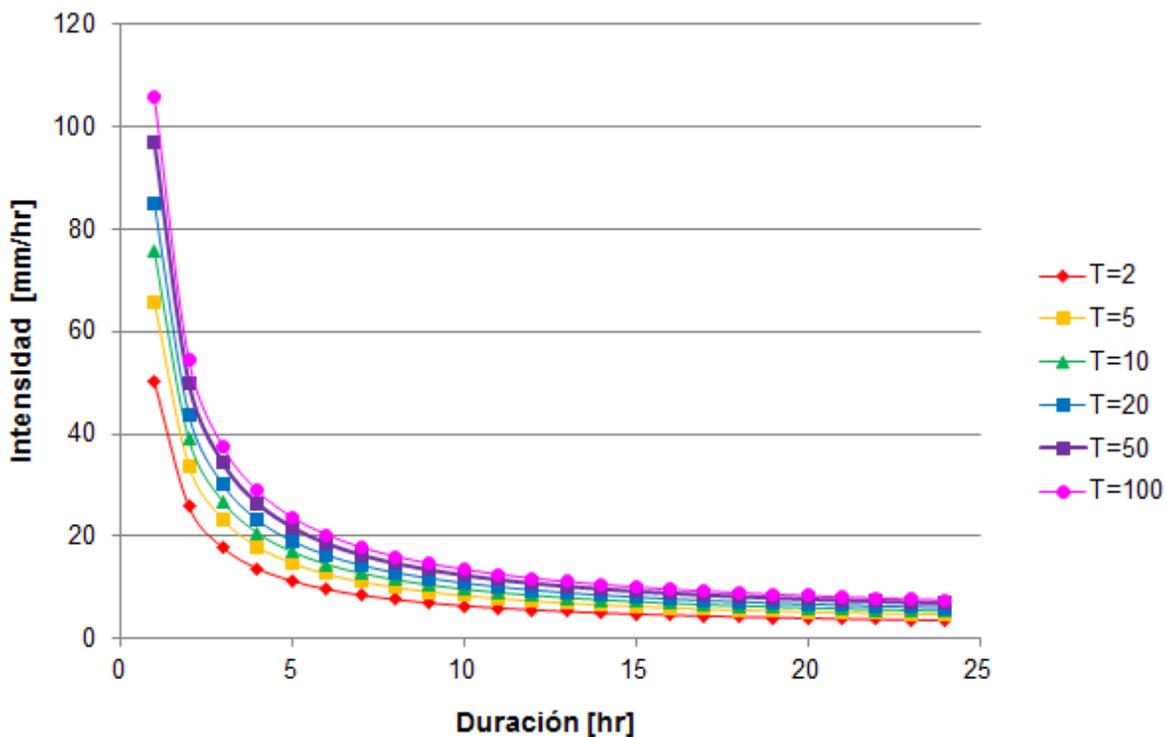


Figura 4.20. Curvas i-d-Tr de la estación 17047 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	77.18	96.89	109.13	120.39	134.45	144.73
20	65.12	81.75	92.07	101.58	113.44	122.11
30	57.08	71.66	80.71	89.04	99.44	107.04
40	49.45	62.07	69.91	77.12	86.13	92.72
50	43.90	55.10	62.07	68.47	76.47	82.31
60	40.20	50.46	56.84	62.70	70.03	75.38

Tabla 4.30. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17026.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	40.20	50.46	56.84	62.70	70.03	75.38
2	20.62	25.88	29.15	32.16	35.92	38.66
3	14.09	17.69	19.92	21.98	24.55	26.42
4	10.83	13.59	15.31	16.89	18.86	20.30
5	8.87	11.13	12.54	13.83	15.45	16.63
6	7.56	9.50	10.69	11.80	13.18	14.18
7	6.63	8.32	9.38	10.34	11.55	12.44
8	5.93	7.45	8.39	9.25	10.33	11.12
9	5.39	6.76	7.62	8.40	9.39	10.10
10	4.95	6.22	7.00	7.73	8.63	9.29
11	4.60	5.77	6.50	7.17	8.01	8.62
12	4.30	5.40	6.08	6.71	7.49	8.06
13	4.05	5.08	5.73	6.32	7.05	7.59
14	3.83	4.81	5.42	5.98	6.68	7.19
15	3.65	4.58	5.16	5.69	6.35	6.84
16	3.48	4.37	4.93	5.44	6.07	6.53
17	3.34	4.19	4.72	5.21	5.82	6.26
18	3.21	4.03	4.54	5.01	5.60	6.02
19	3.10	3.89	4.38	4.83	5.40	5.81
20	3.00	3.76	4.23	4.67	5.22	5.62
21	2.90	3.64	4.10	4.53	5.05	5.44
22	2.82	3.54	3.98	4.39	4.91	5.28
23	2.74	3.44	3.87	4.27	4.77	5.14
24	2.67	3.35	3.77	4.16	4.65	5.00

Tabla 4.31. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17026.

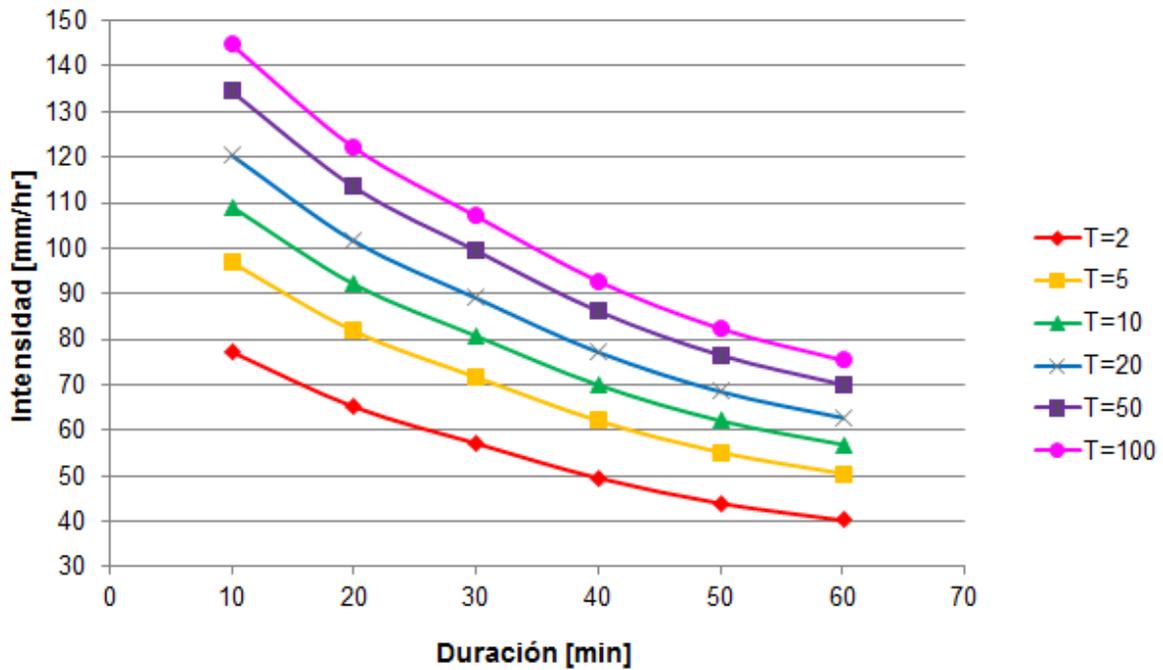


Figura 4.21. Curvas i-d-Tr de la estación 17026 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

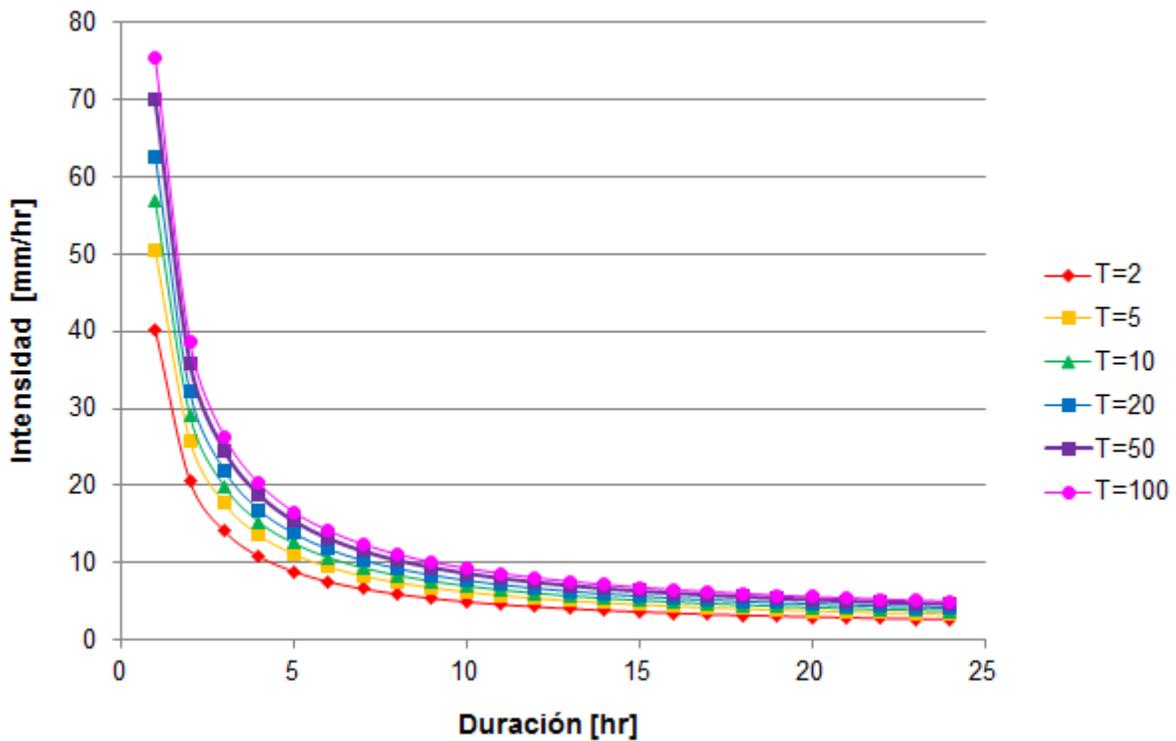


Figura 4.22. Curvas i-d-Tr de la estación 17026 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

Curvas i-d-Tr para duraciones menores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[minutos]	2	5	10	20	50	100
10	79.10	97.20	105.94	112.50	118.98	122.67
20	66.74	82.01	89.38	94.93	100.39	103.51
30	58.50	71.89	78.35	83.21	87.99	90.73
40	50.68	62.27	67.87	72.07	76.22	78.59
50	44.99	55.28	60.25	63.99	67.67	69.77
60	41.20	50.62	55.18	58.60	61.97	63.89

Tabla 4.32. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 17018.

Curvas i-d-Tr para duraciones mayores a una hora						
Duración	Periodo de retorno [años]					
[horas]	2	5	10	20	50	100
1	41.20	50.62	55.18	58.60	61.97	63.89
2	21.21	26.06	28.40	30.17	31.90	32.89
3	14.55	17.87	19.48	20.69	21.88	22.56
4	11.21	13.78	15.02	15.95	16.87	17.39
5	9.22	11.32	12.34	13.11	13.86	14.29
6	7.88	9.69	10.56	11.21	11.86	12.22
7	6.93	8.52	9.28	9.86	10.42	10.75
8	6.22	7.64	8.33	8.84	9.35	9.64
9	5.66	6.96	7.58	8.05	8.52	8.78
10	5.22	6.41	6.99	7.42	7.85	8.09
11	4.85	5.96	6.50	6.90	7.30	7.53
12	4.55	5.59	6.09	6.47	6.85	7.06
13	4.30	5.28	5.75	6.11	6.46	6.66
14	4.08	5.01	5.46	5.80	6.13	6.32
15	3.88	4.77	5.20	5.53	5.84	6.02
16	3.72	4.57	4.98	5.29	5.59	5.77
17	3.57	4.39	4.78	5.08	5.37	5.54
18	3.44	4.23	4.61	4.89	5.17	5.34
19	3.32	4.08	4.45	4.73	5.00	5.15
20	3.22	3.95	4.31	4.58	4.84	4.99
21	3.12	3.84	4.18	4.44	4.70	4.84
22	3.04	3.73	4.07	4.32	4.57	4.71
23	2.96	3.63	3.96	4.21	4.45	4.59
24	2.89	3.55	3.86	4.10	4.34	4.47

Tabla 4.33. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 17018.

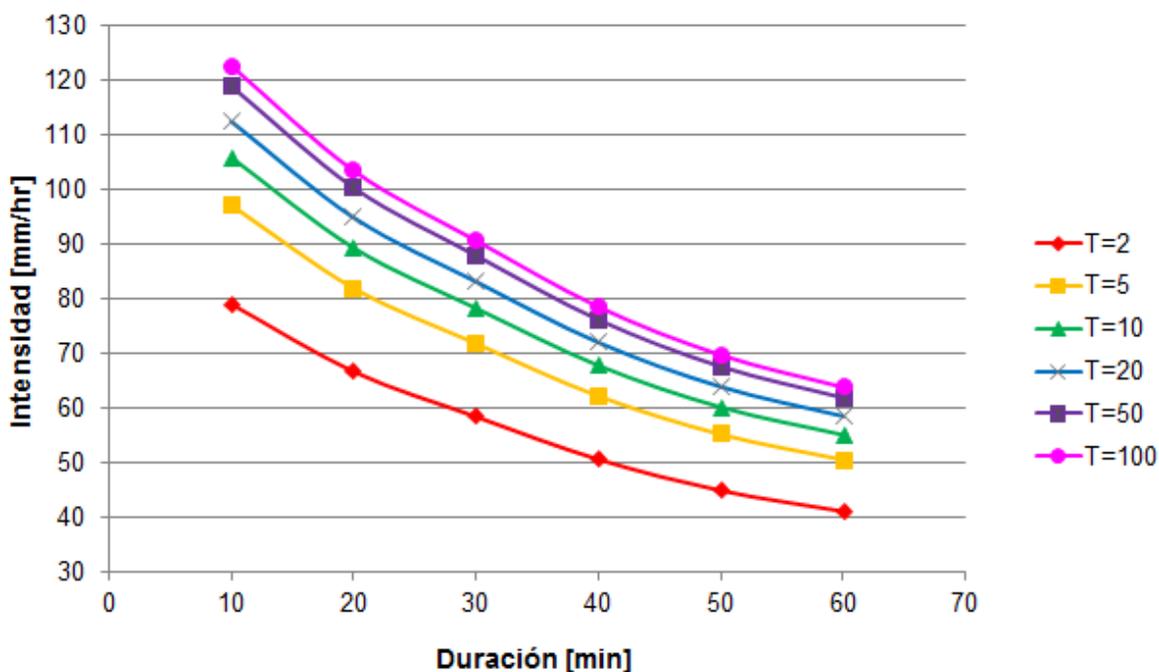


Figura 4.23. Curvas i-d-Tr de la estación 17018 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

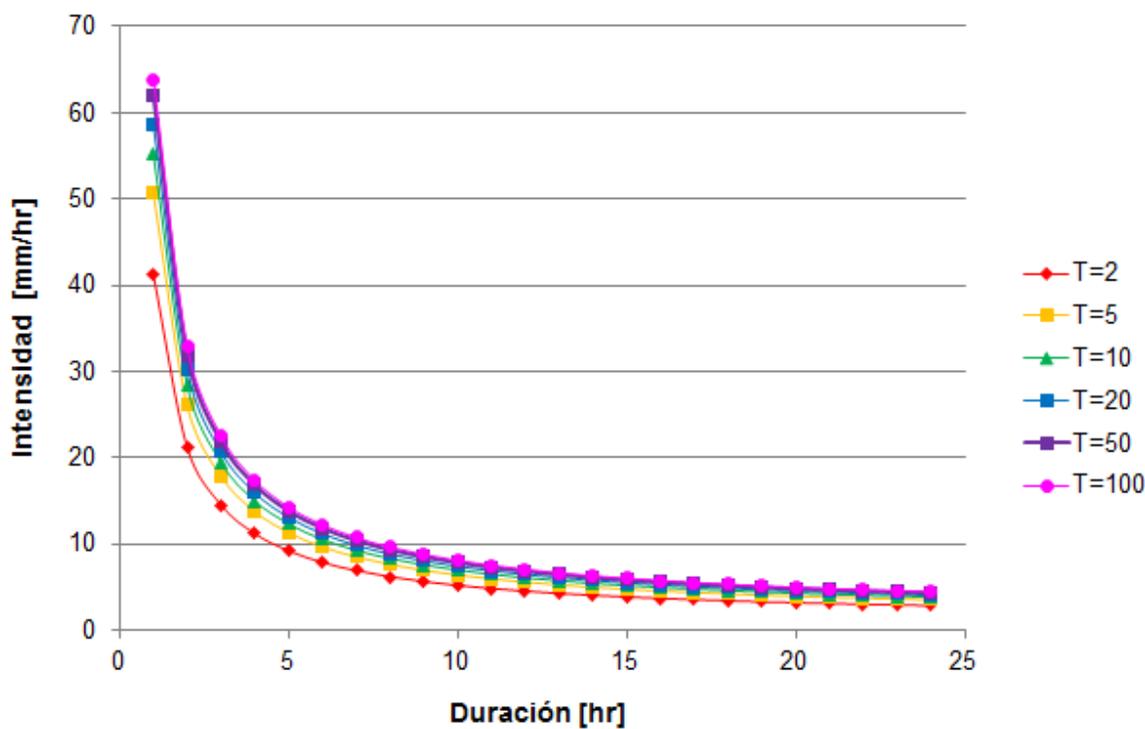


Figura 4.24. Curvas i-d-Tr de la estación 17018 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

4.2.5 Trenes de lluvia

De los registros diarios de precipitaciones acumuladas en 24 horas, para las siete estaciones en estudio, se caracterizaron los trenes de lluvia (días consecutivos en los que se presenta precipitación) para longitudes de tres a 10 días, ya que en México son los causantes de la erosión del suelo. Mediante la prueba de independencia de Anderson (Escalante y Reyes, 2008) se verificó que las series de trenes de lluvia fueran variables aleatorias; el resultado de las pruebas de homogeneidad se muestra en la Tabla 4.34, de los valores arrojados se concluye que las series son estacionarias, a excepción de los trenes de lluvia de seis días para la estación 17047; la prueba de tendencia de Mann Kendall para un nivel de significancia de 5 %, Tabla 4.35, indica que existe un incremento en el valor de la precipitación para los trenes de lluvia de nueve días en la estación 17022, de seis días para la estación 17047 y de tres días en la estación 17018.

Longitud del tren de lluvia	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
3	H	H	H	H	H	H	H
4	H	H	H	H	H	H	H
5	H	H	H	H	H	H	H
6	H	H	H	H	NH	H	H
7	H	H	H	H	H	H	H
8	H	H	H	H	H	H	H
9	H	H	H	H	H	H	H
10	H	H	H	H	H	H	H

H: Homogénea; NH: No Homogénea

Tabla 4.34. Resultados de las pruebas de homogeneidad para cada estación en estudio.

Longitud del tren de lluvia	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
3	ST	ST	ST	ST	ST	ST	TC
4	ST						
5	ST						
6	ST	ST	ST	ST	TC	ST	ST
7	ST						
8	ST						
9	ST	ST	ST	TC	ST	ST	ST
10	ST						

ST: Sin Tendencia; TC: Tendencia Creciente

Tabla 4.35. Resultados de la prueba de Mann Kendall para cada estación en estudio.

En las Tablas 4.36 a 4.42 se muestra para el evento máximo de las diferentes longitudes de trenes de lluvia, la altura de precipitación acumulada, la intensidad, el año y el mes en que se presentan.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	135.6	45.2	2008	9
4	176.4	44.1	2001	8
5	260.2	52.0	1976	7
6	177.8	29.6	2008	6
7	296.9	42.4	1967	9
8	285.8	35.7	1976	8
9	259.4	28.8	1991	7
10	231.5	23.2	1983	7

Tabla 4.36. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17002.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	164.5	54.8	1976	8
4	176.4	44.1	2001	8
5	279.5	55.9	1976	7
6	174.7	29.1	2008	6
7	296.9	42.4	1967	9
8	209.9	26.2	1968	6
9	247.8	27.5	1988	8
10	270.4	27.0	2011	6

Tabla 4.37. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17004.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	114.5	38.2	1980	6
4	157.0	39.3	2004	7
5	137.0	27.4	2005	7
6	140.0	23.3	2003	9
7	211.0	30.1	2008	6
8	202.0	25.3	2010	9
9	212.8	23.6	1968	6
10	233.5	23.4	2001	6

Tabla 4.38. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17014.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	191.2	63.7	2010	2
4	168.4	42.1	2011	6
5	224.4	44.9	1973	6
6	293.5	48.9	1976	10
7	341.5	48.8	1967	9
8	270.7	33.8	1962	10
9	232.9	25.9	1998	9
10	313.0	31.3	1968	6

Tabla 4.39. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17022.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	141.4	47.1	1968	8
4	229.0	57.3	1962	11
5	178.7	35.7	1973	8
6	252.8	42.1	1988	8
7	298.5	42.6	1967	9
8	261.9	32.7	1998	9
9	207.3	23.0	2011	7
10	420.2	42.0	1961	9

Tabla 4.40. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17047.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	100.5	33.5	2010	6
4	274.0	68.5	1989	8
5	147.6	29.5	2008	7
6	126.5	21.1	1999	8
7	159.3	22.8	1996	8
8	166.1	20.8	1985	6
9	183.5	20.4	2013	9
10	199.4	19.9	1988	6

Tabla 4.41. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17026.

Longitud del tren de lluvia [días]	Hp acumulada [mm]	Intensidad [mm/día]	Año	Mes
3	149.3	49.8	1988	6
4	200.0	50.0	2009	9
5	170.0	34.0	2001	6
6	140.4	23.4	1977	8
7	175.5	25.1	2010	8
8	267.5	33.4	1991	7
9	204.0	22.7	2003	8
10	226.0	22.6	1958	9

Tabla 4.42. Caracterización de los trenes de lluvia para la estación 17018.

Analizando los resultados anteriores se observa que las precipitaciones máximas y los eventos máximos de trenes de lluvia ocurren entre los meses de junio a septiembre, teniendo mayor frecuencia en el mes de agosto. Se observó también, la presencia de hasta 58 días consecutivos de precipitación en la estación 17022 en el año 1961 durante junio, julio y agosto; otro evento de este tipo ocurrió en la estación 17004 en el año de 1986 al presentarse un tren de lluvia de 42 días entre los meses de junio y julio. Resultó interesante, observar que en un evento máximo de trenes de lluvia con una longitud entre tres a 10 días se acumula del 9.2 % al 31.9 % de la precipitación media anual.

4.2.6 Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La Estación Meteorológica Automática IMTA cuenta con 11 años de registro, de 1999 a 2009; para cada año se obtuvieron los valores de las variables Hp máxima anual y Hp acumulada anual que se muestran en la Tabla 4.43. El análisis de la cantidad y calidad de la información se inició realizando la prueba de independencia de Anderson (Escalante y Reyes, 2008), se obtuvieron 10 valores de r_k para cada serie y se observó que ambas variables son eventos aleatorios. De igual manera que para los datos rellenados y los trenes de lluvia se aplicaron las pruebas de homogeneidad, con los resultados de la Tabla 4.44 se concluye que son variables estacionarias; la prueba de Mann Kendall para un nivel de significancia de 5 % indica que no existe tendencia en las series.

Año	Hp acumulada anual [mm]	Hp máxima anual [mm]
1999	1046.01	105.6
2000	877.19	62.98
2001	922.05	86.34
2002	649.78	68.78
2003	1167.87	81.8
2004	1064.27	60.72
2005	750.03	78.75
2006	867.01	50.98
2007	962.09	44.19
2008	1070.43	83.32
2009	1012.11	64.26

Tabla 4.43. Valores de Hp acumulada anual [mm] y Hp máxima anual [mm] para la EMA IMTA.

Prueba	Acumulada anual	Máxima anual
T-Student	H	H
Cramer	H	H
Helmert	H	NH
Petit	H	NH
Normal Estándar	H	H
Buishand	H	H
Von Newman	H	H
Fisher	H	H
Conclusión	Homogénea	Homogénea

H: Homogénea; NH: No Homogénea

Tabla 4.44. Resultados de las pruebas de homogeneidad para la EMA IMTA en las variables Hp acumulada anual [mm] y Hp máxima anual [mm].

Analizando el registro de precipitación diaria se encontraron 323 eventos de tormentas erosivas, ($hp > 10$ mm); para cada hp se obtuvo el potencial erosivo (R) con la ecuación (3.4), Tabla 4.45, con estos valores se encontró la relación funcional entre el factor R y la lluvia acumulada en 24 horas ajustándolos a una relación potencial considerando dos casos: el primero trabajando con la media de los valores y el segundo considerando la mediana. Ambos casos se muestran en las Figuras 4.25 y 4.26.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
1999	Abr	18	1.83	18.53	10.11	22.34	9.05
1999	Jun	12	1.00	35.81	35.81	64.50	63.16
1999	Jun	14	3.50	13.69	3.91	9.64	2.43
1999	Jun	16	4.00	36.81	9.20	42.66	37.04
1999	Jun	20	1.17	20.07	17.20	27.44	12.87
1999	Jul	3	4.67	35.79	7.67	29.46	23.53
1999	Jul	18	4.00	28.94	7.24	29.48	18.41
1999	Jul	18	2.33	11.16	4.78	17.28	4.08
1999	Jul	18	5.50	11.63	2.12	6.08	1.17
1999	Ago	3	0.50	13.72	27.44	26.94	9.42
1999	Ago	12	1.33	17.27	12.95	27.94	11.35
1999	Ago	13	0.83	13.46	16.15	22.36	7.10
1999	Ago	18	1.67	24.64	14.78	36.58	21.77
1999	Ago	20	6.50	53.07	8.17	21.84	24.32
1999	Ago	21	0.50	14.22	28.44	26.92	9.50
1999	Ago	25	2.33	13.46	5.77	14.74	4.07
1999	Ago	28	2.00	30.48	15.24	49.78	38.94
1999	Ago	31	3.17	32.76	10.35	39.12	30.01
1999	Sep	1	0.83	10.15	12.18	19.30	4.73
1999	Sep	5	7.50	103.84	13.85	44.20	110.95
1999	Sep	6	2.17	10.66	4.92	11.68	2.45
1999	Sep	18	0.67	11.42	17.13	22.34	6.28
1999	Sep	19	0.50	12.19	24.38	23.36	6.93
1999	Oct	2	6.33	34.76	5.49	21.84	15.30
1999	Oct	3	3.33	10.89	3.27	11.68	2.42
1999	Oct	8	4.17	25.89	6.21	31.00	17.83
1999	Oct	20	4.00	28.18	7.05	38.60	25.34
2000	May	24	3.67	20.55	5.61	22.36	9.72
2000	May	27	2.83	62.73	22.14	52.32	84.41
2000	Jun	5	1.00	17.54	17.54	25.40	10.42
2000	Jun	6	3.33	25.91	7.77	17.78	9.70
2000	Jun	7	5.33	38.84	7.28	43.16	38.10
2000	Jun	10	3.17	13.21	4.17	12.70	3.16
2000	Jun	11	4.50	58.67	13.04	39.12	56.05
2000	Jun	14	4.17	34.02	8.17	39.10	30.34
2000	Jun	20	3.00	26.41	8.80	26.94	16.36
2000	Jul	12	4.00	20.54	5.14	11.18	4.64
2000	Jul	19	0.67	10.66	15.99	19.80	4.85
2000	Jul	30	1.00	18.03	18.03	24.38	10.23
2000	Ago	4	6.67	16.70	2.51	8.64	2.46

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2000	Ago	9	1.17	11.93	10.23	21.34	5.84
2000	Ago	15	1.50	11.67	7.78	11.68	2.76
2000	Ago	21	2.50	14.71	5.88	23.88	8.10
2000	Ago	30	2.00	20.82	10.41	16.26	7.48
2000	Ago	31	2.00	32.26	16.13	32.52	25.72
2000	Sep	1	1.17	15.24	13.06	18.80	6.35
2000	Sep	13	3.33	23.84	7.15	30.48	16.64
2000	Sep	14	5.33	17.73	3.32	16.26	5.52
2000	Sep	17	2.17	15.49	7.15	12.20	3.94
2000	Sep	19	0.33	10.41	31.23	20.82	5.23
2000	Sep	20	2.50	10.66	4.26	9.64	1.91
2000	Sep	25	0.50	19.56	39.12	38.10	19.90
2000	Sep	30	1.33	29.45	22.09	48.76	36.93
2000	Oct	7	2.17	26.93	12.43	21.34	12.72
2001	Mar	3	4.33	17.25	3.98	12.18	3.85
2001	Mar	27	0.33	11.69	35.07	23.38	6.71
2001	Abr	26	1.17	15.74	13.49	24.90	9.07
2001	Jun	1	3.50	21.32	6.09	14.74	6.37
2001	Jun	3	3.83	18.25	4.76	24.38	9.53
2001	Jun	4	2.33	20.57	8.82	26.92	12.56
2001	Jun	6	3.83	85.84	22.39	70.62	160.22
2001	Jun	8	3.50	17.50	5.00	23.38	8.69
2001	Jun	9	0.67	22.61	33.92	38.10	21.92
2001	Jun	9	4.83	17.51	3.62	14.74	4.90
2001	Jun	11	3.83	51.29	13.38	64.00	83.11
2001	Jun	12	3.33	28.17	8.45	25.90	15.99
2001	Jun	13	2.67	13.44	5.04	18.80	5.44
2001	Jun	14	1.67	24.10	14.46	33.00	18.79
2001	Jun	15	2.17	10.15	4.69	16.78	3.73
2001	Jul	2	1.67	18.02	10.81	28.94	12.13
2001	Jul	9	2.83	12.17	4.30	9.14	2.04
2001	Jul	19	2.17	16.77	7.74	19.82	6.92
2001	Jul	26	1.17	20.05	17.19	30.46	14.42
2001	Jul	27	3.67	12.18	3.32	7.12	1.56
2001	Ago	8	0.83	13.97	16.76	26.42	8.90
2001	Ago	12	4.67	11.65	2.50	9.64	2.01
2001	Ago	26	6.83	19.54	2.86	7.12	2.41
2001	Ago	27	3.50	15.26	4.36	7.12	1.92
2001	Ago	27	4.67	60.66	13.00	53.34	82.52

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2001	Sep	1	1.67	14.22	8.53	20.30	6.28
2001	Sep	5	1.17	18.03	15.45	33.02	15.21
2001	Sep	12	5.67	35.77	6.31	26.40	20.10
2001	Sep	24	2.50	13.21	5.28	11.18	2.94
2001	Sep	25	2.33	10.43	4.47	9.66	1.87
2001	Oct	14	1.67	28.20	16.92	41.66	29.61
2002	Ene	13	6.17	14.40	2.34	7.10	1.73
2002	May	8	2.00	14.22	7.11	12.70	3.84
2002	May	31	0.50	13.21	26.42	21.84	6.80
2002	Jun	4	0.33	12.19	36.57	24.38	7.75
2002	Jun	8	3.83	19.52	5.09	14.72	5.53
2002	Jun	14	1.67	10.65	6.39	10.16	2.21
2002	Jun	24	1.17	16.01	13.72	18.28	6.42
2002	Jun	25	1.33	16.26	12.20	19.32	6.84
2002	Jun	27	2.17	54.85	25.32	60.46	85.90
2002	Jun	30	4.67	32.72	7.01	37.08	27.75
2002	Jul	5	3.83	27.17	7.09	14.74	8.26
2002	Jul	15	0.83	18.04	21.65	28.46	12.28
2002	Jul	21	1.67	26.41	15.85	45.72	30.96
2002	Ago	2	3.50	28.94	8.27	18.78	11.46
2002	Ago	11	1.00	12.69	12.69	21.84	6.43
2002	Ago	13	3.17	24.61	7.77	33.02	18.38
2002	Ago	14	2.83	17.53	6.19	13.72	4.68
2002	Sep	1	0.83	12.45	14.94	24.40	7.65
2002	Sep	5	2.83	13.71	4.84	11.70	3.03
2002	Sep	6	2.00	67.28	33.64	115.30	225.08
2002	Sep	7	2.83	21.59	7.62	15.24	6.71
2003	Jun	2	6.17	15.43	2.50	5.60	1.42
2003	Jun	10	3.50	12.43	3.55	8.64	1.88
2003	Jun	16	6.83	23.62	3.46	15.76	6.95
2003	Jun	18	1.33	13.46	10.10	25.42	8.12
2003	Jun	19	3.33	18.53	5.56	17.28	6.37
2003	Jun	22	2.00	10.14	5.07	10.66	2.06
2003	Jun	28	2.00	23.63	11.82	26.94	14.71
2003	Jun	29	0.33	11.68	35.04	23.36	6.76
2003	Jul	3	2.00	21.59	10.80	32.52	16.33
2003	Jul	4	4.17	81.80	19.63	65.54	131.74
2003	Jul	6	3.67	18.52	5.05	14.22	5.37
2003	Jul	7	0.67	10.41	15.62	16.76	3.90

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2003	Jul	16	2.50	22.10	8.84	31.50	15.86
2003	Ago	2	0.67	15.49	23.24	26.40	9.76
2003	Ago	8	1.67	24.37	14.62	34.04	19.60
2003	Ago	11	1.17	11.93	10.23	18.80	5.03
2003	Ago	19	2.00	11.66	5.83	19.30	4.95
2003	Ago	19	2.00	18.28	9.14	28.96	12.42
2003	Ago	21	1.33	10.68	8.01	14.24	3.17
2003	Ago	24	2.00	26.15	13.08	46.76	31.84
2003	Ago	28	0.67	20.58	30.87	39.12	20.96
2003	Sep	1	2.50	45.45	18.18	54.34	61.42
2003	Sep	2	4.67	31.49	6.75	22.86	15.38
2003	Sep	3	3.00	18.52	6.17	22.36	8.92
2003	Sep	6	1.67	15.73	9.44	16.24	5.36
2003	Sep	7	1.83	13.70	7.47	21.84	6.64
2003	Sep	8	5.17	56.65	10.97	37.60	48.62
2003	Sep	9	2.00	10.15	5.08	12.18	2.45
2003	Sep	12	1.67	14.98	8.99	19.80	6.48
2003	Sep	13	2.17	19.80	9.14	19.32	8.54
2003	Sep	14	2.00	23.35	11.68	32.00	17.30
2003	Sep	20	1.33	30.21	22.66	48.26	37.19
2003	Sep	21	0.67	11.18	16.77	19.82	5.06
2003	Sep	26	6.67	70.35	10.55	57.42	95.07
2003	Sep	27	1.50	16.50	11.00	21.84	8.10
2003	Sep	28	2.83	23.39	8.26	24.90	12.58
2003	Oct	5	1.50	12.18	8.12	19.30	5.20
2003	Oct	6	2.83	29.95	10.57	42.68	31.49
2003	Oct	14	2.67	30.47	11.43	38.10	26.92
2003	Oct	15	2.00	14.70	7.35	25.38	8.71
2004	Ene	16	3.17	11.67	3.69	8.12	1.69
2004	May	19	3.00	27.92	9.31	38.10	25.24
2004	May	31	4.33	12.92	2.98	9.66	2.20
2004	Jun	3	3.50	29.95	8.56	43.70	31.56
2004	Jun	11	3.67	10.89	2.97	7.12	1.35
2004	Jun	25	4.33	24.37	5.62	28.96	15.34
2004	Jun	27	2.50	32.02	12.81	37.10	27.55
2004	Jul	4	2.33	17.51	7.50	21.84	8.25
2004	Jul	12	5.00	22.81	4.56	19.80	9.04
2004	Jul	17	2.67	17.51	6.57	20.84	7.79
2004	Jul	19	4.67	35.82	7.68	19.30	14.06

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2004	Jul	22	3.00	13.95	4.65	16.26	4.49
2004	Jul	23	4.50	60.47	13.44	29.98	41.73
2004	Jul	24	1.83	10.90	5.95	15.22	3.39
2004	Jul	26	0.83	12.44	14.93	19.82	5.55
2004	Jul	27	8.50	21.56	2.54	4.06	1.38
2004	Ago	2	6.83	44.68	6.54	14.24	12.52
2004	Ago	3	3.00	11.41	3.80	9.14	1.84
2004	Ago	4	5.00	10.64	2.13	5.60	0.98
2004	Ago	5	3.50	18.82	5.38	8.12	2.81
2004	Ago	7	1.83	12.44	6.79	14.74	3.83
2004	Ago	21	2.67	12.44	4.67	8.64	1.93
2004	Ago	30	2.50	12.16	4.86	13.20	3.10
2004	Ago	31	1.83	20.33	11.09	14.74	6.28
2004	Sep	6	2.33	15.24	6.53	12.20	3.60
2004	Sep	8	4.17	27.96	6.71	13.22	7.24
2004	Sep	10	2.17	13.45	6.21	9.12	2.32
2004	Sep	20	2.17	13.71	6.33	10.68	2.85
2004	Sep	24	2.50	15.76	6.30	8.12	2.41
2004	Sep	26	3.83	25.64	6.69	14.24	7.44
2004	Sep	28	6.83	51.56	7.55	13.22	13.67
2004	Sep	29	3.50	20.57	5.88	14.74	6.19
2004	Sep	29	4.33	28.39	6.55	19.30	11.53
2004	Oct	7	4.17	15.76	3.78	6.62	1.83
2004	Oct	8	0.83	10.41	12.49	13.20	2.88
2004	Oct	9	9.33	20.52	2.20	3.56	1.13
2005	Jun	24	0.50	12.19	24.38	23.88	7.14
2005	Jun	25	3.17	11.40	3.60	13.22	2.88
2005	Jun	30	0.83	19.04	22.85	37.08	18.42
2005	Jun	30	5.00	44.46	8.89	42.68	42.99
2005	Jul	6	4.50	54.12	12.03	56.38	72.52
2005	Jul	19	5.33	54.10	10.14	76.22	105.06
2005	Jul	20	1.00	13.98	13.98	21.34	6.68
2005	Jul	25	2.17	15.98	7.38	18.28	6.42
2005	Ago	9	0.50	13.71	27.42	26.92	9.25
2005	Ago	14	10.50	35.71	3.40	17.78	12.17
2005	Ago	15	1.83	21.57	11.77	35.04	18.35
2005	Ago	17	1.17	21.33	18.28	39.12	21.32
2005	Ago	23	1.33	11.17	8.38	10.68	2.47
2005	Ago	26	2.33	21.84	9.36	27.94	13.96

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2005	Ago	29	0.83	12.94	15.53	23.36	7.15
2005	Ago	30	0.83	11.70	14.04	17.80	4.57
2005	Ago	31	4.50	78.75	17.50	59.94	117.86
2005	Sep	2	4.17	18.00	4.32	11.68	4.06
2005	Sep	5	1.33	13.47	10.10	14.74	4.18
2005	Sep	13	2.50	22.35	8.94	25.40	12.50
2005	Oct	5	6.83	29.20	4.27	13.20	7.33
2006	May	20	1.83	18.79	10.25	24.90	11.24
2006	Jun	29	0.67	12.69	19.04	23.36	7.00
2006	Jun	30	6.17	30.95	5.02	26.92	16.93
2006	Jul	23	2.50	28.69	11.48	36.56	24.37
2006	Jul	24	3.50	47.73	13.64	57.42	66.91
2006	Jul	28	1.17	33.79	28.96	54.88	47.91
2006	Ago	3	6.50	14.67	2.26	8.12	2.07
2006	Ago	5	2.67	28.93	10.85	38.60	26.40
2006	Ago	7	3.67	24.36	6.64	30.48	17.05
2006	Ago	17	1.17	19.81	16.98	34.04	16.60
2006	Ago	21	2.17	13.44	6.20	19.30	5.78
2006	Ago	24	5.33	48.48	9.09	38.60	43.31
2006	Ago	25	6.33	29.96	4.73	19.82	11.66
2006	Sep	4	3.00	20.57	6.86	19.82	8.73
2006	Sep	5	2.83	28.19	9.95	29.46	18.73
2006	Sep	7	2.50	14.73	5.89	10.16	2.82
2006	Sep	10	1.33	44.44	33.33	59.94	70.31
2006	Sep	21	2.00	15.48	7.74	21.86	7.59
2006	Sep	26	0.67	17.78	26.67	27.94	12.13
2006	Oct	4	3.50	36.03	10.29	50.28	45.45
2006	Oct	8	3.83	33.50	8.74	29.96	22.66
2007	May	12	0.50	25.41	50.82	48.28	32.72
2007	May	30	0.67	15.49	23.24	27.42	10.09
2007	Jun	8	6.67	21.57	3.24	9.66	3.78
2007	Jun	13	1.00	35.29	35.29	65.52	63.17
2007	Jun	15	2.33	36.81	15.78	51.30	47.08
2007	Jun	25	1.00	21.84	21.84	36.08	19.44
2007	Jun	25	2.33	22.35	9.58	24.40	12.16
2007	Jun	26	2.33	24.89	10.67	44.72	29.02
2007	Jun	28	2.00	13.97	6.99	15.24	4.35
2007	Jun	30	2.50	12.71	5.08	9.14	2.14
2007	Jul	1	1.50	41.65	27.77	42.16	44.17

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2007	Jul	5	3.83	43.18	11.26	46.24	46.91
2007	Jul	8	2.83	11.40	4.02	12.20	2.68
2007	Jul	18	5.17	16.21	3.14	8.62	2.54
2007	Jul	22	2.83	29.70	10.48	38.60	26.88
2007	Jul	28	2.50	16.23	6.49	19.80	6.86
2007	Jul	30	1.33	26.67	20.00	42.16	28.36
2007	Ago	17	0.67	19.05	28.58	35.56	17.20
2007	Ago	18	2.00	26.42	13.21	33.54	20.57
2007	Ago	18	1.50	10.93	7.29	8.64	1.84
2007	Sep	1	5.17	25.89	5.01	17.78	9.18
2007	Sep	1	1.00	11.17	11.17	13.20	3.31
2007	Sep	2	2.17	10.41	4.81	10.66	2.22
2007	Sep	8	3.67	40.36	11.01	39.12	36.76
2007	Sep	9	1.83	19.56	10.67	32.52	15.77
2007	Sep	10	1.67	13.46	8.08	16.26	4.77
2007	Sep	11	3.00	24.13	8.04	23.36	12.06
2007	Sep	12	4.17	13.17	3.16	12.20	3.14
2007	Sep	28	1.83	15.25	8.32	16.26	5.27
2007	Sep	30	0.50	21.34	42.68	40.14	22.09
2007	Oct	22	3.83	27.64	7.21	28.44	18.06
2008	may	14	5.50	18.26	3.32	8.62	2.85
2008	may	27	3.00	23.11	7.70	11.68	5.35
2008	jun	5	1.83	10.94	5.97	10.16	2.16
2008	jun	6	5.67	21.07	3.72	6.12	2.21
2008	jun	7	12.17	62.92	5.17	9.64	11.36
2008	jun	9	3.33	11.16	3.35	4.56	0.84
2008	jun	9	9.50	30.17	3.18	5.08	2.55
2008	jun	13	10.67	83.32	7.81	11.18	18.49
2008	jun	23	3.67	17.00	4.64	9.64	3.05
2008	jul	1	6.17	44.96	7.29	18.80	17.09
2008	jul	5	4.00	18.02	4.51	18.78	6.61
2008	jul	7	9.00	27.63	3.07	8.62	4.30
2008	jul	8	3.83	17.53	4.57	5.60	1.73
2008	jul	14	4.00	13.17	3.29	9.64	2.30
2008	jul	16	2.00	23.89	11.95	20.84	10.91
2008	jul	26	2.83	25.40	8.97	11.18	5.72
2008	ago	3	8.00	42.46	5.31	9.14	7.20
2008	ago	5	4.17	22.38	5.37	7.62	3.13
2008	ago	12	2.17	14.97	6.91	9.12	2.63

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2008	ago	21	3.33	36.31	10.89	22.86	18.48
2008	ago	29	4.67	30.49	6.53	10.68	6.27
2008	sep	3	2.83	18.26	6.45	15.74	5.89
2008	sep	6	2.83	10.15	3.58	9.14	1.70
2008	sep	7	6.33	16.75	2.65	6.12	1.73
2008	sep	8	3.83	10.15	2.65	4.06	0.67
2008	sep	9	3.00	21.33	7.11	11.68	4.85
2008	sep	10	3.83	32.49	8.48	12.18	8.03
2008	sep	13	2.00	13.70	6.85	9.12	2.43
2008	sep	14	2.17	25.91	11.96	20.84	11.83
2008	sep	15	3.50	15.23	4.35	5.60	1.50
2008	sep	17	2.83	12.97	4.58	6.62	1.56
2008	sep	18	4.50	28.68	6.37	15.74	9.32
2008	sep	18	5.67	12.92	2.28	4.06	0.84
2008	sep	23	2.50	12.95	5.18	10.16	2.54
2008	oct	8	5.67	30.22	5.33	9.12	5.22
2009	may	16	2.50	11.17	4.47	6.12	1.21
2009	may	17	5.17	36.79	7.12	9.12	6.52
2009	may	22	3.17	10.93	3.45	4.06	0.73
2009	jun	16	3.83	27.43	7.16	9.12	4.84
2009	jun	17	3.17	21.58	6.82	9.12	3.81
2009	jun	19	1.83	11.18	6.10	7.62	1.60
2009	jun	23	2.83	10.17	3.59	6.12	1.11
2009	jun	26	4.33	12.42	2.87	5.08	1.06
2009	jun	27	5.17	30.55	5.91	6.62	3.77
2009	jul	1	4.50	29.99	6.66	8.12	4.65
2009	jul	11	4.83	20.06	4.15	5.60	1.95
2009	jul	13	1.50	11.67	7.78	9.64	2.20
2009	jul	16	0.50	10.15	20.30	19.80	4.76
2009	jul	20	2.33	10.15	4.35	9.66	2.02
2009	jul	27	2.83	20.82	7.35	27.96	12.91
2009	ago	7	1.50	11.43	7.62	9.64	2.22
2009	ago	20	2.67	26.91	10.09	34.02	21.43
2009	ago	29	4.00	24.89	6.22	14.74	7.20
2009	sep	5	2.33	18.27	7.83	13.70	5.13
2009	sep	7	5.17	11.36	2.20	12.20	2.52
2009	sep	8	4.33	61.97	14.30	82.30	134.33
2009	sep	10	3.17	19.57	6.18	11.20	4.24
2009	sep	12	3.00	45.70	15.23	55.88	64.76

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA.

Continuación.

Año	Mes	Día	Duración [hr]	Hp [mm]	I [mm/hr]	I30 [mm/hr]	R [N/h]
2009	sep	15	7.33	24.09	3.29	11.70	4.97
2009	sep	16	3.67	14.48	3.95	7.12	1.84
2009	sep	22	3.17	23.62	7.46	27.44	14.50
2009	sep	23	2.00	16.76	8.38	15.24	5.32
2009	oct	4	1.67	30.99	18.59	47.76	37.43
2009	oct	11	1.00	17.51	17.51	22.84	9.12
2009	oct	13	3.00	41.13	13.71	41.14	41.14
2009	oct	25	4.17	38.57	9.26	35.04	30.17
2009	oct	27	5.50	13.17	2.40	7.62	1.73
2009	oct	31	0.83	24.64	29.57	44.20	28.38

Tabla 4.45. Valores del potencial erosivo (R) para las tormentas erosivas de la EMA IMTA. Continuación.

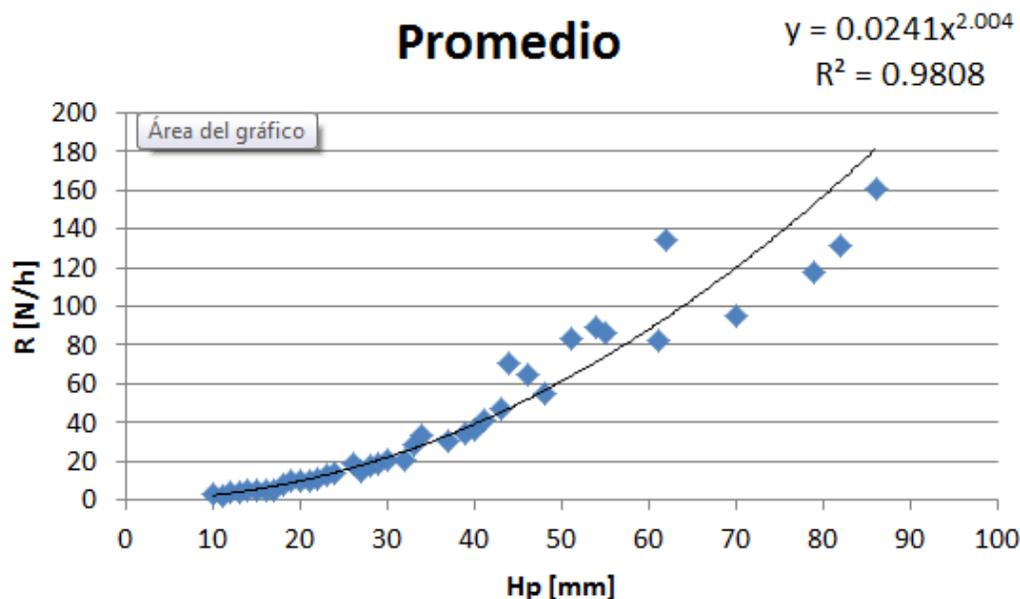


Figura 4.25. Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia (R) y la lluvia acumulada en 24 horas utilizando el promedio de los valores.

Con las relaciones funcionales obtenidas anteriormente, se obtuvo el factor erosivo de la lluvia para cada año registrado de cada una de las estaciones climatológicas considerando solamente las precipitaciones erosivas, los resultados se muestran en las Tablas 4.46 y 4.47. A estas series se aplicó la prueba de independencia de Anderson con la cual se verificó la aleatoriedad de los eventos, los resultados de las pruebas de homogeneidad y de la prueba de tendencia de Mann Kendall para un nivel de significancia de 5 % se muestran en la Tabla 4.48.

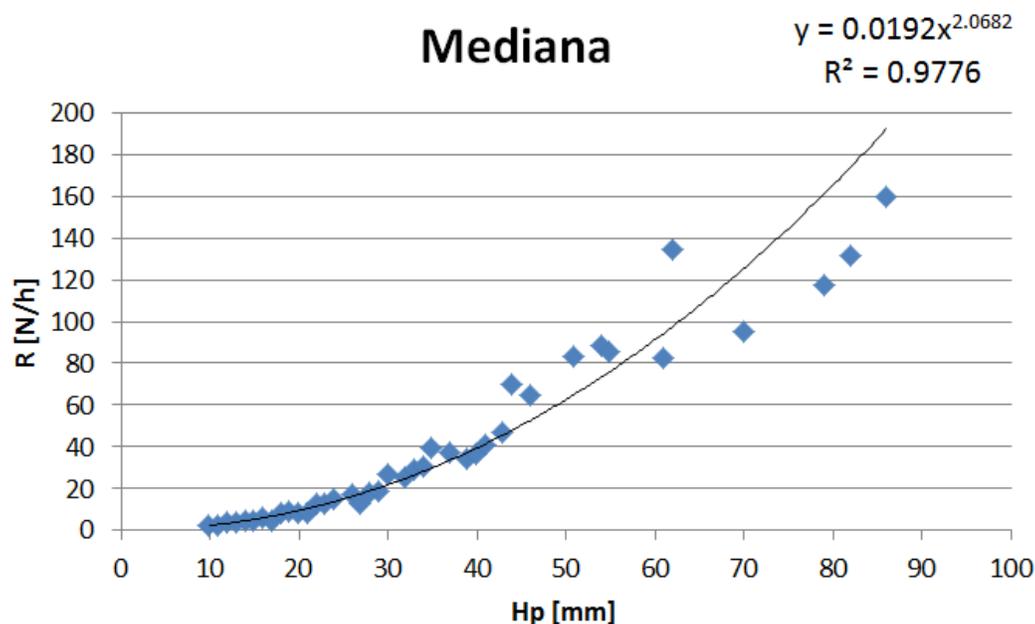


Figura 4.26. Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia (R) y la lluvia acumulada en 24 horas utilizando la mediana de los valores.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
1956	785.0	504.5	628.3	1193.3	1174.5	305.8	197.0
1957	710.0	392.6	335.3	452.8	448.5	188.8	162.3
1958	1275.5	1134.6	520.7	925.4	918.2	518.0	745.6
1959	815.2	488.8	592.5	528.1	524.3	347.7	411.3
1960	552.3	524.6	382.4	382.2	378.7	150.0	209.8
1961	982.9	691.1	629.8	2142.8	1827.5	294.9	125.2
1962	678.6	339.0	517.6	983.1	1080.1	389.2	245.0
1963	733.2	358.4	548.2	1562.5	124.8	370.3	328.9
1964	695.4	690.9	341.7	687.8	468.0	264.5	242.1
1965	731.8	625.5	494.2	726.1	764.1	611.3	434.5
1966	776.2	869.7	440.9	1016.5	733.5	251.4	446.8
1967	1454.2	1444.4	579.3	1974.2	1713.1	480.7	411.3
1968	731.2	731.2	443.3	875.2	1224.9	230.0	565.3
1969	635.2	747.4	377.6	1253.9	1391.6	412.8	711.3
1970	635.8	429.1	274.2	794.6	751.5	310.3	220.5
1971	869.1	880.7	558.8	329.9	567.1	479.8	604.7
1972	605.8	553.5	400.1	910.0	887.6	405.3	318.9

Tabla 4.46. Valor del potencial erosivo de la lluvia (R) para las estaciones climatológicas en estudio con el ajuste del promedio.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
1973	1064.4	1237.7	795.7	2830.2	1803.2	412.7	581.5
1974	546.2	595.9	384.0	1362.4	823.5	501.0	485.0
1975	639.1	652.1	504.8	1083.4	1111.3	345.1	362.6
1976	1691.2	1778.2	496.4	1593.3	1415.6	522.7	418.4
1977	620.1	397.1	375.8	531.3	777.7	698.8	353.7
1978	1187.8	1121.5	359.2	872.1	940.7	520.2	493.3
1979	404.8	347.4	431.5	574.8	857.0	337.9	449.9
1980	1026.0	778.8	673.7	1202.1	1377.5	416.2	607.4
1981	1162.3	1043.2	562.2	1173.7	1445.8	567.2	825.9
1982	678.1	614.6	205.8	815.7	896.9	347.0	454.9
1983	973.4	844.9	623.6	870.0	1154.7	579.0	329.4
1984	708.0	606.7	288.7	874.7	759.6	419.9	582.6
1985	993.3	844.8	593.3	796.0	730.6	541.0	593.3
1986	388.4	531.9	395.6	527.6	568.4	368.1	373.0
1987	1088.4	1113.4	330.7	1208.3	1291.2	454.6	698.4
1988	844.5	806.3	305.5	1578.8	1773.9	435.0	931.1
1989	642.1	522.9	298.1	719.9	691.5	1118.4	252.9
1990	985.6	1069.1	557.7	874.7	1238.2	545.8	678.9
1991	883.1	723.3	443.1	839.9	983.1	369.2	899.0
1992	646.0	749.3	527.5	922.2	1108.0	529.3	912.7
1993	612.4	745.6	432.6	814.9	1044.7	347.6	516.1
1994	361.6	694.5	308.0	667.4	826.2	401.3	549.7
1995	1032.8	1079.0	795.3	1336.4	1649.3	705.3	875.5
1996	611.6	746.2	418.1	964.5	1038.9	365.3	584.8
1997	718.2	823.2	395.4	956.3	956.3	425.7	616.2
1998	1162.1	1474.4	651.6	1043.6	1168.0	465.7	824.3
1999	1020.4	952.6	639.6	822.6	889.9	596.4	429.2
2000	536.5	536.0	604.5	544.7	873.2	297.2	394.4
2001	921.2	921.2	689.9	911.5	1034.8	509.5	867.3
2002	799.2	928.5	541.5	1336.5	2114.2	366.1	567.4
2003	757.8	892.7	862.8	1267.8	1347.6	474.0	669.6
2004	833.4	1075.9	580.7	949.0	1343.8	546.1	895.2
2005	814.6	957.5	673.1	1110.2	1305.0	398.8	444.2
2006	686.3	839.1	663.3	1008.3	1316.2	400.8	488.7
2007	496.1	947.7	589.8	1082.5	1260.3	443.3	298.6
2008	1339.6	1623.5	959.1	1035.3	1126.4	833.7	627.1
2009	722.9	824.7	706.9	811.8	933.9	529.9	860.0
2010	1215.9	1365.4	954.2	1768.9	1994.0	499.8	711.5
2011	1126.1	1291.5	573.2	1285.0	1421.2	556.3	637.9
2012	647.1	758.5	651.4	715.7	899.8	438.6	535.8
2013	975.3	1120.0	792.8	1269.7	1467.5	411.7	241.0

Tabla 4.46. Valor del potencial erosivo de la lluvia (R) para las estaciones climatológicas en estudio con el ajuste del promedio. Continuación.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
1956	788.5	506.9	634.3	1244.1	1223.7	301.7	192.6
1957	718.2	390.1	337.3	451.3	446.8	182.9	158.5
1958	1291.8	1136.1	514.2	924.3	916.8	503.8	740.5
1959	828.7	486.1	592.4	524.7	520.8	341.2	410.1
1960	547.7	519.0	379.7	373.5	370.0	143.4	206.0
1961	1003.9	694.1	635.4	2206.0	1874.5	288.4	121.2
1962	675.6	332.4	516.3	972.4	1098.8	387.7	240.5
1963	734.7	352.9	548.1	1573.0	120.2	364.5	325.2
1964	693.5	684.8	335.6	667.4	454.6	256.6	234.5
1965	733.0	621.4	493.0	709.3	764.8	619.1	427.9
1966	785.3	881.5	436.5	1018.0	729.9	245.0	445.0
1967	1505.7	1496.3	576.2	2026.6	1758.0	476.5	406.9
1968	734.2	734.2	446.3	885.7	1244.3	223.5	573.7
1969	632.9	751.7	374.1	1261.7	1422.1	413.6	717.5
1970	629.5	423.0	268.4	795.7	762.2	308.0	213.0
1971	872.2	887.1	555.3	318.4	561.0	474.0	603.6
1972	601.0	548.9	398.8	903.3	891.8	407.4	317.7
1973	1072.3	1255.8	806.5	2870.8	1834.5	407.7	590.6
1974	541.2	592.0	383.2	1366.8	812.2	499.2	486.2
1975	636.9	650.8	506.2	1098.1	1123.6	344.2	357.7
1976	1754.1	1857.3	493.0	1644.9	1430.7	524.1	420.3
1977	620.0	389.9	369.6	519.6	769.3	710.3	347.7
1978	1219.5	1146.8	352.5	875.2	939.9	519.4	493.0
1979	400.3	341.6	433.8	574.8	854.5	332.7	450.2
1980	1050.4	782.7	677.5	1226.2	1399.5	416.1	609.1
1981	1171.9	1048.8	555.9	1173.5	1476.8	566.5	835.1
1982	685.0	618.2	202.5	821.0	910.4	348.4	455.8
1983	985.4	845.9	621.8	869.7	1157.3	591.7	323.6
1984	712.5	598.8	282.3	882.7	761.1	418.9	588.9
1985	1004.0	847.5	597.2	804.8	730.2	539.2	595.0
1986	382.2	516.6	392.5	522.0	553.4	373.8	371.2
1987	1112.0	1139.7	330.1	1231.0	1319.1	449.3	708.8
1988	861.7	817.1	301.7	1631.4	1840.7	437.2	955.4
1989	642.5	518.2	300.1	740.7	689.3	1155.3	247.0
1990	987.8	1080.9	548.4	876.9	1246.4	537.5	674.8
1991	889.0	719.5	437.9	845.0	995.6	364.3	912.1
1992	638.7	745.6	523.7	928.5	1121.8	530.9	929.3
1993	615.5	746.0	431.7	813.7	1052.1	344.8	515.3

Tabla 4.47. Valor del potencial erosivo de la lluvia (R) para las estaciones climatológicas en estudio con el ajuste de la mediana.

Año	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
1994	356.2	701.6	302.0	659.5	821.7	397.9	563.0
1995	1036.2	1080.2	795.1	1376.0	1715.0	705.5	885.6
1996	611.4	758.7	419.1	975.2	1046.1	368.1	588.0
1997	721.0	826.1	392.5	957.6	960.7	420.3	618.6
1998	1181.9	1499.8	655.0	1054.4	1180.7	463.5	831.9
1999	1041.8	961.5	646.2	827.7	897.6	599.3	418.7
2000	535.4	529.5	604.3	538.7	871.8	296.7	397.5
2001	935.4	935.4	710.5	917.5	1035.7	507.0	880.8
2002	797.8	933.8	537.0	1357.6	2194.6	362.5	571.4
2003	750.1	890.9	862.7	1270.4	1358.1	472.8	674.3
2004	836.5	1095.5	578.4	947.7	1354.8	548.4	912.8
2005	828.3	979.3	692.3	1121.1	1325.4	399.3	450.3
2006	682.3	843.1	665.3	1008.1	1326.7	400.6	490.0
2007	488.4	960.2	592.1	1095.9	1282.1	441.4	290.5
2008	1365.5	1670.4	967.0	1042.4	1139.2	848.1	631.6
2009	720.4	826.6	712.7	815.4	944.5	526.2	884.0
2010	1231.7	1387.9	968.2	1817.7	2058.2	498.0	711.3
2011	1147.6	1320.9	573.6	1317.7	1461.4	573.7	640.8
2012	645.0	760.7	660.4	722.2	914.2	435.4	536.3
2013	983.9	1135.8	795.3	1292.1	1502.6	411.2	232.5

Tabla 4.47. Valor del potencial erosivo de la lluvia (R) para las estaciones climatológicas en estudio con el ajuste de la mediana. Continuación.

Estación	Conclusión	Resultado
17002	Homogénea	Sin tendencia
17004	Homogénea	Tendencia creciente
17014	No Homogénea	Tendencia creciente
17022	Homogénea	Sin tendencia
17047	Homogénea	Tendencia creciente
17026	No Homogénea	Tendencia creciente
17018	No Homogénea	Tendencia creciente

Tabla 4.48. Resultados de las pruebas de homogeneidad y tendencia a los valores del potencial erosivo de la lluvia (R) para las estaciones climatológicas en estudio.

Como se puede observar en la Tabla 4.48, existe una tendencia creciente en la mayoría de las estaciones, esto indica que el potencial erosivo de la lluvia se está incrementando y en consecuencia el aporte de sedimentos a la subcuenca podría ser mayor.

Para la estimación del aporte de sedimentos se utilizó la ecuación (3.1). De las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se obtuvieron los factores de tipo de suelo (K), longitud y pendiente (SL) y cobertura vegetal (C), los cuales se ponderaron de acuerdo con las áreas de tipo y usos de suelo para cada estación en estudio, Tablas 4.49 y 4.50; para el factor de prácticas de cultivo y conservación de suelo (P) se consideró el escenario más desfavorable, Tabla 4.51. El aporte de sedimentos y el nivel de pérdida de suelo de acuerdo con la clasificación de SEMARNAT (2013b) mostrada en la Figura 3.22 se muestran en las Tablas 4.52 y 4.53.

Como existe una tendencia creciente en las series del factor erosivo de la lluvia, para los análisis subsecuentes se utiliza el ajuste generado de considerar la mediana ya que arroja resultados más conservadores.

Grupo de suelo de referencia	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
AN	17.32	-	-	93.56	205.89	-	-
LP	-	-	32.71	-	15.62	4.68	0.74
LV	21.93	25.59	-	-	-	-	-
PH	7.49	43.79	71.12	-	-	-	-
RG	-	-	18.52	-	-	54.93	13.77
VR	-	-	45.67	-	-	39.15	3.35
NA	35.57	28.12	23.91	-	0.21	5.65	-
Área total	82.32	97.50	191.95	93.56	221.72	104.41	17.87

Tabla 4.49. Áreas [km²] por tipo de suelo para cada estación en estudio. (INEGI, 2013b). NA: No Aplicable.

Uso de suelo y vegetación	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
Agricultura	11.80	29.41	86.65	30.31	15.86	63.11	13.84
Asentamientos Humanos	10.46	1.17	31.14	45.04	-	8.84	1.20
Bosque de Coníferas	19.02	-	-	4.78	171.01	-	-
Bosque de Encino	2.10	-	-	-	-	-	-
Bosque Mesófilo de Montaña	-	-	-	13.40	3.72	-	-
Cuerpo de Agua	-	-	-	-	0.21	-	-
Pastizal Inducido	3.19	38.99	24.39	-	30.92	8.70	1.40
Selva Caducifolia	0.36	0.01	26.35	0.03	-	18.11	1.43
Zona Urbana	35.38	27.92	23.41	-	-	5.65	-
Área total	82.32	97.50	191.95	93.56	221.72	104.41	17.87

Tabla 4.50. Áreas [km²] por uso de suelo y vegetación para cada estación en estudio. (INEGI, 2013a).

Estación	K [ton-h/N-ha]	SL [adimensional]	C [adimensional]	P [adimensional]
17002	0.38	6.03	0.62	1.00
17004	0.37	5.71	0.42	1.00
17014	0.27	5.11	0.47	1.00
17022	0.38	6.03	0.14	1.00
17047	0.36	6.79	0.04	1.00
17026	0.19	4.89	0.38	1.00
17018	0.13	4.51	0.38	1.00

Tabla 4.51. Valores de los factores utilizados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para las estaciones climatológicas en estudio.

Estación	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]	Nivel [Ton/ha/año]
17002	831.6	1169.39	157.61	Alta
17004	834.2	736.84	94.95	Alta
17014	529.3	347.01	36.96	Moderada
17022	1029.2	324.68	42.30	Moderada
17047	1081.7	102.54	10.46	Moderada
17026	449.2	161.12	20.38	Moderada
17018	522.4	111.70	21.75	Moderada

Tabla 4.52. Nivel de pérdida de suelo y valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las estaciones climatológicas en estudio obtenidos con el ajuste del promedio.

Estación	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]	Nivel [Ton/ha/año]
17002	838.9	1179.68	158.99	Alta
17004	841.5	743.26	95.78	Alta
17014	529.7	347.21	36.98	Moderada
17022	1039.4	327.93	42.73	Moderada
17047	1096.0	103.90	10.60	Moderada
17026	448.7	160.94	20.36	Moderada
17018	524.3	112.11	21.83	Moderada

Tabla 4.53. Nivel de pérdida de suelo y valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las estaciones climatológicas en estudio obtenidos con el ajuste de la mediana.

En la Tabla 4.54 se muestran los valores del potencial erosivo de la lluvia (R), la pérdida de suelo anual (A) y el aporte de sedimentos (AS) empleando el ajuste de la mediana, estos resultados se obtuvieron de ponderar las áreas de influencia de cada estación climatológica para determinar el nivel de aporte de sedimentos en la subcuenca de acuerdo a la clasificación de SEMARNAT (2013b); el resultado arrojado fue un nivel moderado.

R [N/H]	802.20
A [ton/ha/año]	381.49
AS [ton/ha/año]	47.43

Tabla 4.54. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para la subcuenca en estudio.

También se realizó lo anterior para las series de los trenes de lluvia máximos de diferentes longitudes. Los resultados de las pruebas de homogeneidad y Mann Kendall se muestran en las Tablas 4.55 y 4.56, se observa que los trenes de lluvia de nueve días en la estación 17022 y de seis días en la estación 17047 son procesos no estacionarios presentando una tendencia creciente, los trenes de lluvia de cinco días para la estación 17047 son homogéneos pero presentan una tendencia creciente, el resto de las series son procesos estacionarios sin tendencia.

Longitud del tren de lluvia	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
3	H	H	H	H	H	H	H
4	H	H	H	H	H	H	H
5	H	H	H	H	H	H	H
6	H	H	H	H	NH	H	H
7	H	H	H	H	H	H	H
8	H	H	H	H	H	H	H
9	H	H	H	NH	H	H	H
10	H	H	H	H	H	H	H

H: Homogénea; NH: No Homogénea

Tabla 4.55. Resultados de las pruebas de Homogeneidad a los valores del factor erosivo (R) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de las estaciones en estudio.

Longitud del tren de lluvia	17002	17004	17014	17022	17047	17026	17018
3	ST						
4	ST						
5	ST	ST	ST	ST	TC	ST	ST
6	ST	ST	ST	ST	TC	ST	ST
7	ST						
8	ST						
9	ST	ST	ST	TC	ST	ST	ST
10	ST						

ST: Sin Tendencia; TC: Tendencia Creciente

Tabla 4.56. Resultados de la prueba de Mann Kendall a los valores del factor erosivo (R) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de las estaciones en estudio.

Los valores del potencial erosivo de la lluvia (R), la pérdida de suelo anual (A) y el aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia en las estaciones climatológicas se muestran en las Tablas 4.57 a 4.63; estos valores se ponderaron de acuerdo con las áreas de influencia de cada estación para obtener un valor por cada longitud de tren de lluvia, Tabla 4.64.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	48.19	67.77	9.13
4	70.86	99.64	13.43
5	85.98	120.91	16.30
6	66.47	93.47	12.60
7	92.92	130.66	17.61
8	100.89	141.87	19.12
9	84.98	119.51	16.11
10	130.17	183.05	24.67

Tabla 4.57. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17002.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	51.32	45.34	5.84
4	67.18	59.34	7.65
5	76.55	67.61	8.71
6	70.14	61.95	7.98
7	84.50	74.64	9.62
8	99.42	87.82	11.32
9	110.09	97.24	12.53
10	93.79	82.85	10.68

Tabla 4.58. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17004.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	41.76	27.38	2.92
4	51.71	33.90	3.61
5	51.03	33.45	3.56
6	46.20	30.29	3.23
7	69.97	45.87	4.89
8	66.82	43.81	4.67
9	81.74	53.59	5.71
10	98.21	64.38	6.86

Tabla 4.59. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17014.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	58.34	18.40	2.40
4	59.09	18.64	2.43
5	65.76	20.74	2.70
6	119.49	37.70	4.91
7	87.70	27.67	3.60
8	107.37	33.87	4.41
9	87.44	27.59	3.59
10	132.99	41.96	5.47

Tabla 4.60. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17022.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	59.02	5.59	0.57
4	68.08	6.45	0.66
5	71.63	6.79	0.69
6	103.16	9.78	1.00
7	83.06	7.87	0.80
8	100.67	9.54	0.97
9	80.73	7.65	0.78
10	162.05	15.36	1.57

Tabla 4.61. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17047.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	34.41	12.34	1.56
4	45.63	16.37	2.07
5	36.59	13.12	1.66
6	42.45	15.23	1.93
7	52.63	18.88	2.39
8	55.92	20.06	2.54
9	73.90	26.51	3.35
10	70.16	25.17	3.18

Tabla 4.62. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17026.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	52.82	11.30	2.20
4	52.61	11.25	2.19
5	49.31	10.54	2.05
6	48.22	10.31	2.01
7	70.93	15.17	2.95
8	122.86	26.27	5.12
9	90.55	19.36	3.77
10	86.50	18.50	3.60

Tabla 4.63. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la estación 17018.

Longitud del tren de lluvia [días]	R [N/H]	A [ton/ha/año]	AS [ton/ha/año]
3	49.51	24.35	3.01
4	60.09	31.61	3.92
5	63.11	34.56	4.31
6	74.78	33.38	4.14
7	77.47	41.29	5.12
8	88.01	45.10	5.63
9	85.05	45.71	5.65
10	118.57	56.58	6.97

Tabla 4.64. Valores del potencial erosivo de la lluvia (R), pérdida de suelo anual (A) y aporte de sedimentos (AS) para las diferentes longitudes de trenes de lluvia de la subcuenca del río Apatlaco.

Las estaciones 17002 y 17004 presentan el mayor aporte de sedimentos por tren de lluvia, este va de un nivel ligero a moderado; en el caso de la estación 17002 el 31 % de su superficie se destina a actividades agropecuarias (18 %) y asentamientos humanos (13 %), para la estación 17004 el 70 % es de uso agropecuario.

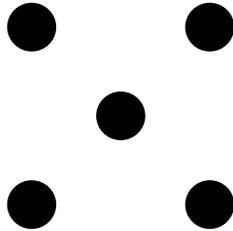
El valor del aporte de sedimentos para la estación 17047 es menor a dos toneladas por hectárea por año equivalente a un nivel nulo, esto se debe en gran parte a que el 79 % de su superficie está cubierta por bosque.

Se observa que las estaciones 17014 y 17022 están en un nivel entre nulo y ligero. En la estación 17014 el 58 % de su superficie es de uso agropecuario, 14 % selva y 16 % asentamientos humanos, el 50 % del total se localiza sobre suelos no susceptibles a la erosión; de la estación 17022 el 20 % está cubierto por bosque y 32 % se destina a agricultura, el 100 % del suelo es de tipo andosol (susceptible a la erosión).

Las estaciones 17026 y 17018 se encuentran en un nivel nulo, ya que su superficie se ubica en un suelo con baja susceptibilidad a la erosión.

En la Tabla 4.64 se observa que en general el aporte de sedimentos se incrementa conforme la longitud del tren de lluvia es mayor.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Los Sistemas de Información Geográfica son indispensables para el estudio y análisis geoespacial de cuencas, ya que permiten conocer las características físicas para su posterior asociación con eventos extremos de precipitación.

La cobertura de las estaciones climatológicas en México es 0.002 estaciones por km² lo que resulta en un bajo monitoreo de las variables climatológicas, por tal motivo se sugiere realizar una ampliación de la red conforme a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial con el fin de monitorear el territorio en su totalidad.

Al aplicar las técnicas de delimitación de regiones homogéneas la estación 17006 no es homogénea con ninguna estación; mientras que, las estaciones 17018 y 17013 son homogéneas entre ellas y se toma como criterio que toda la región comprendida por las nueve estaciones es una sola.

Preliminarmente se verificó la aleatoriedad de las series de precipitación, el rellenado de los datos se realizó con el método de la interpolación inversa al cuadrado. Se comenzó por rellenar la estación con mayor longitud de registro, 17014, interpolando las estaciones que tuvieran precipitaciones del mismo orden para así no sub o sobreestimar los eventos. Se analizaron los días en los que la precipitación estimada era muy baja y revisando con las estaciones más cercanas se decidió tomar en cuenta el valor o considerarlo cero para preservar la tendencia de las series. Los estadísticos muestrales de las series rellenadas se mantuvieron en el orden de las series registradas, de igual manera se preservó la independencia de los eventos.

Las pruebas de homogeneidad indican que las series de las estaciones 17002, 17004, 17014 y 17022 son estacionarias; mientras que las estaciones restantes ya presentan cambio, es decir, son no homogéneas. El análisis de tendencia muestra que la precipitación acumulada anual en la estación 17004 se ha incrementado, las estaciones que resultaron no homogéneas ya tienen una tendencia creciente, por lo tanto los resultados del análisis de frecuencias para estas estaciones deben tomarse con reserva.

La precipitación media de la subcuenca obtenida por el método de los polígonos de Thiessen es de 1232.12 mm por año y se comprobó que es un proceso homogéneo y no presenta tendencia. El trazo los polígonos hace ver que las estaciones 17039 y 17013 no

pertenecen a la subcuenca en estudio por lo tanto se decide eliminarlas de los análisis posteriores.

En el análisis de frecuencias los Errores Estándar de Ajuste (EEA) son menores de 7 mm y se consideran aceptables. El cálculo de las $i-d-Tr$ se realizó con el método empírico del SCS-USA debido a que solo se contó con información pluviométrica, los valores promedio de los días con lluvia apreciable en el año de las series rellenadas para las estaciones en estudio se mantuvieron en el orden de los valores registrados. Los valores de la relación R se consideran altos, ya que en México el valor máximo de esta relación, en promedio, es de 0.7, esto nos indica que la probabilidad de inundación en la zona es alta, teniendo los valores más elevados las áreas de influencia de las estaciones 17014 y 17026, recordando que esta última ya presenta tendencia creciente y es un proceso no homogéneo.

En una primera fase de este trabajo se pretendió establecer a través de las curvas intensidad- duración- periodo de retorno ($i-d-Tr$) el valor del factor erosivo de la lluvia utilizado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, sin embargo no se obtuvo la información necesaria de registros pluviográficos para comprobar dicha hipótesis, por lo que se recomienda para una futura línea de investigación.

De la caracterización de los trenes de lluvia para longitudes de tres a 10 días se concluye que las series son estacionarias, a excepción de los trenes de lluvia de seis días para la estación 17047; la prueba de tendencia de Mann Kendall indica que existe un incremento en el valor de la precipitación para los trenes de lluvia de nueve días en la estación 17022, de seis días para la estación 17047 y de tres días en la estación 17018; por esto los análisis posteriores para dichas longitudes y estaciones deben considerarse.

A nivel nacional las estadísticas indican que los meses de mayor precipitación son septiembre, octubre y noviembre; para la región hidrológica en estudio las precipitaciones máximas y los eventos máximos de trenes de lluvia ocurren entre los meses de junio a septiembre, teniendo mayor frecuencia en el mes de agosto. Se observó también, la presencia de hasta 58 días consecutivos de precipitación en la estación 17022 en el año 1961 durante junio, julio y agosto; otro evento de este tipo ocurrió en la estación 17004 en el año de 1986 al presentarse un tren de lluvia de 42 días entre los meses de junio y julio. Resultó interesante, observar que en un evento máximo de trenes de lluvia con una

longitud entre tres a 10 días se acumula del 9.2 % al 31.9 % de la precipitación media anual, la mayor intensidad observada fue de 68.5 mm por día para los trenes de lluvia de cuatro días de la estación 17026.

De la Estación Meteorológica Automática IMTA se obtuvieron las series de las variables H_p máxima anual y H_p acumulada anual, se observó que ambas son eventos aleatorios, estacionarios y sin tendencia. Con los 323 eventos de tormentas erosivas analizados se encontró la relación funcional entre el factor R y la lluvia acumulada en 24 horas ajustándolos a una relación potencial considerando dos casos: el primero trabajando con la media de los valores y el segundo considerando la mediana.

Haciendo uso de estas relaciones se obtuvo el factor erosivo de la lluvia para cada año registrado de cada una de las estaciones climatológicas, los eventos son aleatorios y se concluye que existe una tendencia creciente en la mayoría de las estaciones, esto indica que el potencial erosivo de la lluvia se está incrementando y en consecuencia el aporte de sedimentos a la subcuenca podría ser mayor, para los análisis subsecuentes se utilizó el ajuste de la mediana ya que arroja resultados más conservadores.

La estimación del aporte de sedimentos se calculó con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, de acuerdo con la clasificación de SEMARNAT (2013b) las estaciones 17002 y 17004 se encuentran en un nivel de pérdida de suelo alto mientras que el resto tienen una aportación moderada, es importante considerar que en las estaciones que ya presentan una tendencia creciente en la precipitación, los trenes de lluvia y el factor erosivo este nivel puede llegar a ser alto si no se realizan acciones para aminorar los efectos de la erosión hídrica. El aporte de sedimentos en la subcuenca se encuentra en un nivel moderado.

Se calculó el factor erosivo para las series de los trenes de lluvia máximos de diferentes longitudes, la prueba de independencia de Anderson indica que los valores son variables aleatorias; de los resultados de las pruebas de homogeneidad y Mann Kendall se observa que los trenes de lluvia de nueve días en la estación 17022 y de seis días en la estación 17047 son procesos no estacionarios y ya presentan una tendencia creciente, el resto de las series son procesos estacionarios sin tendencia.

Las estaciones 17002 y 17004 presentan el mayor aporte de sedimentos por tren de lluvia, este va de un nivel ligero a moderado; en el caso de la estación 17002 el 31 % de su superficie se destina a actividades agropecuarias (18 %) y asentamientos humanos (13 %), para la estación 17004 el 70 % es de uso agropecuario.

El valor del aporte de sedimentos para la estación 17047 es menor a dos toneladas por hectárea por año equivalente a un nivel nulo, esto se debe en gran parte a que el 79 % de su superficie está cubierta por bosque.

Se observa que las estaciones 17014 y 17022 están en un nivel entre nulo y ligero. En la estación 17014 el 58 % de su superficie es de uso agropecuario, 14 % selva y 16 % asentamientos humanos, el 50 % del total se localiza sobre suelos no susceptibles a la erosión; de la estación 17022 el 20 % está cubierto por bosque y 32 % se destina a agricultura, el 100 % del suelo es de tipo andosol (susceptible a la erosión). Las estaciones 17026 y 17018 se encuentran en un nivel nulo, ya que su superficie se ubica en un suelo con baja susceptibilidad a la erosión.

En general el aporte de sedimentos se incrementa conforme la longitud del tren de lluvia es mayor; el nivel de pérdida de suelo al año de un evento extremo de trenes de lluvia se encuentra entre nulo y moderado, si las tendencias siguen aumentando estos provocarán mayor degradación de la cuenca teniendo como consecuencia la disminución de la calidad del agua y la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos, la alteración del hábitat de especies silvestres de flora y fauna, la afectación de los ciclos hidrológicos teniendo una disminución de la recarga de los mantos acuíferos y la detonación de deslizamientos de laderas entre otros, por lo anterior es recomendable realizar obras para el control de la erosión hídrica considerando las necesidades de cada cuenca y así contribuir en la conservación de los suelos de México y la prevención y mitigación de riesgo por fenómenos naturales.

REFERENCIAS

Agua y SIG. (2011). *Delimitación de cuencas con ArcGIS. Herramienta Hydrology de Spatial Analyst Tools*. [En línea]. Ecuador. Disponible en:

<http://www.aguaysig.com/2011/03/delimitacion-de-cuencas-con-arcgis.html>

Alcántara, I. *Inestabilidad de laderas, desastres e impacto ambiental*. [En línea]. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en:

[http://www.ipgh.org/Reuniones-Tecnicas-Conjuntas/Segunda-Reunion/Files/ALCANTARA-Irasema \(Plenaria\) \(Web\).pdf](http://www.ipgh.org/Reuniones-Tecnicas-Conjuntas/Segunda-Reunion/Files/ALCANTARA-Irasema (Plenaria) (Web).pdf)

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México. Limusa. ISBN 968-18-3014-8.

Aparicio, F. (2012). *Información estadística y geográfica para prevenir y mitigar los efectos de sequías e inundaciones en la población y la economía*, [Diapositiva]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 33 diapositivas. Disponible en:

http://www.inegi.org.mx/eventos/2012/sequias_inundaciones/doc/P3_JavierAparicio.pdf

ArcGIS 10.1. (2012a). *Arc Hydro for ArcGIS 10 v.2.1*. Estados Unidos. Environmental Systems Research Institute.

ArcGIS 10.1. (2012b). *Arc Map 10.1*. [Software] Estados Unidos. Environmental Systems Research Institute.

ArcGIS 10.1. (2013). *ArcGIS Help*. [En línea]. Estados Unidos. Environmental Systems Research Institute. Disponible en:

<http://resources.arcgis.com/es/help/>

Balbontin, C., Cruz, C., Etchevers, J., Krasilnikov, P., Paz, F. (2007). *Variabilidad morfofisiológica de los suelos en México y su relación con el modelo fisiográfico nacional*. [En Línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/08/13/71688>

Cabadas, H., Díaz J., Sedov, S., Solleiro, E. (2010). *Paleosuelos y tepetates del Glacis de Buenavista Morelos (México): testigos de eventos climáticos de la transición Pleistoceno-Holoceno*. [En línea]. México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62 (3). Disponible en:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000300011&script=sci_arttext

Cardoza, R., Cuevas, L., García, Jacinto S., Guerrero, Jesús A., Gonzalez Juan C., Hernández H., Lira, María de L., Nieves, Jorge L., Tejeda, D., Vázquez, Carlos M. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas*. [En línea]. México. Comisión Nacional Forestal. ISBN 968- 6021-19-1. Disponible en:

<http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/suelos>

Cartoteca Rafael Mas. (2011). *Tutorial (nivel básico) para la elaboración de mapas con ArcGIS*. [En línea]. España. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en:

http://biblioteca.uam.es/cartoteca/documentos/CURSO_SIG_BASIC0_I.pdf

Centro Nacional para la Prevención de Desastres. (2013). *Atlas Nacional de Riesgos*. [En línea]. México. Secretaría de Gobernación. Disponible en:

<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

Comisión Nacional del Agua. (1966). *Pérdida de Suelos en Cuencas*. En: *Manual de Ingeniería de Ríos*. México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2007). *Clima Computarizado, CLICOM*. [Base de datos]. México. Servicio Meteorológico Nacional.

Comisión Nacional del Agua. (2010). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Morelos*. [En línea]. México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en:

<http://www.ceamorelos.gob.mx/files/ml/ProgramaHidrico.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2012a). *Atlas Digital del Agua 2012*. [En línea]. México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/atlas/index.html>

Comisión Nacional del Agua. (2012b). *Estadísticas del agua en México, edición 2012*. [En línea]. México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=106>

Comisión Nacional del Agua. (2013a). *Estaciones Meteorológicas Automáticas*. [En línea]. México. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en:

<http://smn.cna.gob.mx/emas/>

Comisión Nacional del Agua. (2013b). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. [En línea]. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>

Comisión Nacional del Agua. (2013c). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. [En línea]. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en:

http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper

Consortium for Spatial Information. (2004). *What is CGIAR-CSI?* [En línea]. USA. Consultative Group on International Agricultural Research. Disponible en:

http://csi.cgiar.org/WhtlsCGIAR_CSI.asp

Consortium for Spatial Information. (2013). *SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1* [En línea]. USA. Consultative Group on International Agricultural Research. Disponible en:

<http://srtm.csi.cgiar.org/>

<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1#methodology>

Coordinación General de Conservación y Restauración. (2010). *Programas y Acciones en Reforestación, Conservación y Restauración de Suelos, Incendios Forestales y Sanidad Forestal*. [En línea]. México. Comisión Nacional Forestal. Disponible en:

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/1359Programas%20y%20Acciones%20en%20Reforestaci%C3%B3n,%20Conservaci%C3%B3n%20y%20Restauraci%C3%B3n%20de%20Suelos,%20Incendios%20Forestales%20y.pdf>

Cruz, O. y Mendoza, I. (2010). *Transferencia de tecnología para la aplicación de la información de las estaciones agroclimáticas y consolidación de la red estatal*. [Diapositiva]. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 28 diapositivas. Disponible en:

http://galileo.imta.mx/FUPROGRO/doc_eventos/c02_Mendozal_TTAIEACRE.pdf

Departamento de Desarrollo Sostenible (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía*. [En línea]. Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

<http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s09.htm>

Dorronsoró, C. (2013). *Información acerca del suelo*. [En línea]. España. Universidad de Granada. Disponible en:

<http://edafologia.ugr.es/index.htm>

Escalante, C. (2005). *Efecto en la estimación del factor erosivo de la lluvia en el aporte de sedimentos*. 85-102 pp. En: Rivera, F., Gutiérrez, A., Val, R., Mejía, R., Sánchez, P., Aparicio, J., Díaz, L. (Editores). *La Medición de sedimentos en México*. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN 968-5536-53-8.

Escalante, C. (2012). *Manejo Integrado de Cuencas*. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

Escalante, C. (2013). *Hidrología Urbana*. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

Escalante, C. y Reyes, L. (2005). *Análisis de la precipitación en el municipio de Morelia, Michoacán*. 41-58 pp. En: Gutiérrez, A., Ramírez, A., Sánchez, F. *Las ciencias del agua en Morelia, aplicaciones frente a los retos del siglo XXI*. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN 968-5536-55-4.

Escalante, C. y Reyes, L. (2008). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. ISBN 970-32-0173-3.

Giraldo, Julián. (2008). *Historia de los SIG*. [En línea]. Colombia. Disponible en:

<http://juliangiraldo.wordpress.com/>

Ibañez, J. (2012a). *Suelos antropogenéticos y antrosoles paleolíticos por marisqueo*. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/04/17/140357>

Ibañez, J. (2012b). *Suelos artificiales, Tecnosoles y Sustratos*. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/11/04/141736>

Ibañez, J., Manríquez, F. (2011). *Stagnosoles*. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/03/17/138151>

Ibañez, J., Manríquez, F. (2012a). *Alisoles (WRB, 1998)*. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/04/19/141598>

Ibañez, J., Manríquez, F. (2012b). *Criosoles, WRB (suelos minerales condicionados por el Permafrost)*. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/11/08/142393>

Ibáñez, J., Manríquez, F. (2012c). *Lixisoles*, WRB. [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/05/09/141636>

Ibáñez, J., Manríquez, F. (2013). *Ferralsoles* (WRB). [En línea]. España. Madrimasd. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/04/25/143832>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2006). *Extractor Rápido de Información climatológica, ERIC III*. [Software]. México. Disponible en:

http://www.imta.gob.mx/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=48&category_id=28&option=com_virtuemart&Itemid=142&vmcchk=1&Itemid=142

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1994). *Diccionario de datos de uso de suelo y vegetación. Escala 1:1 000 000*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004). *Guía para la Interpretación de Cartografía. Edafología*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. ISBN 970-13-4376-X. Disponible en:

http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/edafo/edafi.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

<http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL CARAC EDA FIS VS ENERO 29 2008.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009a). *Diccionario de datos edafológicos. Escala 1:250 000*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/DDEdafologicos_250K.pdf?s=geo..

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009b). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000 Serie III*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. ISBN 978-607-494-015-2. Disponible en:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009c). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación. Escala 1: 250 000*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0*. [En línea]. México. Disponible en:

http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrograficas.aspx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). *Diccionario de datos de erosión del suelo*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/diccionario/dicc_erosion/dicc_erosion.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000 Serie IV*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. ISBN 978-607-494-310-8. Disponible en:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825003407&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=0&pg=0&ct=207000000>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013a). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 Serie V*. [En línea]. México. Disponible en:

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/Default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013b). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico: Escala 1:250 000 Serie II*. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013c). *Datos de Relieve*. [En línea]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en:

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

International Soil Reference and Information Centre. (2013). *Podzols*. [En línea]. Países Bajos. International Soil Reference and Information Centre. Disponible en:

<http://www.isric.org/about-soils/world-soil-distribution/podzols>

IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007*. [En línea]. Roma. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Disponible en:

<http://www.fao.org/docrep/011/a0510s/a0510s00.htm>

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2003, 25 febrero). [En línea]. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Disponible en:

<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/259.pdf>

Llanderal, T. *Sistemas silvopastoriles*. [En línea]. México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Sistemas%20silvopastoriles.pdf>

Luzanía Manuel. (2005). *¿Qué son los sistemas de información geográfica?*. Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana. XVIII (3). [En línea]. México. Disponible en:

<http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol18num3/articulos/informacion%20geografica/index.htm>

Matalas, N. C. y B. Jacobs. (1964). *A correlation procedure for augmenting hydrologic data*. [Estados Unidos]. U.S. Geological Survey. Professional Paper. 434-E, E1-E7.

Miliarium Aureum S. L., (2013). *Modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisado (RUSLE)*. [En línea]. Madrid.

<http://www.miliarium.com/prontuario/medioambiente/suelos/Rusle.htm>

Moreno, Antonio. (2008). *Sistemas y Análisis de la Información geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS*. (Segunda edición). México. Alfaomega.

Noticias Terra. (2013). *Deslave en La Pintada, Guerrero donde hay 68 desaparecidos*. [En línea]. México. Disponible en:

<http://noticias.terra.com.mx/mexico/estados/deslave-en-la-pintada-guerrero-donde-hay-68-desaparecidos,2b2867636c831410VgnVCM3000009acceb0aRCRD.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales, edición 2010*. [En línea]. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN 978-607-7908-33-3. Disponible en:

<http://infoteca.semarnat.gob.mx/infotecav0/atlas.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013a). *Compendio de Estadísticas Ambientales 2012*. [En línea]. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en:

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio_2012/index.html

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013b). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012*. [En línea]. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN 978-607-8246-61-8. Disponible en:

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/00_intros/pdf.html

Sisa, Augusto. (2011). *Tutorial: Arc Hydro Tools para ArcGIS 9.1*. [Video]. Colombia. Disponible en:

http://www.youtube.com/watch?v=4qT1aVFgAEw&list=FL5TPJspgc-nX1r7_29czM3Q&feature=mh_lolz

Torres, J. (2011). *La Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras y las acciones de la Comisión Nacional Forestal*. [Diapositiva]. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 21 diapositivas. Disponible en:

<http://www.conafor.gob.mx/>

Unidad de Comunicación Social. (2009). *Restauración de ecosistemas forestales. Guía básica para comunicadores*. [En línea]. México. Comisión Nacional Forestal. Disponible en:

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf>

Vázquez-Aguirre, J. (2006). *Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimientos inmediatos*. 1er Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz. [En línea]. México. Disponible en:

http://www.csva.gob.mx/foro_medioambiente/MA/pdf/ForoMA%209%20Datos.pdf

Xix, G. (2010). *Estado actual y futuro de la cartografía de suelos en México*. [Diapositiva]. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 36 diapositivas. Disponible en:

http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/LatinAmerica_Atlas/Meeting2010/08Sep/9_Mexico.pdf

Zaragoza, J. *El sistema agropastoril*. [En línea]. México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Sistema%20agropastoril.pdf>

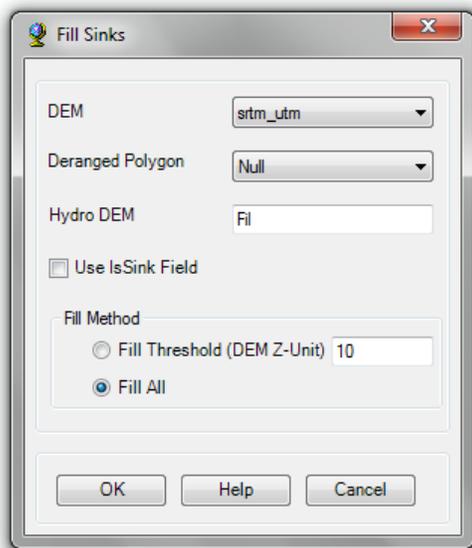
ANEXO A

A.1 Caracterización de una cuenca utilizando el *software* ArcGIS 10.1

A continuación se muestra como realizar la caracterización de una cuenca utilizando el *software* ArcGIS 10.1, para esto es necesario contar con un MDE, tal y como se explica en el subcapítulo 1.2.3, y la barra de herramientas **Arc Hydro Tools** que es posible descargar de internet, ya que las funciones a utilizar pertenecen a ella. Se presenta una breve descripción de la función a utilizar, la ruta para llegar a ella, la información requerida y el resultado del procesamiento.

1. Para iniciar la caracterización de la cuenca es necesario abrir un mapa en ArcMap y agregar el MDE a utilizar en coordenadas adecuadas, es decir UTM, Figura A.2.
2. En el MDE pueden existir celdas rodeadas por otras de mayor elevación donde el agua se queda atrapada y no puede fluir, para este análisis es necesario que el modelo sea continuo por lo que se rellenan dichos puntos utilizando la función **Fill Sinks**, la cual modifica el valor de la elevación de las celdas para eliminar el problema. El resultado, Figura A.3, es un modelo donde no existen puntos de acumulación de flujo (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > DEM manipulation > Fill Sinks



DEM: Modelo Digital de Elevaciones en coordenadas UTM a utilizar (paso 1).

Hydro DEM: MDE homogéneo.

Figura A.1. Información requerida por la función *Fill Sinks*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

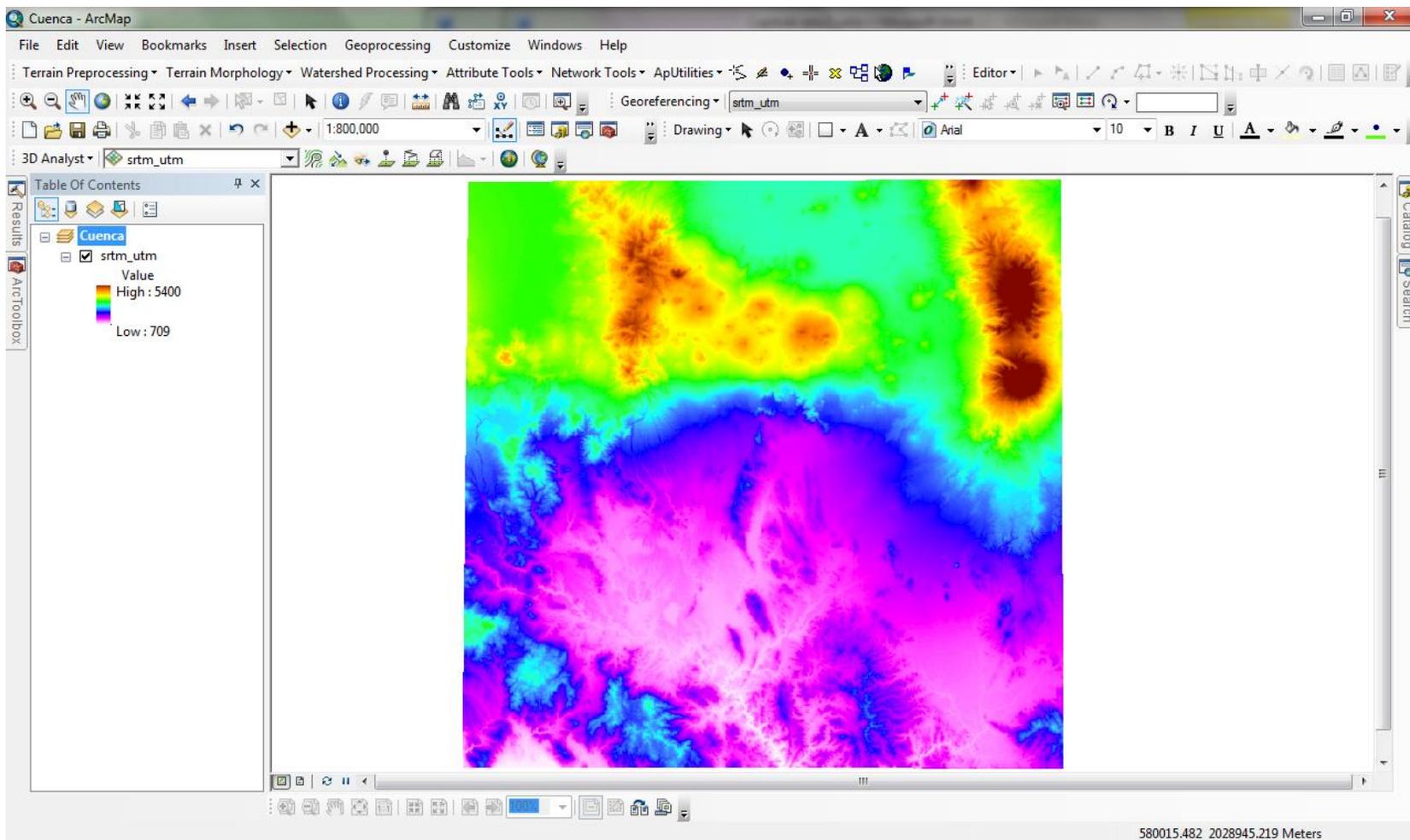


Figura A.2. Modelo Digital de Elevación en coordenadas UTM. (ArcGIS 10.1, 2012b).

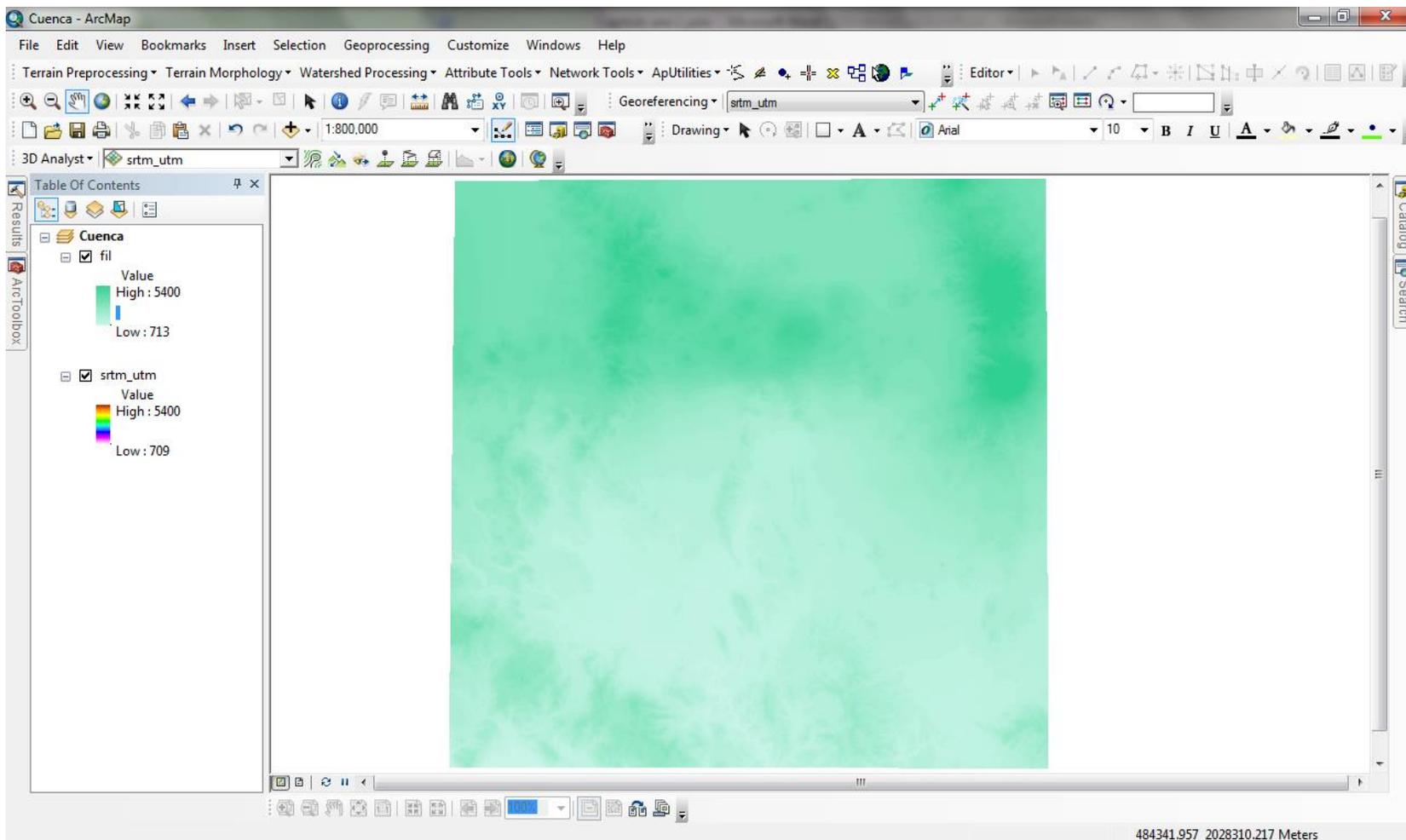


Figura A.3. Capa resultante de aplicar la función *Fill Sinks*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

3. Ya que se cuenta con un MDE homogéneo (paso 2) es necesario calcular la dirección del flujo en la red utilizando la función **Flow Direction**; en la capa resultante, Figura A.6, los valores de cada celda indican la dirección del descenso más pronunciado a partir de dicha celda (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Flow Direction

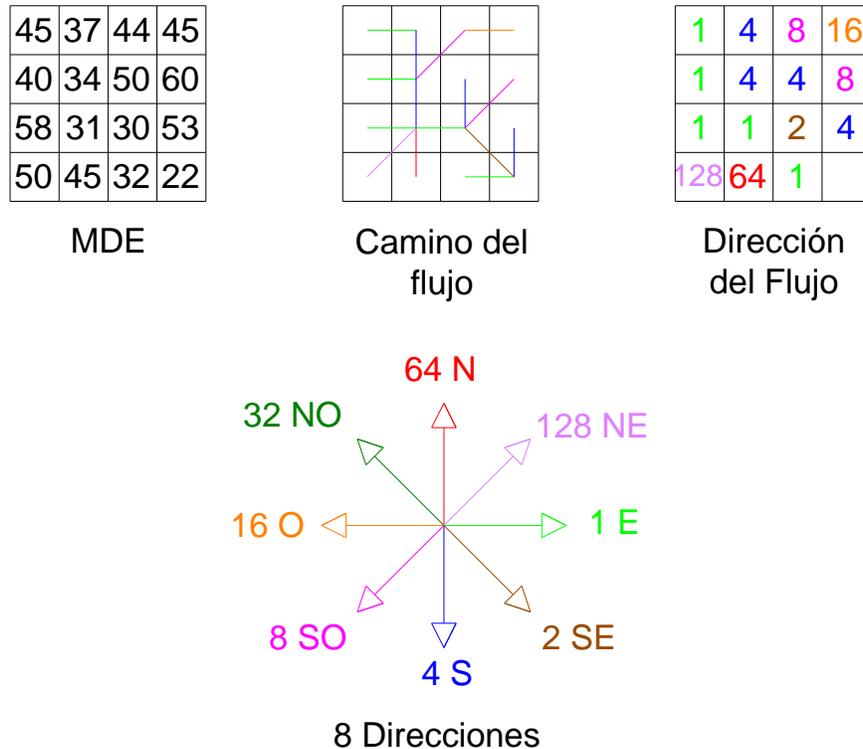
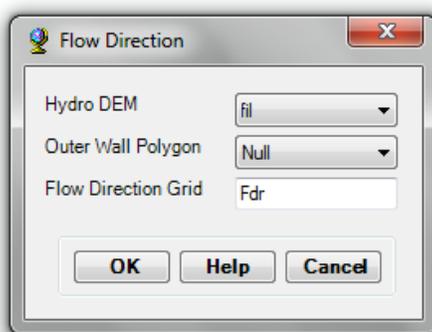


Figura A.4. Cálculo de la función *Flow Direction*. (ArcGIS 10.1, 2012a).



Hydro DEM: Modelo homogéneo obtenido en el paso 2.

Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo.

Figura A.5. Información requerida por la función *Flow Direction*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

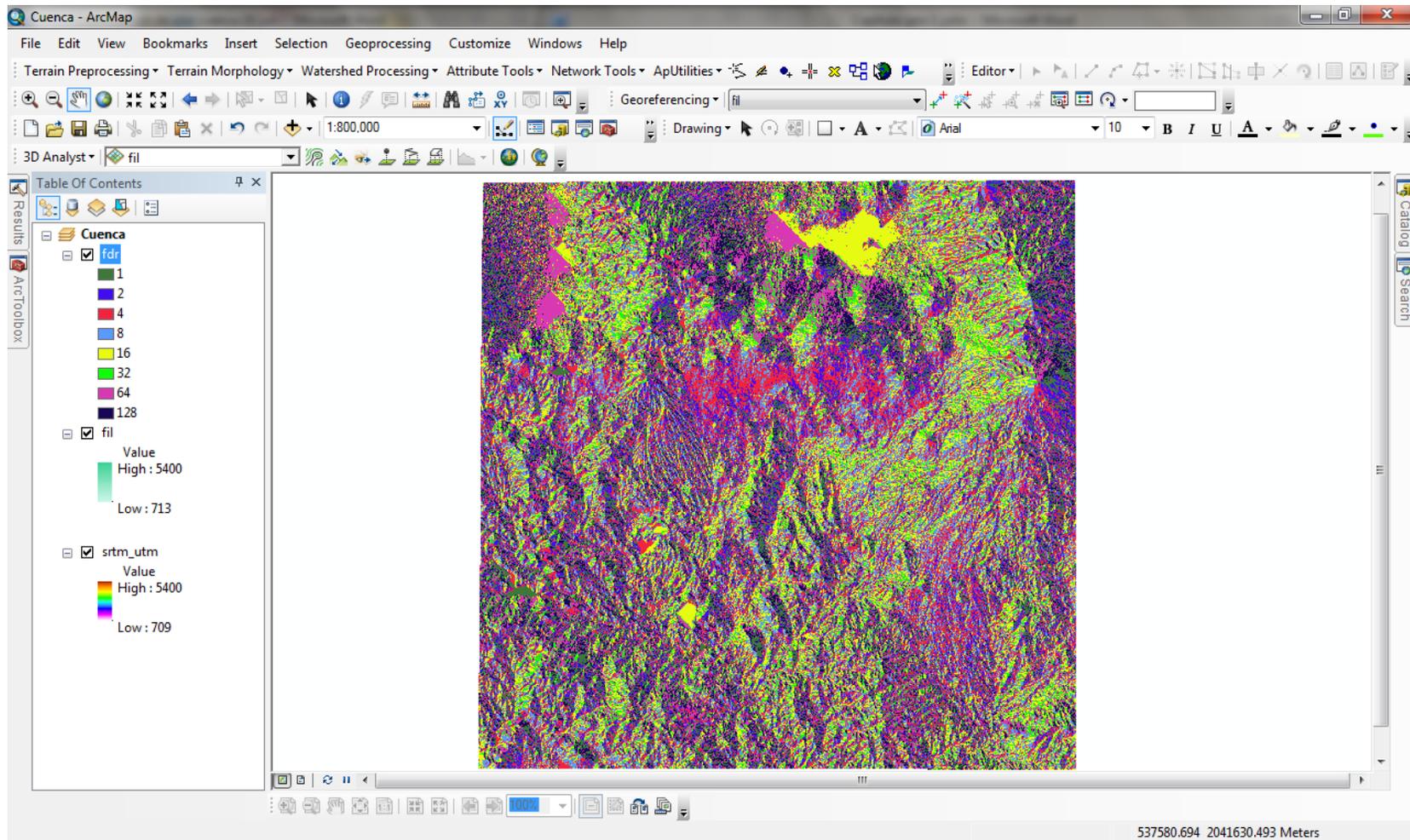
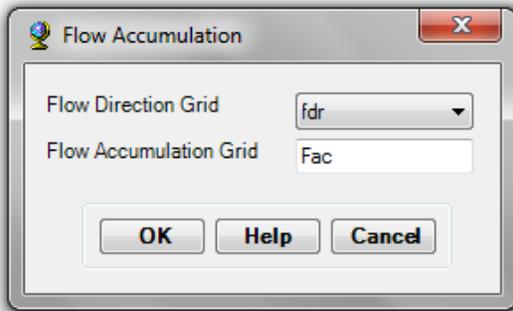


Figura A.6. Capa resultante de aplicar la función *Flow Direction*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

4. Haciendo uso de la función **Flow Accumulation** y de la capa de dirección de flujo (paso 3) es posible conocer la manera en cómo éste se acumula. La capa resultante, Figura A.9, contiene el número acumulado de celdas aguas arriba de una celda, esto para cada celda en la cuadrícula de la capa de entrada, *Flow Direction*, (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Flow Accumulation



Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Flow Accumulation Grid: Capa de acumulación de flujo.

Figura A.7. Información requerida por la función *Flow Accumulation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

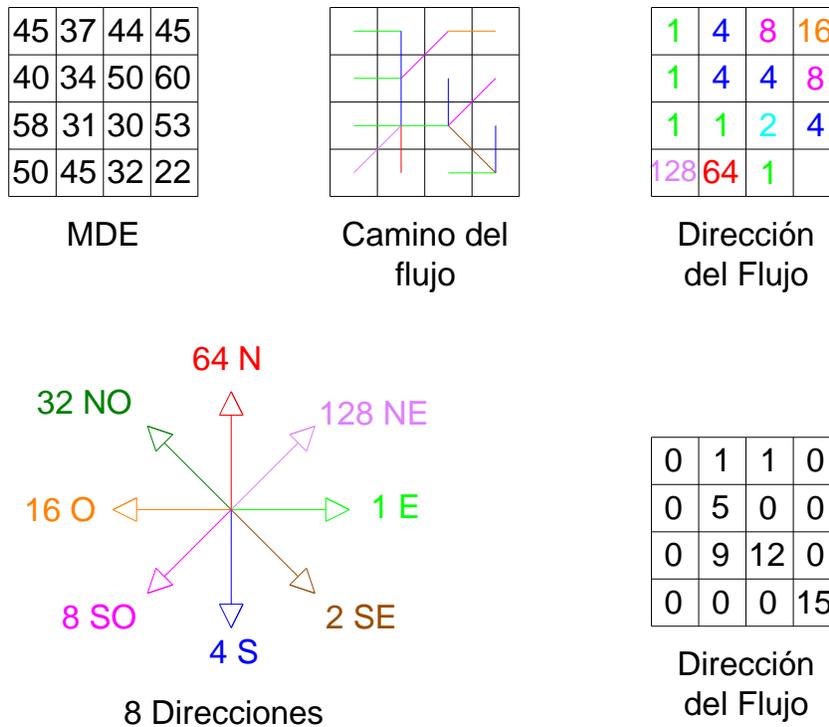


Figura A.8. Cálculo de la función *Flow Accumulation*. (ArcGIS 10.1, 2012a).

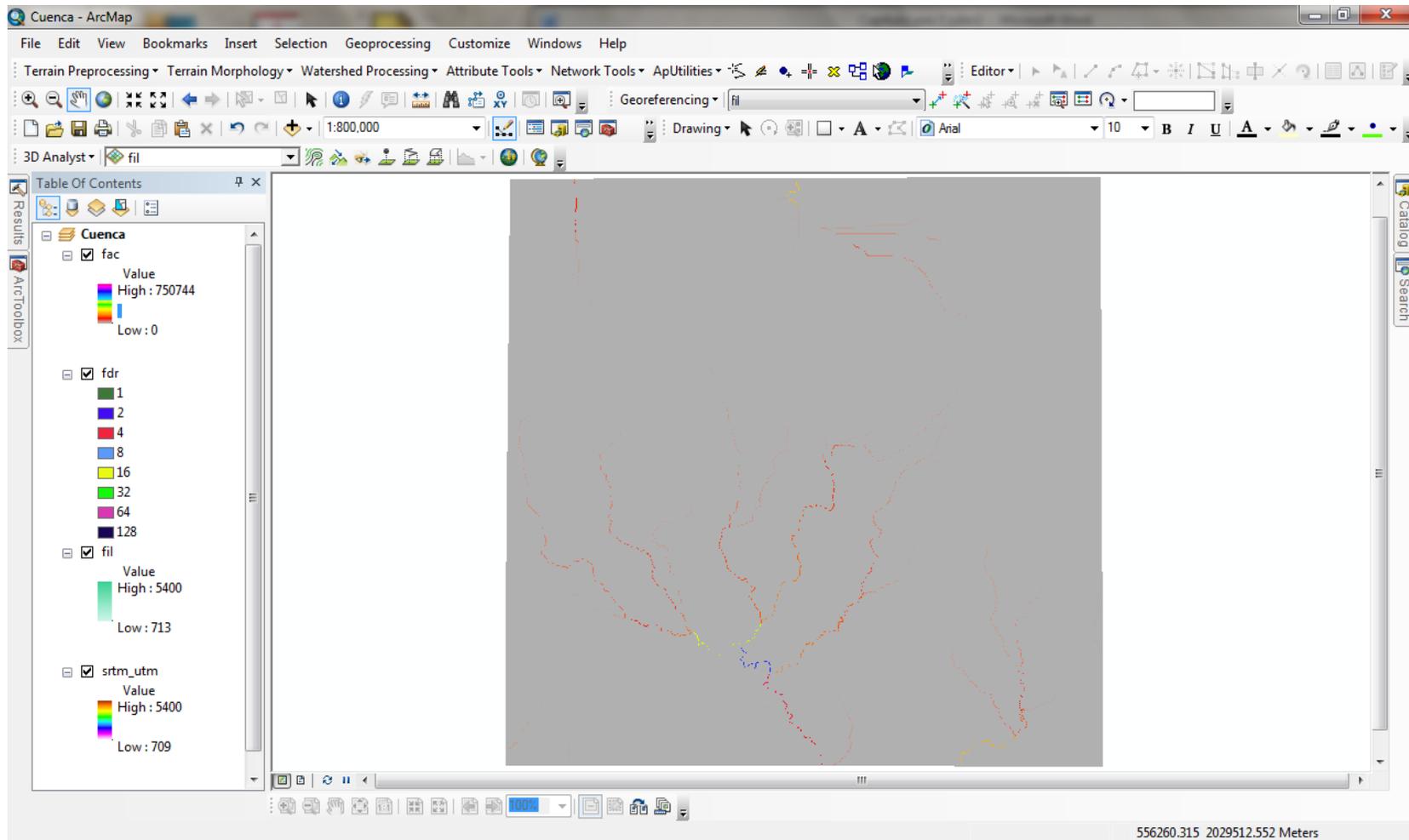


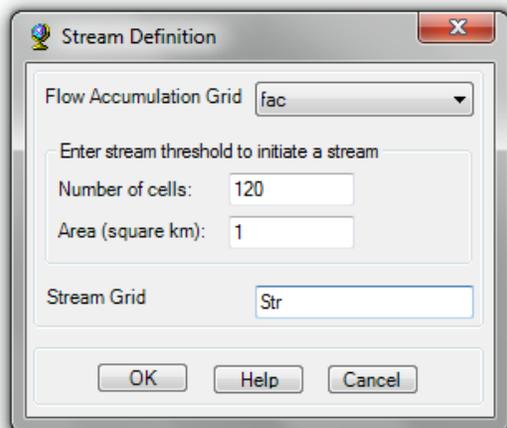
Figura A.9. Capa resultante de aplicar la función *Flow Accumulation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

5. A partir de la capa de acumulación de flujo (paso 4), la función **Stream Definition** crea una capa de corriente; esta definición inicial no tiene significado alguno para el procesamiento posterior de la cuenca ya que todos los parámetros se pueden cambiar (ArcGIS 10.1, 2012a).

Se requiere establecer un valor del umbral de corriente, que a su vez define la delimitación de la sub-cuenca durante el pre-procesamiento, como un número de celdas o área de drenaje en [km²]. El valor predeterminado del umbral en celdas es 1% del valor máximo de acumulación de flujo; el área se puede introducir sólo si la unidad de tierra se ha establecido en las referencias espaciales. Para aumentar el rendimiento en grandes MDE con más de 20 millones de celdas, el tamaño del umbral se puede incrementar para reducir la red de corriente y el número de polígonos de captación (ArcGIS 10.1, 2012a).

La capa resultante, Figura A.11, presenta la red de corriente que contiene un valor de "1" para todas las celdas de la capa de entrada que tienen un valor mayor que el umbral, las demás celdas no contienen datos (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Stream Definition



Flow Accumulation Grid: Capa de acumulación de flujo, obtenida en el paso 4.

Stream Grid: Capa de corriente.

Figura A.10. Información requerida por la función *Stream Definition*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

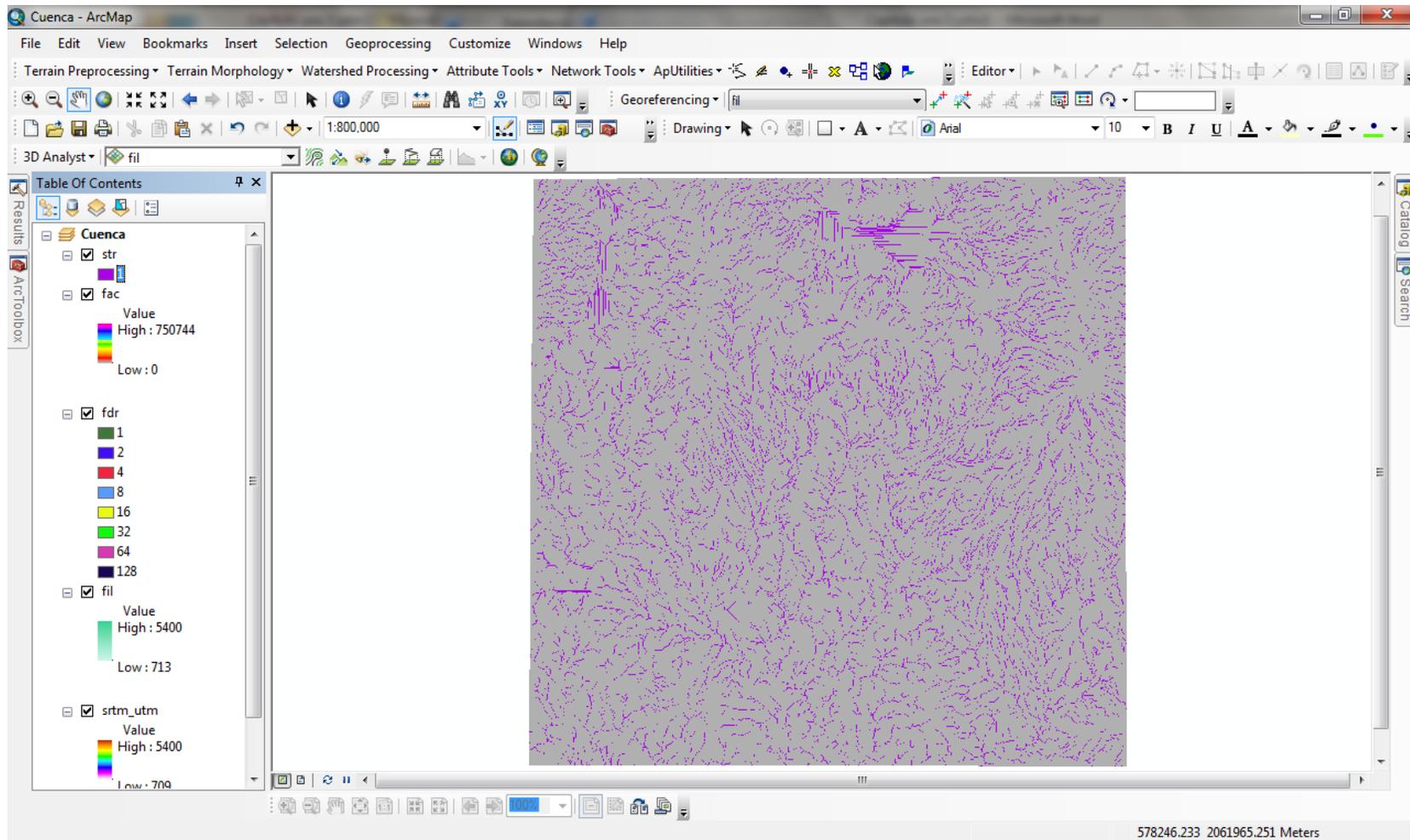
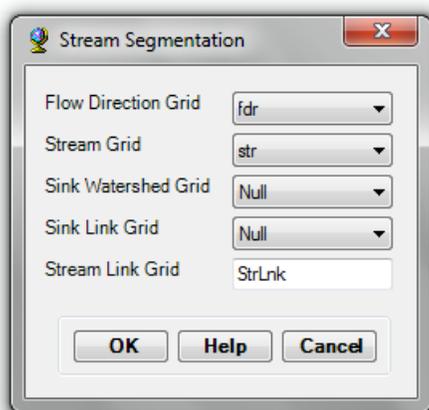


Figura A.11. Capa resultante de aplicar la función *Stream Definition*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

6. La función **Stream Segmentation** utiliza las capas de dirección de flujo (paso 3) y de corriente (paso 5) para crear una red de segmentos de corriente, Figura A.13, que tienen una identificación única. Cualquier segmento puede ser un segmento principal o estar definido entre dos segmentos. Todas las celdas de un segmento en particular tienen el mismo código de la red que es específico para ese segmento (ArcGIS 10.1, 2012a).

Las capas *Sink Watershed* y *Sink Link* son opcionales, se pueden utilizar para especificar áreas ubicadas dentro de áreas bajas de drenaje donde las conexiones de corriente no deben ser generadas (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Stream Segmentation



Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Stream Grid: Capa de corriente creada en el paso 5.

Stream Link Grid: Capa de segmentos de corriente.

Figura A.12. Información requerida por la función *Stream Segmentation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

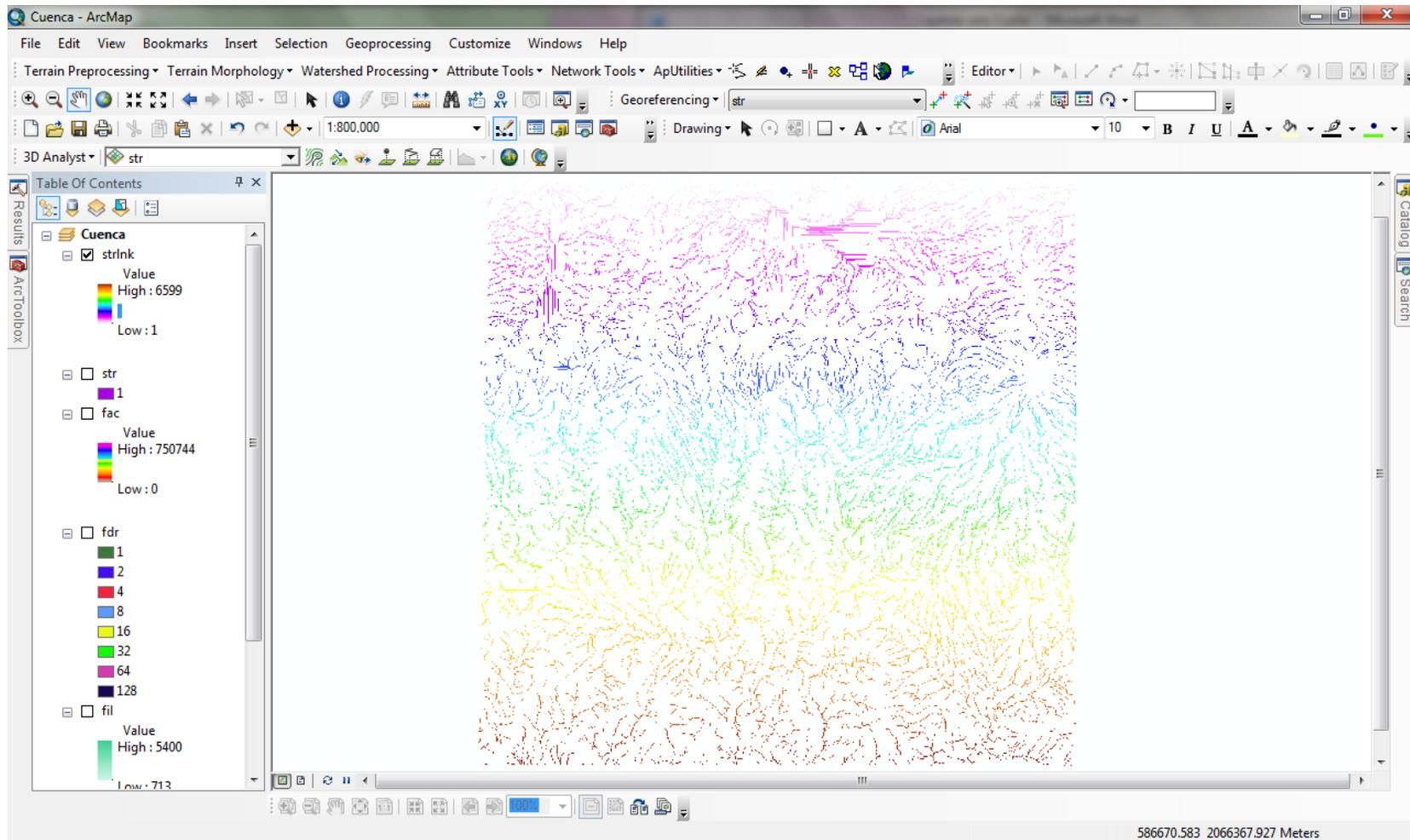
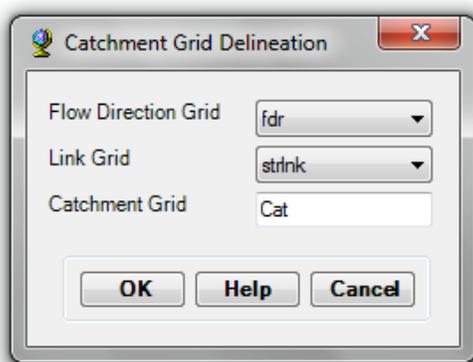


Figura A.13. Capa resultante de aplicar la función *Stream Segmentation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

7. La función **Catchment Grid Delineation** crea una red en la que cada celda tiene un valor (código de la red) que indica la cuenca a la que pertenece. Estas cuencas están asociadas a cada uno de los segmentos de corriente que drenan en esa área y fueron definidos en la capa de segmentos de corriente creada en el paso 6 (ArcGIS 10.1, 2012a). El resultado es una capa en la que se delimita la cuenca asociada a cada uno de los segmentos de corriente, Figura A.15.

Terrain Preprocessing > Catchment Grid Delineation



Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Link Grid: Capa de segmentos de corriente creada en el paso 6.

Catchment Grid: Capa de delimitación de cuenca para cada cauce.

Figura A.14. Información requerida por la función *Catchment Grid Delineation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

8. La función **Catchment Polygon Processing** toma la capa de delimitación de la cuenca para cada cauce (paso 7) y la convierte en un elemento poligonal de captación, Figura A.18. Las celdas adyacentes que tienen el mismo código de red se combinan en una sola área, cuyo contorno esta vectorizado. Los polígonos de celdas individuales generados como objetos del proceso de vectorización se disuelven de forma automática, de modo que al final del proceso sólo hay un polígono por cuenca (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Catchment Polygon Processing

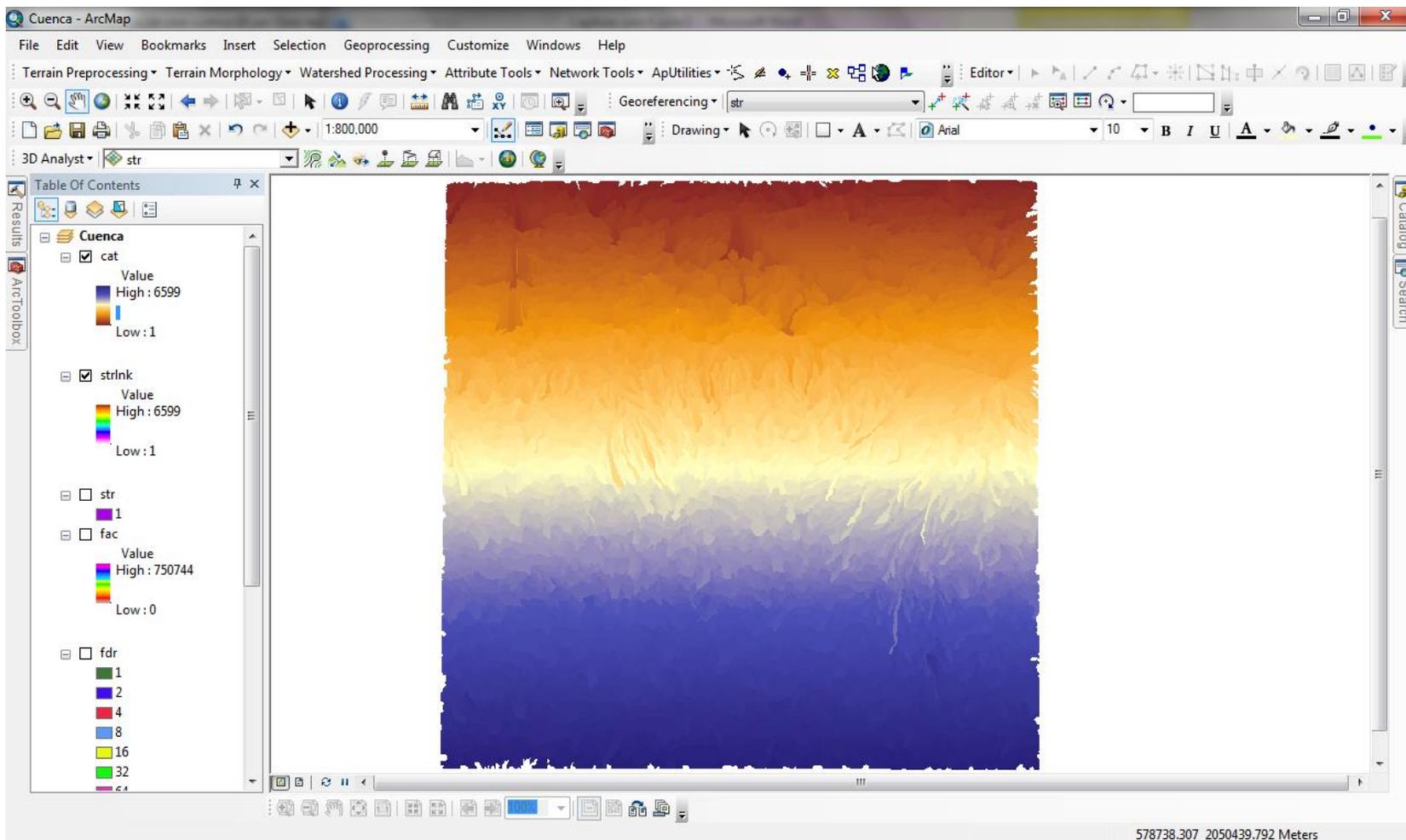
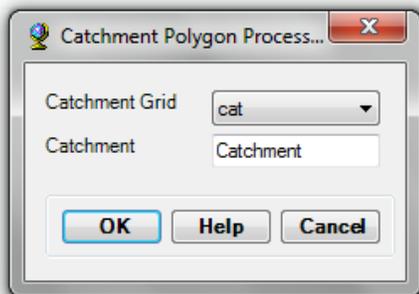


Figura A.15. Capa resultante de aplicar la función *Catchment Grid Delineation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).



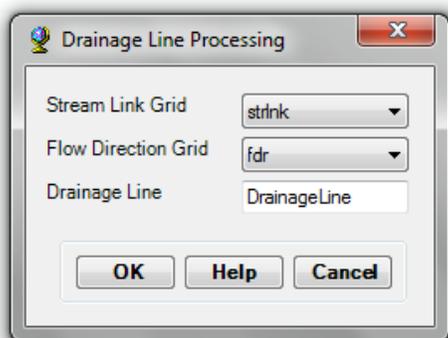
Catchment Grid: Capa de delimitación de cuenca para cada cauce creada en el paso 7.

Catchment: Capa de polígonos de cuencas.

Figura A.16. Información requerida por la función *Catchment Polygon Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

9. La capa de segmentos de corriente creada en el paso 6 es utilizada por la función ***Drainage Line Processing*** para convertir los cauces en una clase de entidades de líneas de drenaje, Figura A.19. Cada línea de drenaje tiene el mismo código que la cuenca en la que reside (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Drainage Line Processing



Stream Link Grid: Capa de segmentos de corriente creada en el paso 6.

Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Drainage Line: Capa de líneas de drenaje.

Figura A.17. Información requerida por la función *Drainage Line Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

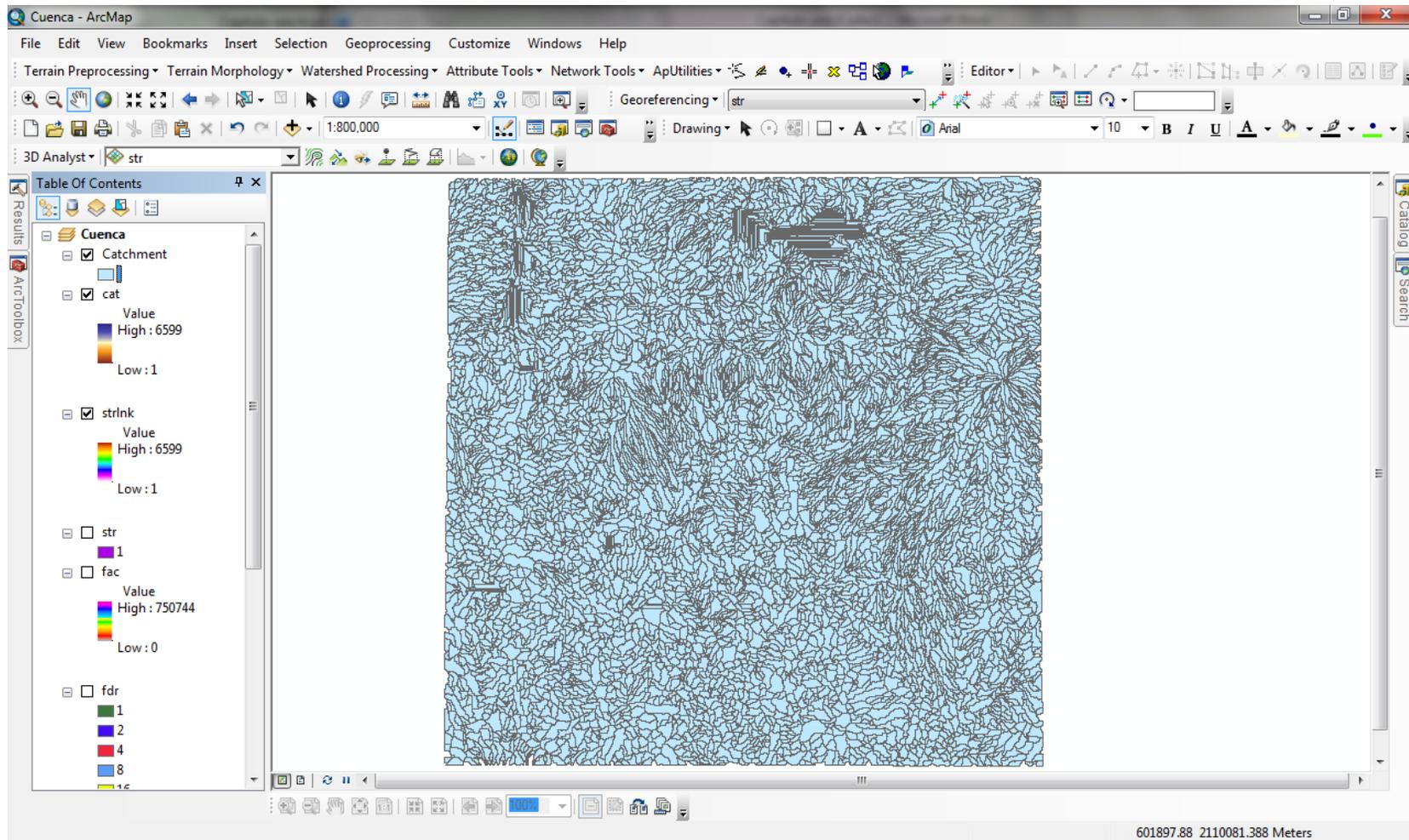


Figura A.18. Capa resultante de aplicar la función *Catchment Polygon Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

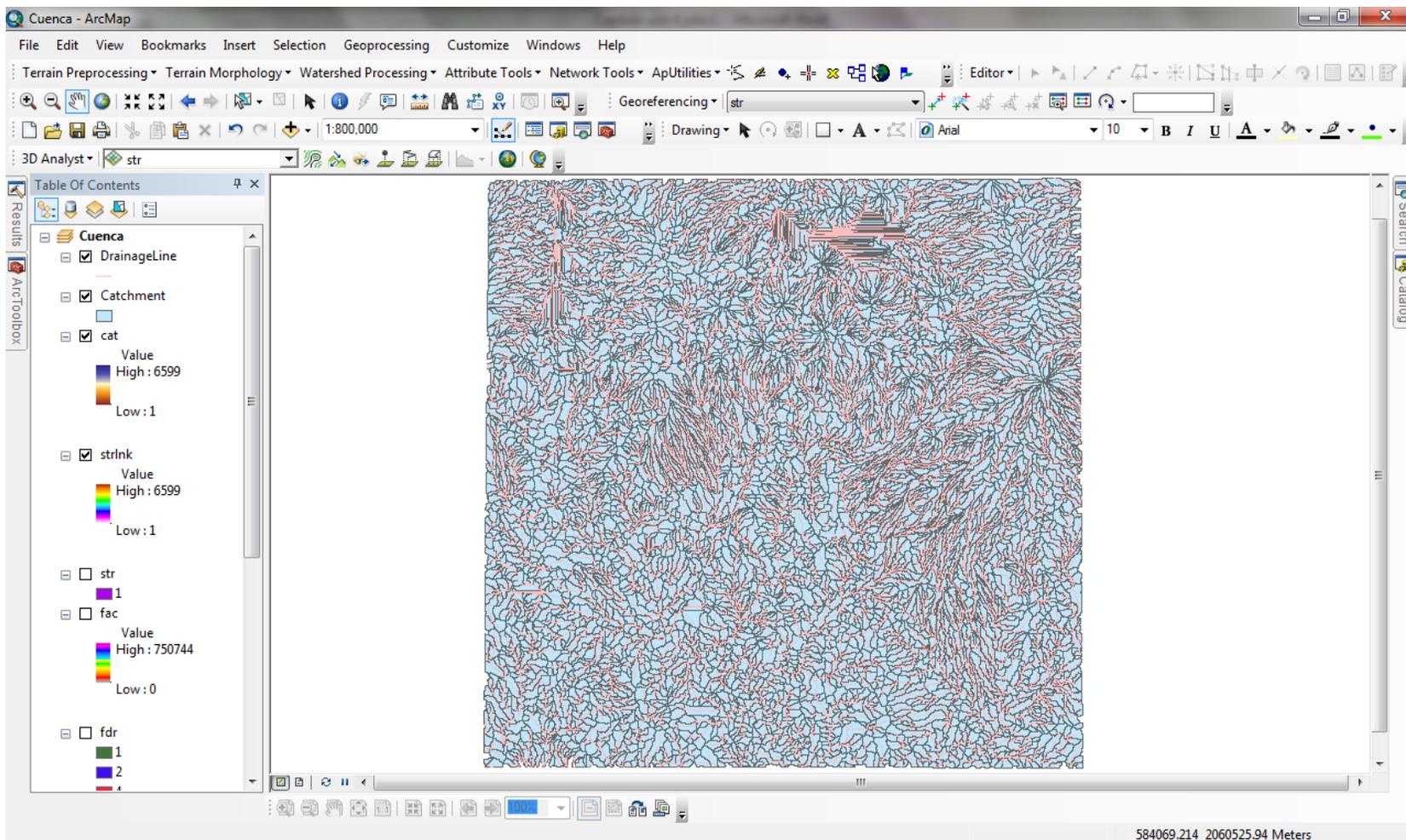
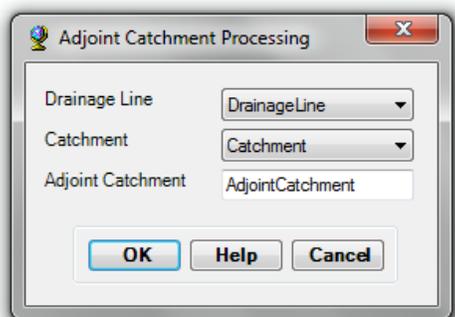


Figura A.19. Capa resultante de aplicar la función *Drainage Line Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

10. Para generar las cuencas acumuladas aguas arriba de cada cuenca de la capa polígonos de cuencas (paso 8) se utiliza la función ***Adjoint Catchment Processing***. Para cada cuenca (que no es una cuenca principal) un polígono representa el área total aguas arriba que drena a su punto de entrada, Figura A.21 (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Adjoint Catchment Processing



Drainage Line: Capa de líneas de drenaje obtenida en el paso 9.

Catchment: Capa de polígonos de cuencas creada en el paso 8.

Adjoint Catchment: Capa de cuencas acumuladas.

Figura A.20. Información requerida por la función *Adjoint Catchment Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

11. La función ***Drainage Point Processing*** permite generar los puntos de drenaje asociados a la capa de polígonos de cuencas del paso 8, Figura A.24 (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Drainage Point Processing

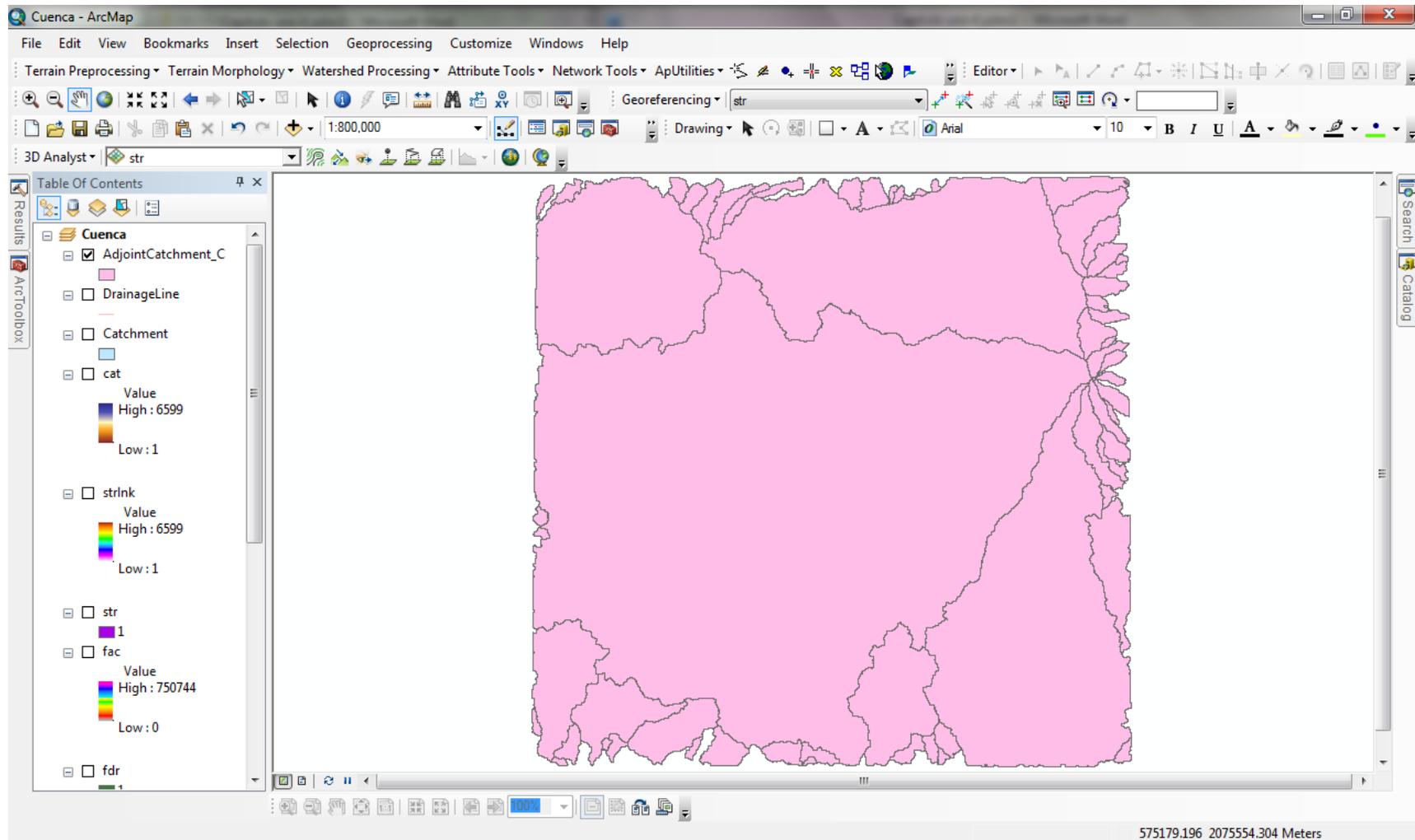
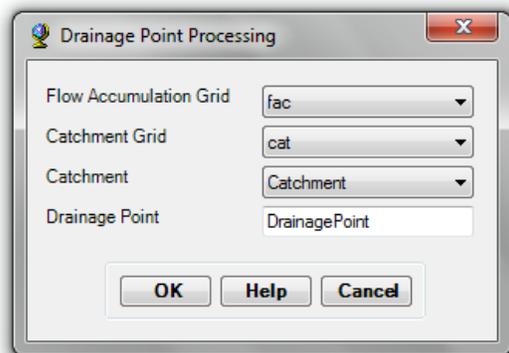


Figura A.21. Capa resultante de aplicar la función *Adjoint Catchment Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Flow Accumulation Grid: Capa de acumulación de flujo, obtenida en el paso 4.

Catchment Grid: Capa de delimitación de cuenca para cada cauce creada en el paso 7.

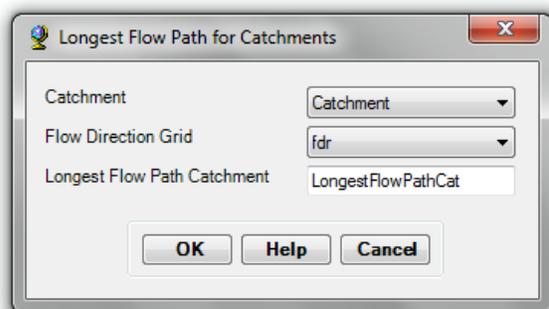
Catchment: Capa de polígonos de cuencas creada en el paso 8.

Drainage Point: Capa de puntos de drenaje.

Figura A.22. Información requerida por la función *Drainage Point Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

12. Utilizando las capas de polígonos de cuencas (paso 8) y dirección de flujo (paso 3), la función **Longest Flow Path for Catchments** genera la trayectoria del cauce más largo para cada uno de los polígonos de cuencas, Figura A.25 (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Longest Flow Path for Catchments



Catchment: Capa de polígonos de cuencas creada en el paso 8.

Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Longest Flow Path Catchment: Capa de la trayectoria del cauce más largo para cada polígono de cuenca.

Figura A.23. Información requerida por la función *Longest Flow Path for Catchments*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

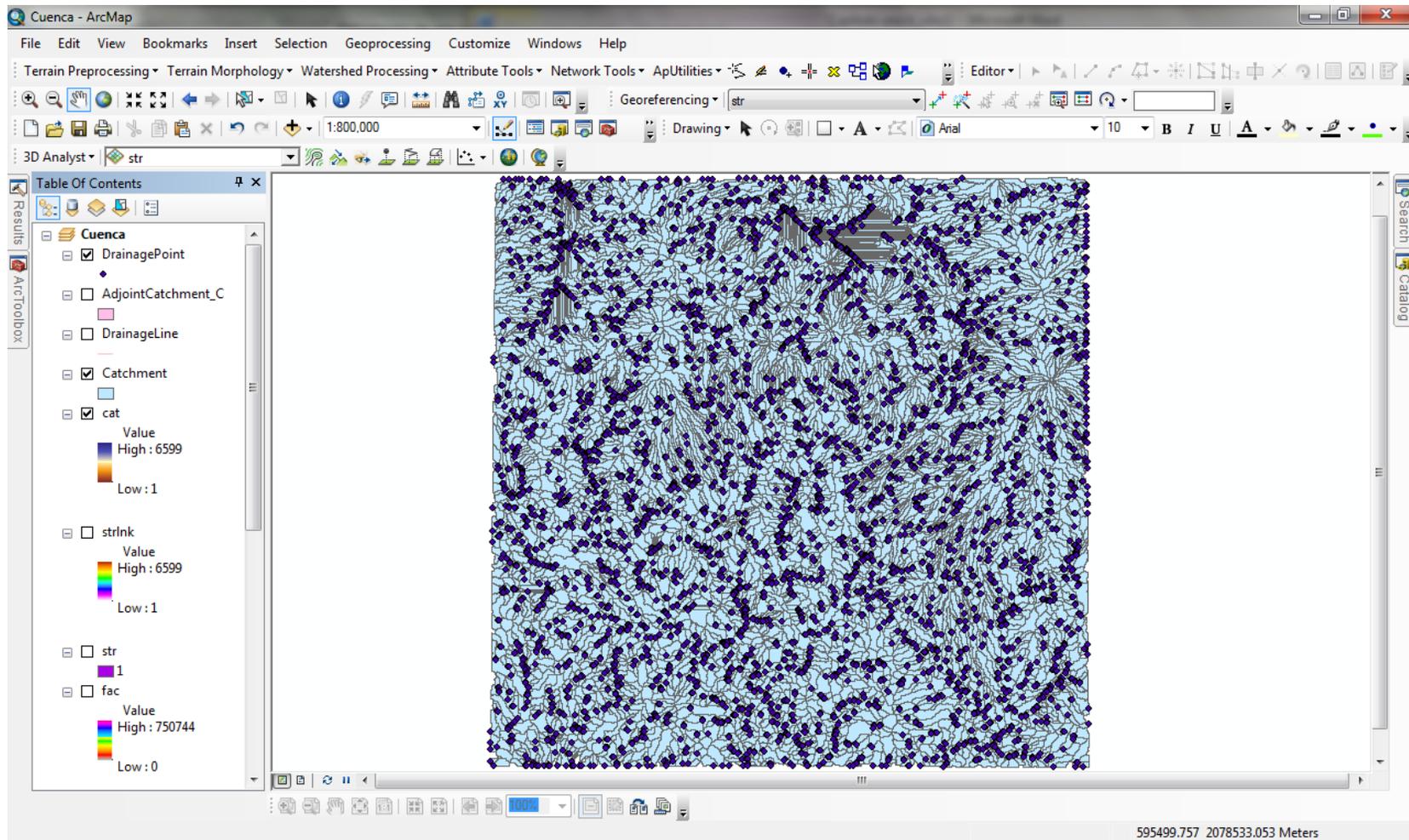


Figura A.24. Capa resultante de aplicar la función *Drainage Point Processing*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

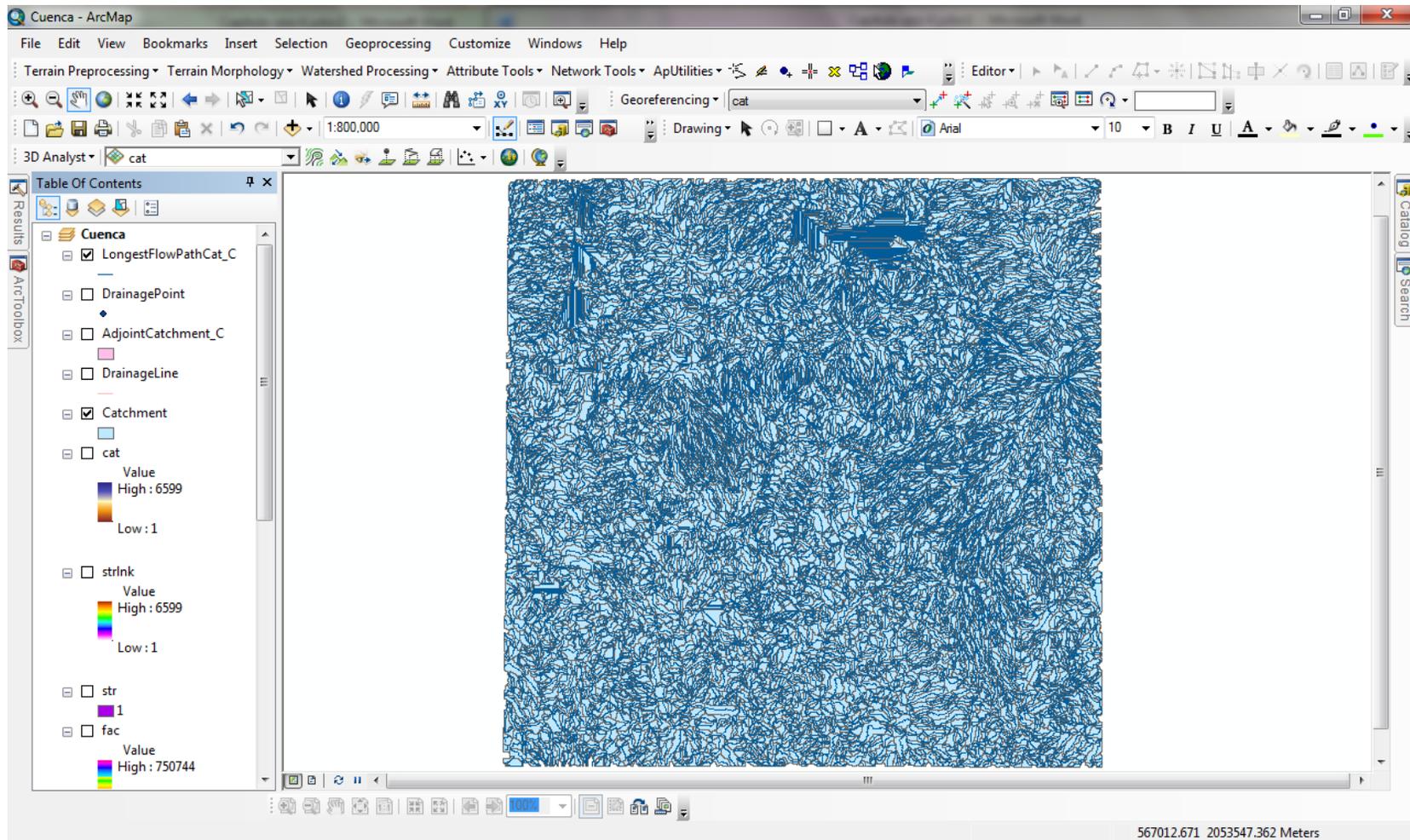


Figura A.25. Capa resultante de aplicar la función *Longest Flow Path for Catchments*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

13. La función **Longest Flow Path for Adjoint Catchments** genera la trayectoria del cauce más largo para cada cuenca acumulada de la capa creada en el paso 10, Figura A.27 (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Longest Flow Path for Adjoint Catchments

Adjoint Catchment: Capa de cuencas acumuladas, paso 10.

Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Longest Flow Path Catchment: Capa de la trayectoria del cauce más largo para cada polígono de cuenca, paso 12.

Longest Flow Path Adjoint Catchment: Capa de la trayectoria del cauce más largo para cada cuenca acumulada.

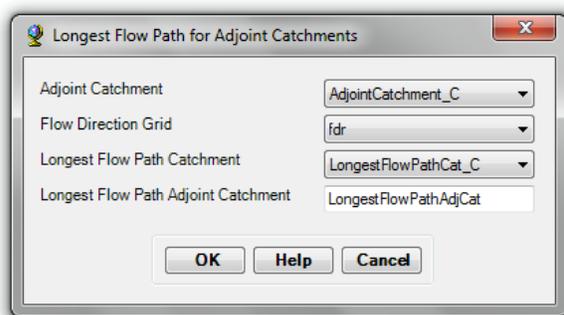


Figura A.26. Información requerida por la función **Longest Flow Path for Adjoint Catchments**. (ArcGIS 10.1, 2012b).

14. Al utilizar la función **Slope** se puede generar la pendiente en grados o en porcentaje para el MDE (paso 1) con el que se está trabajando, Figura A.30. La función utiliza la unidad-Z definida en la proyección del MDE para calcular la pendiente. Si no existe un archivo con la proyección o esta no está asociada al MDE, la función asume que la elevación-Z es la misma que la unidad de tierra (ArcGIS 10.1, 2012a).

Terrain Preprocessing > Slope

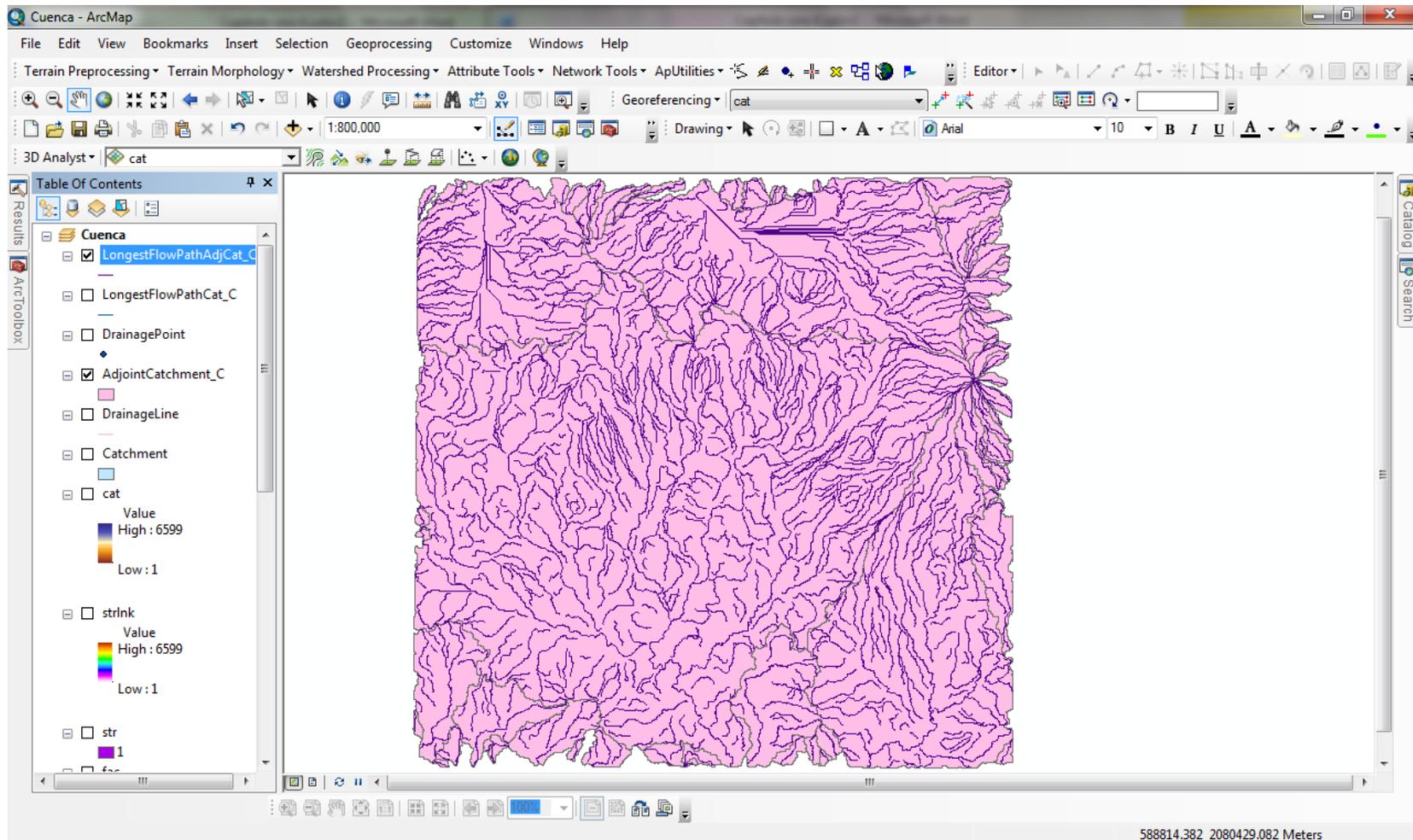
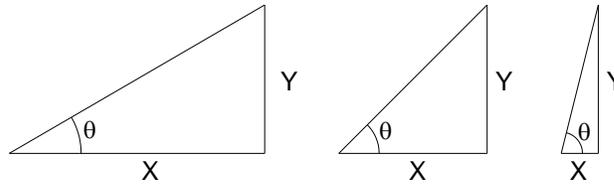


Figura A.27. Capa resultante de aplicar la función *Longest Flow Path for Adjoint Catchments*. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Pendiente en grados	30	45	76
Pendiente en porcentaje	58	100	373

Figura A.28. Cálculo de la función *Slope*. (ArcGIS 10.1, 2013).

El cálculo de la pendiente se realiza utilizando las siguientes expresiones:

$$\theta = \text{ArcTan} \frac{Y}{X} \tag{A.1}$$

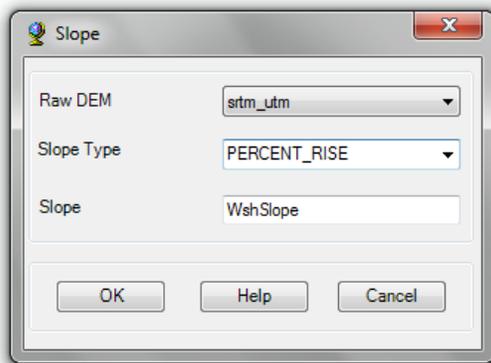
$$\text{Pendiente en grados} = \theta \tag{A.2}$$

$$\text{Pendiente en porcentaje} = \frac{Y}{X} * 100 \tag{A.3}$$

Donde:

X Distancia

Y Desnivel



Raw DEM: Modelo Digital de Elevaciones en coordenadas UTM (paso 1).

Slope Type: Unidad en la que se calculara la pendiente, porcentaje o grados.

Slope: Capa de pendiente.

Figura A.29. Información requerida por la función *Slope*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

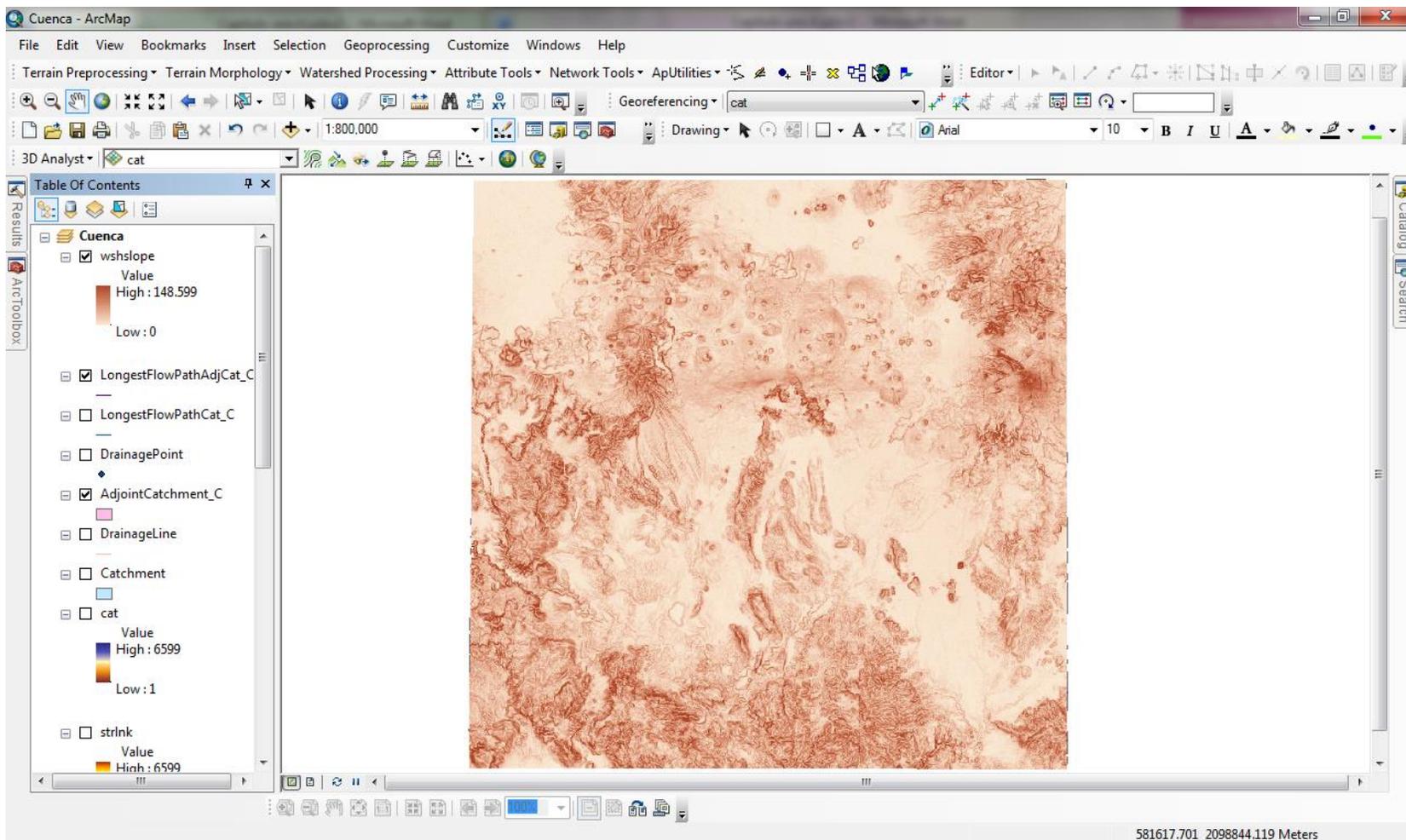


Figura A.30. Capa resultante de aplicar la función *Slope*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

En los pasos 1 a 14 se utilizó la herramienta **Terrain Preprocessing** para realizar un primer análisis del terreno y preparar el MDE, a continuación se delimitará una cuenca en particular para obtener sus características fisiográficas principales.

15. Es necesario seleccionar un punto de interés para delimitar el área de drenaje asociada a él, Figura A.33, utilizando la herramienta **Point Delineation** ubicada casi al final de la barra **Arc Hydro Tools**.

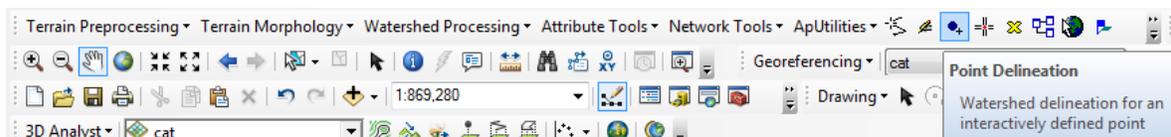
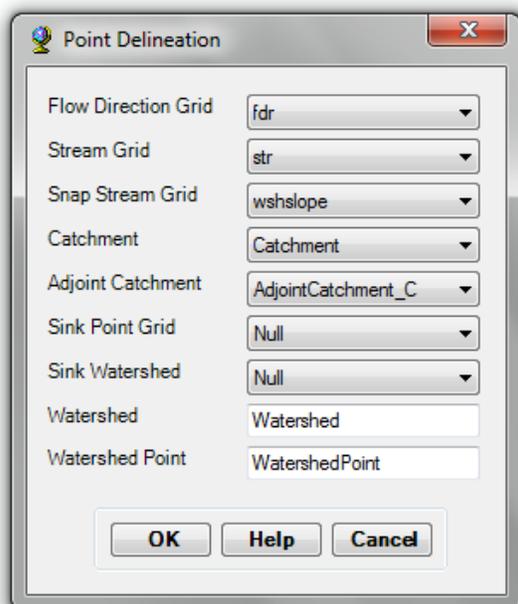


Figura A.31. Ubicación de la herramienta *Point Delineation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.



Stream Grid: Capa de corriente creada en el paso 5.

Snap Stream Grid: Capa de pendiente (paso 14).

Catchment: Capa de polígonos de cuencas creada en el paso 8.

Adjoint Catchment: Capa de cuencas acumuladas, paso 10.

Watershed: Área asociada al punto de drenaje *Watershed point*.

Watershed point: Punto de drenaje.

Figura A.32. Información requerida por la función *Point Delineation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

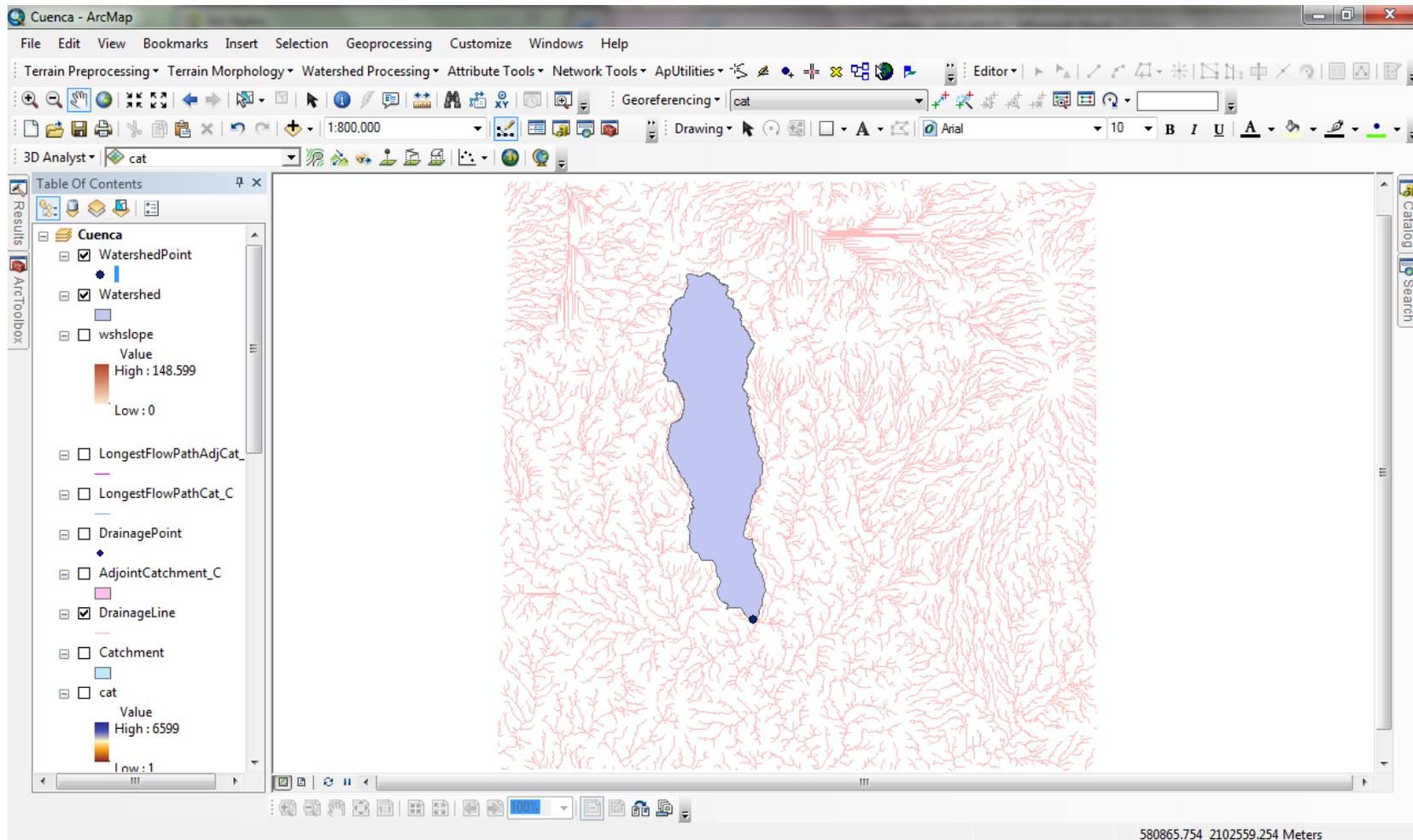
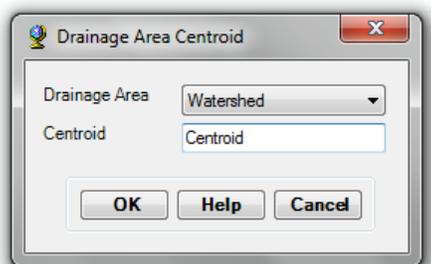


Figura A.33. Capa resultante de aplicar la función *Point Delineation*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

16. Para la cuenca delimitada en el paso anterior, se obtiene su centroide utilizando la función **Drainage Area Centroid**, Figura A.36. Sin embargo, si un centro de gravedad no se encuentra localizado dentro del área de drenaje, la función utiliza como centroide la proyección del centro de gravedad en el límite del área de drenaje, es decir, el punto más cercano en el límite (ArcGIS 10.1, 2012a).

Watershed Processing > Drainage Area Centroid



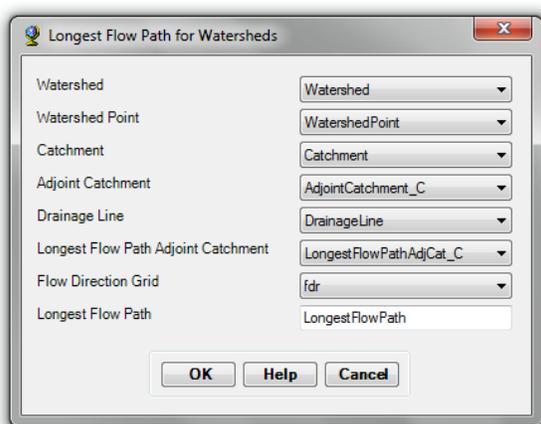
Drainage Area: Capa del área de drenaje delimitada en el paso 15.

Centroid: Centroide del área de drenaje (cuenca).

Figura A.34. Información requerida por la función *Drainage Area Centroid*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

17. La trayectoria del cauce principal para la cuenca delimitada en el paso 15, Figura A.38, se genera con la función **Longest Flow Path for Watersheds** (ArcGIS 10.1, 2012a).

Watershed Processing > Longest Flow Path for Watersheds



Watershed: Área asociada al punto de drenaje *Watershed point* (paso 15).

Watershed point: Punto de drenaje (paso 15).

Catchment: Capa de polígonos de cuencas creada en el paso 8.

Figura A.35. Información requerida por la función *Longest Flow Path for Watersheds*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

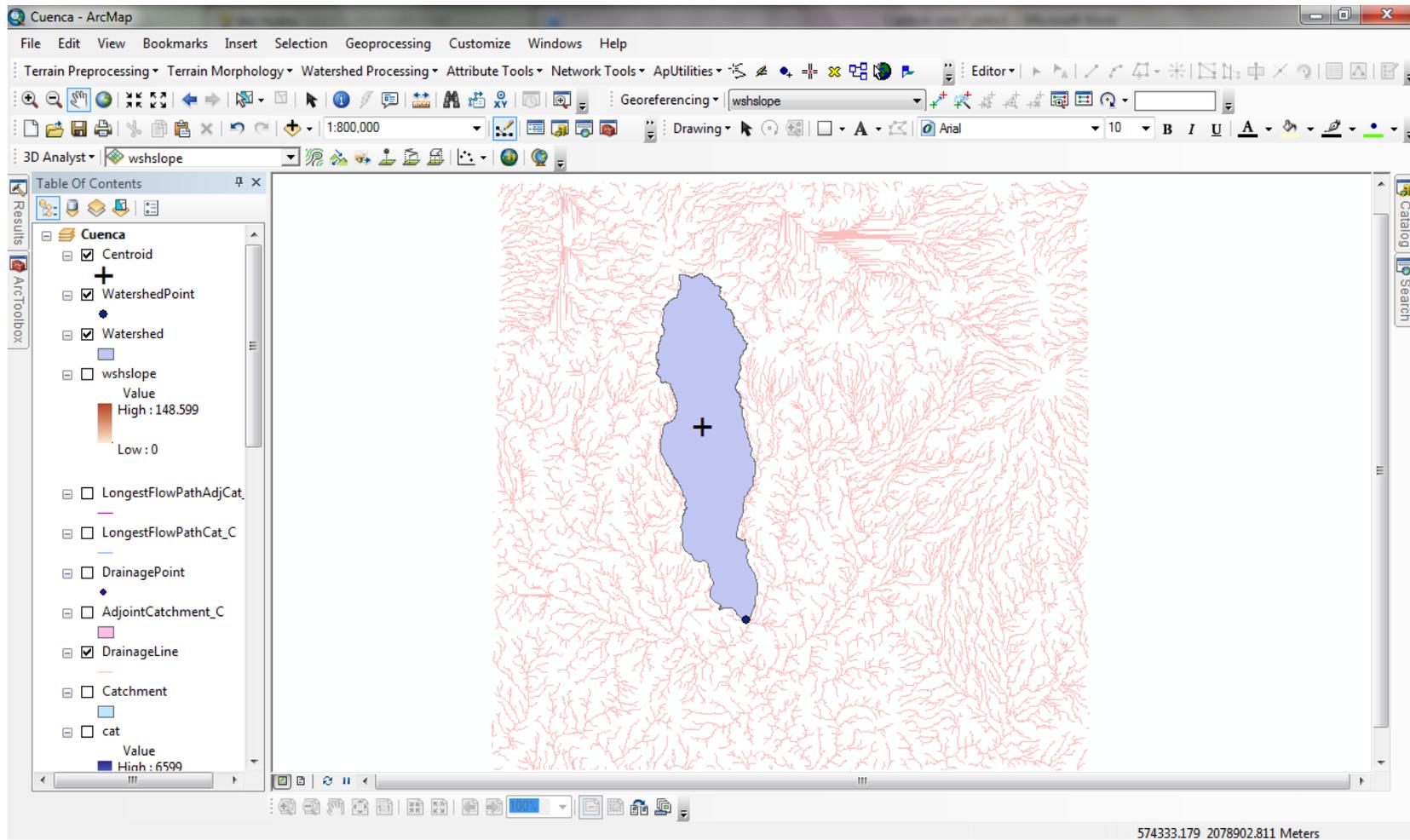


Figura A.36. Capa resultante de aplicar la función *Drainage Area Centroid*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Adjoint Catchment: Capa de cuencas acumuladas, paso 10.

Drainage Line: Capa de líneas de drenaje obtenida en el paso 9.

Longest Flow Path Adjoint Catchment: Capa de la trayectoria del cauce más largo para cada cuenca acumulada (paso 13).

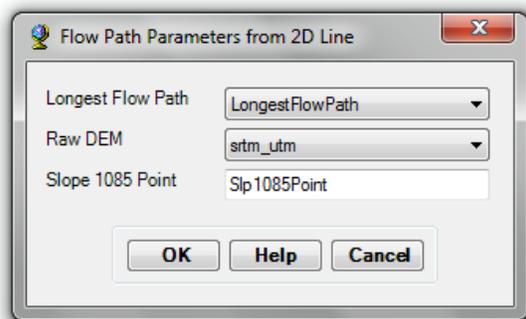
Flow Direction Grid: Capa de dirección de flujo, obtenida en el paso 3.

Longest Flow Path: Capa de la trayectoria del cauce principal para el área de drenaje (cuenca) seleccionada.

Figura A.35. Información requerida por la función *Longest Flow Path for Watersheds*. (ArcGIS 10.1, 2012b). Continuación.

- La función ***Flow Path Parameters from 2D Line*** permite calcular las pendientes y elevaciones asociadas al cauce principal, dando como resultado en la capa de la trayectoria del cauce principal para la cuenca delimitada (paso 17) la información mostrada en la Tabla A.1, Figura A.39.

Watershed Processing > Flow Path Parameters from 2D Line



Longest Flow Path: Capa de la trayectoria del cauce principal para el área de drenaje (cuenca) seleccionada (paso 17).

Raw DEM: Modelo Digital de Elevaciones en coordenadas UTM (paso 1).

Slope 1085 point: Capa que indica la elevación en los puntos al 10 y 85% de la longitud del cauce principal, medidos a partir del punto de drenaje.

Figura A.37. Información requerida por la función *Flow Path Parameters from 2D Line*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

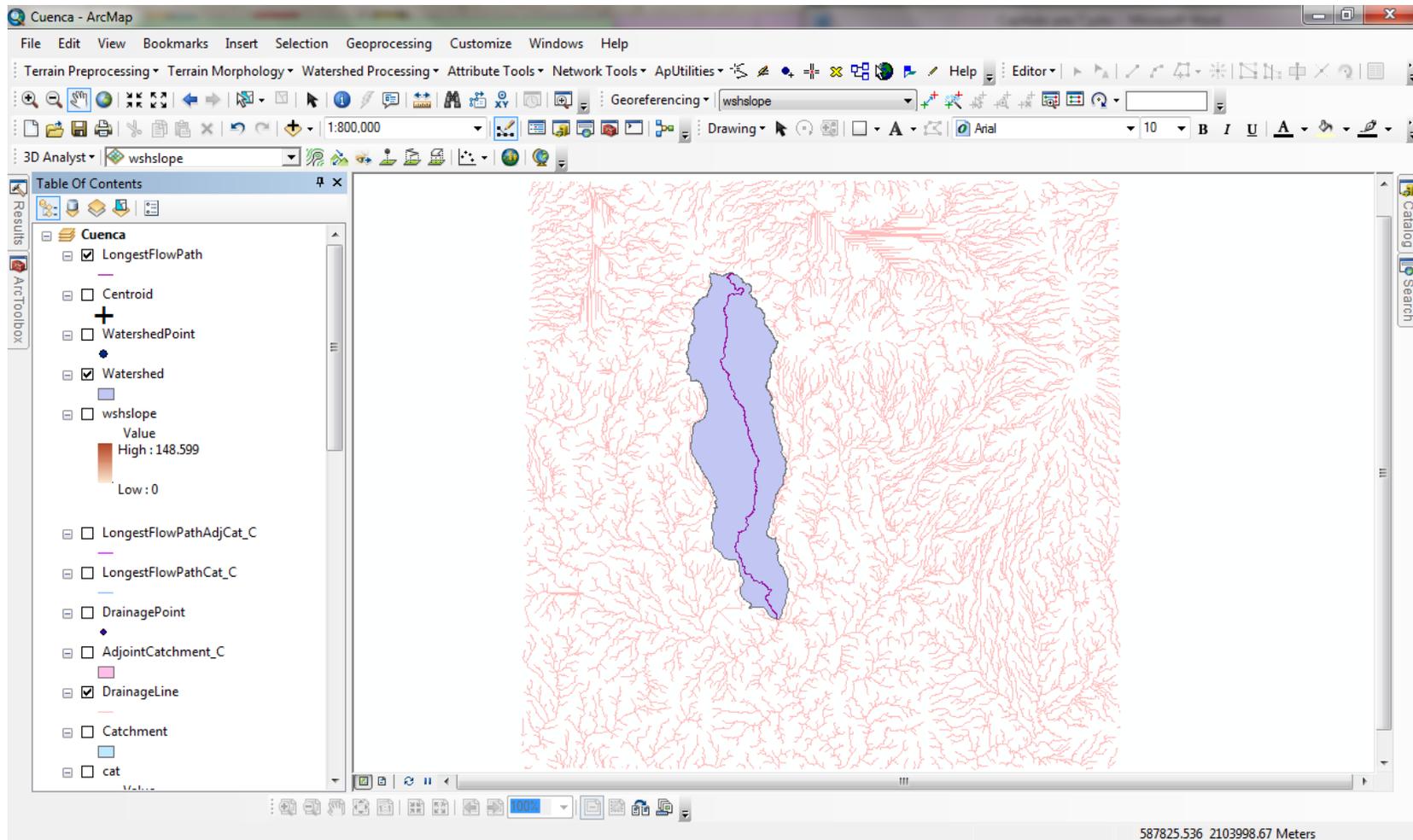


Figura A.38. Capa resultante de aplicar la función *Longest Flow Path for Watersheds*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

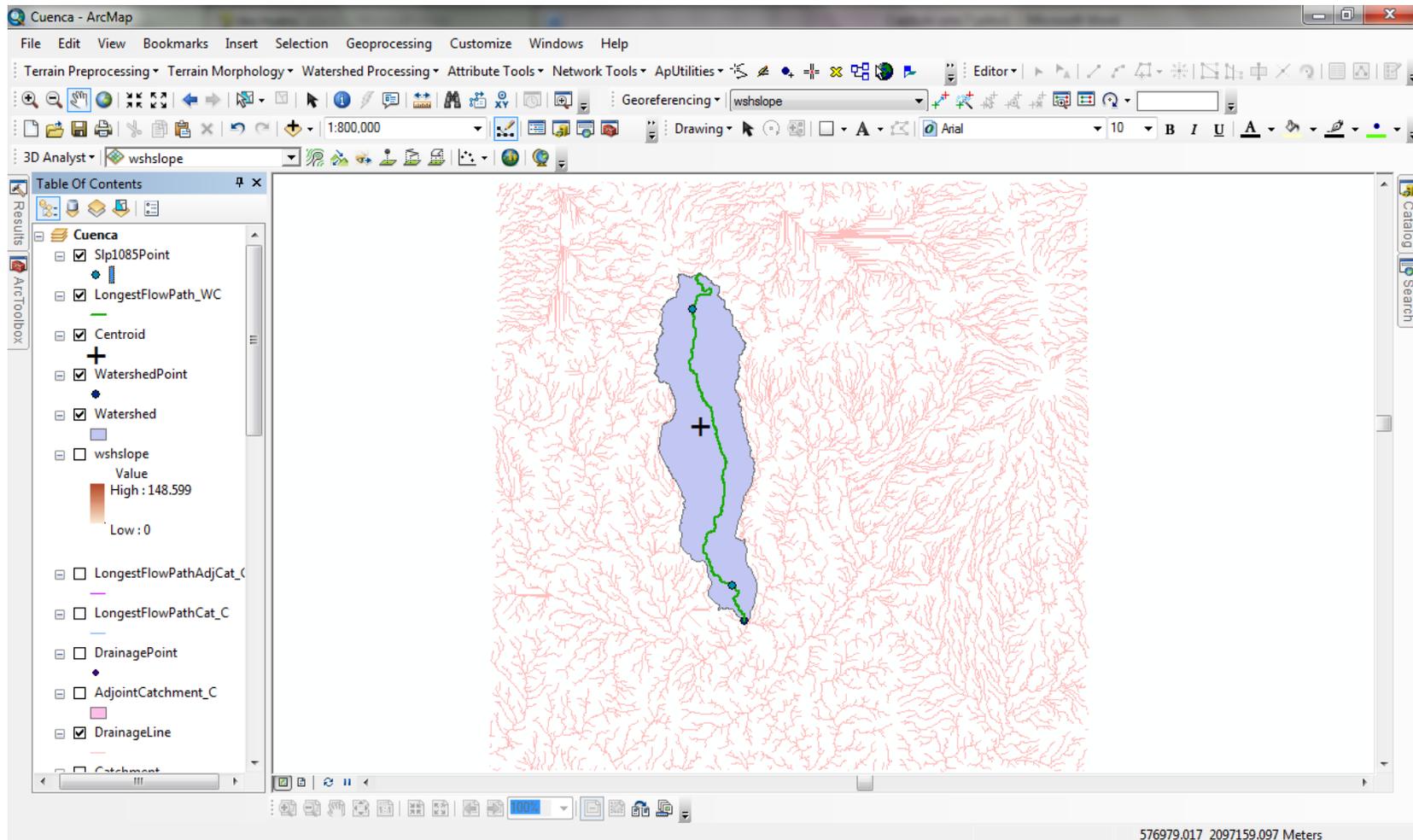


Figura A.39. Capa resultante de aplicar la función *Flow Path Parameters from 2D Line*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

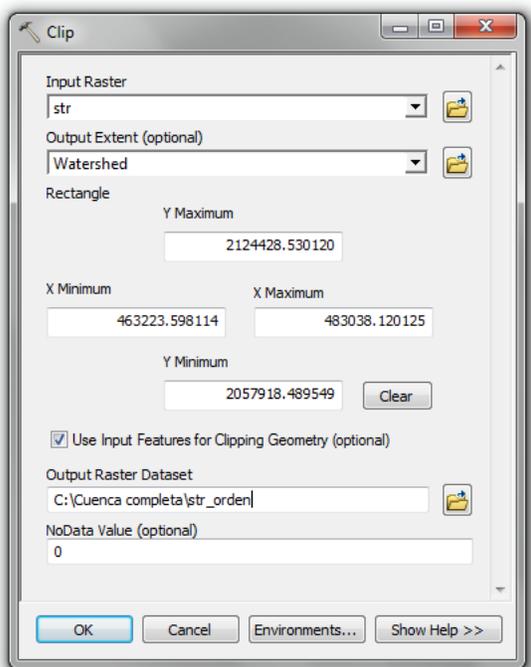
Campo	Descripción
<i>Length Mi</i>	Longitud del cauce principal en millas.
SlpFM	Pendiente en [pie/milla].
Slp1085FM	Pendiente 10-85 en [pie/milla].
Slp	Pendiente adimensional.
Slp1085	Pendiente 10-85 adimensional.
ElevUp	Elevación del punto más alejado río arriba en las unidades X, Y del MDE de entrada (paso 1).
ElevDS	Elevación río abajo (punto de drenaje) en las unidades X, Y del MDE de entrada (UTM).
Elev10	Elevación al 10% de la longitud del cauce principal en las unidades X, Y del MDE.
Elev85	Elevación al 85% de la longitud del cauce principal en las unidades X, Y del MDE

Tabla A.1. Información generada con la función *Flow Path Parameters from 2D Line*. (ArcGIS 10.1, 2012a). El 10 y 85% de la longitud del cauce principal son medidos a partir del punto de drenaje.

19. Con la función ***Stream Order*** es posible calcular el orden de la red de drenaje de una cuenca asignando un orden numérico a los cauces dentro de la red para identificar y clasificar los tipos de corrientes en función de sus números de afluentes, Figura A.44 (ArcGIS 10.1, 2012a). Esta función utiliza las capas *Flow Direction Grid*, capa de dirección de flujo obtenida en el paso 3, y *Stream Grid*, capa de corriente creada en el paso 5, por lo que es necesario cortar las capas haciendo uso de la geometría de dicha cuenca, capa *Watershed* creada en el paso 15, utilizando la función Clip. También es posible obtener estas capas cortando el MDE y repitiendo los pasos 2 a 5.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip

Arc Toolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream Order

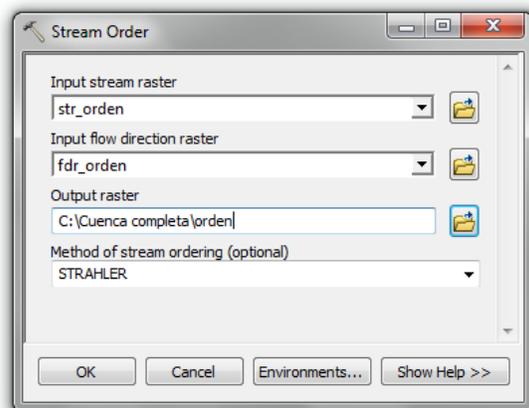


Input Raster: Capa a cortar.

Output Extent: Geometría utilizada para cortar la capa.

Output Raster Dataset: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.40. Información requerida por la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Stream Raster: Capa de corriente asociada a la cuenca delimitada.

Input Flow Direction Raster: Capa de dirección de flujo asociada a la cuenca delimitada.

Output Raster: Capa del orden de la red de drenaje de la cuenca delimitada.

Figura A.41. Información requerida por la función *Stream Order*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Las bases de datos de cada capa creada se pueden visualizar utilizando la función **Attribute Table**, que se obtiene dando *click* derecho sobre el nombre de la capa de interés dentro de la Tabla de Contenido, Figura A.45 y A.46.

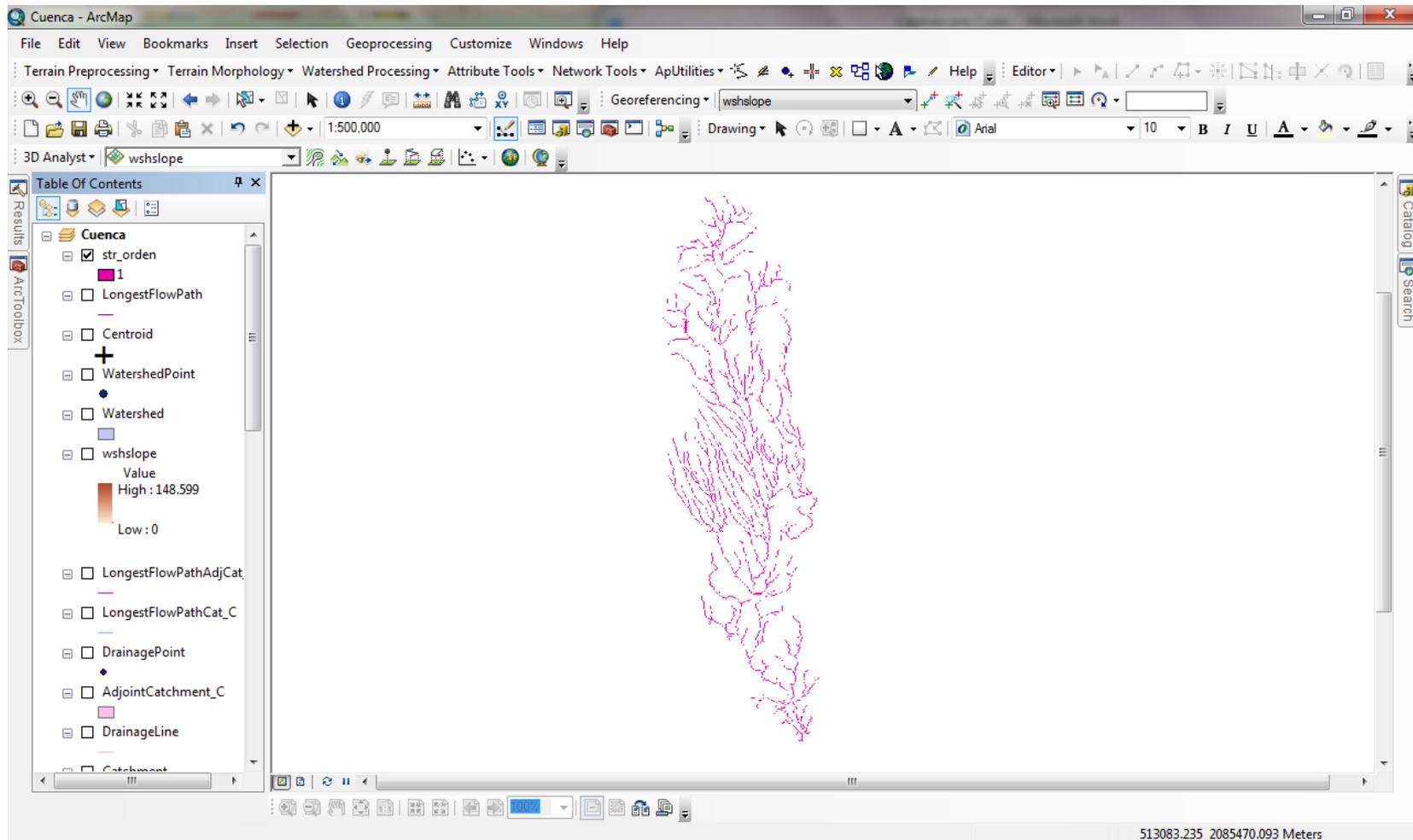


Figura A.42. Capa de corriente asociada a la cuenca delimitada obtenida con la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

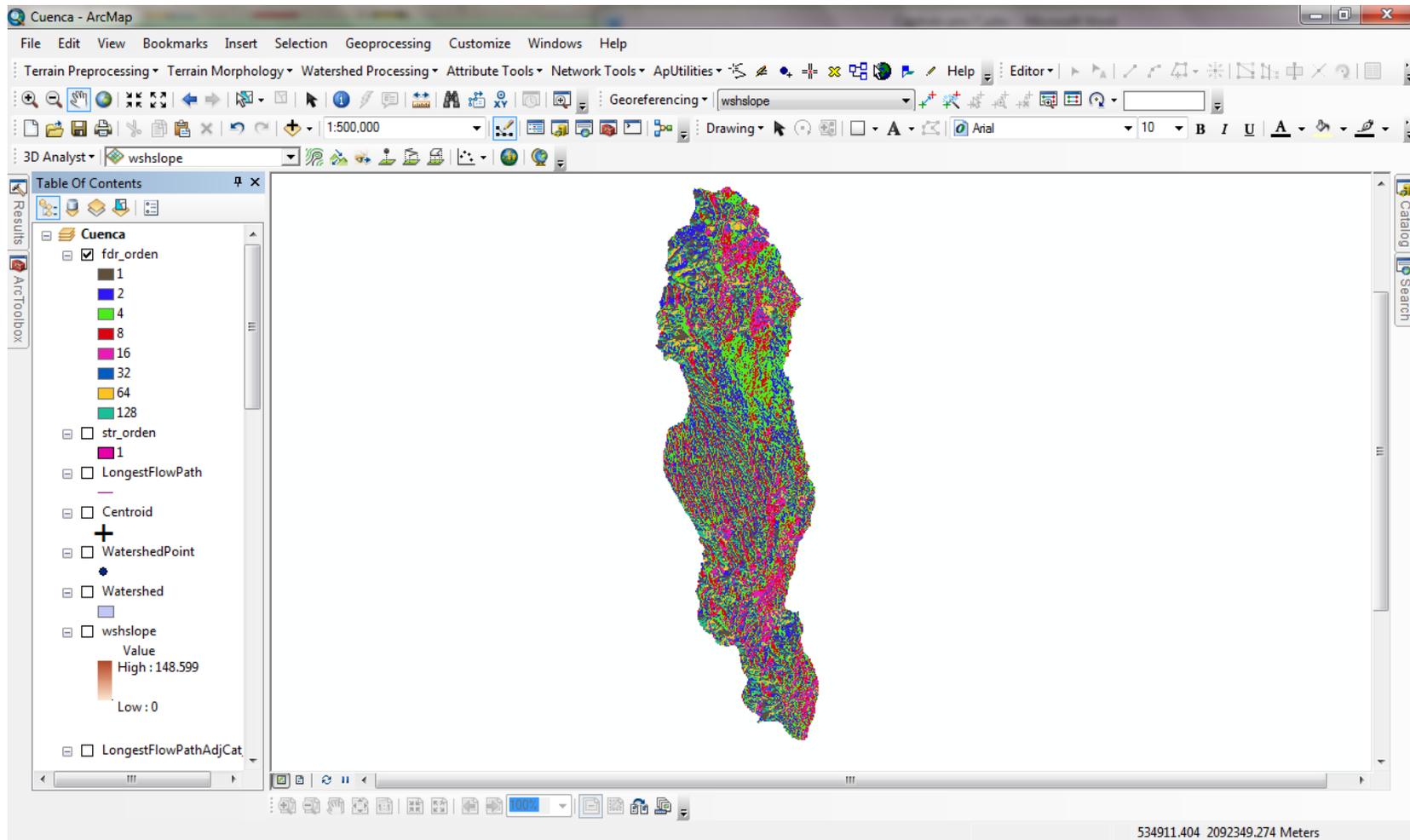


Figura A.43. Capa de dirección de flujo asociada a la cuenca delimitada obtenida con la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

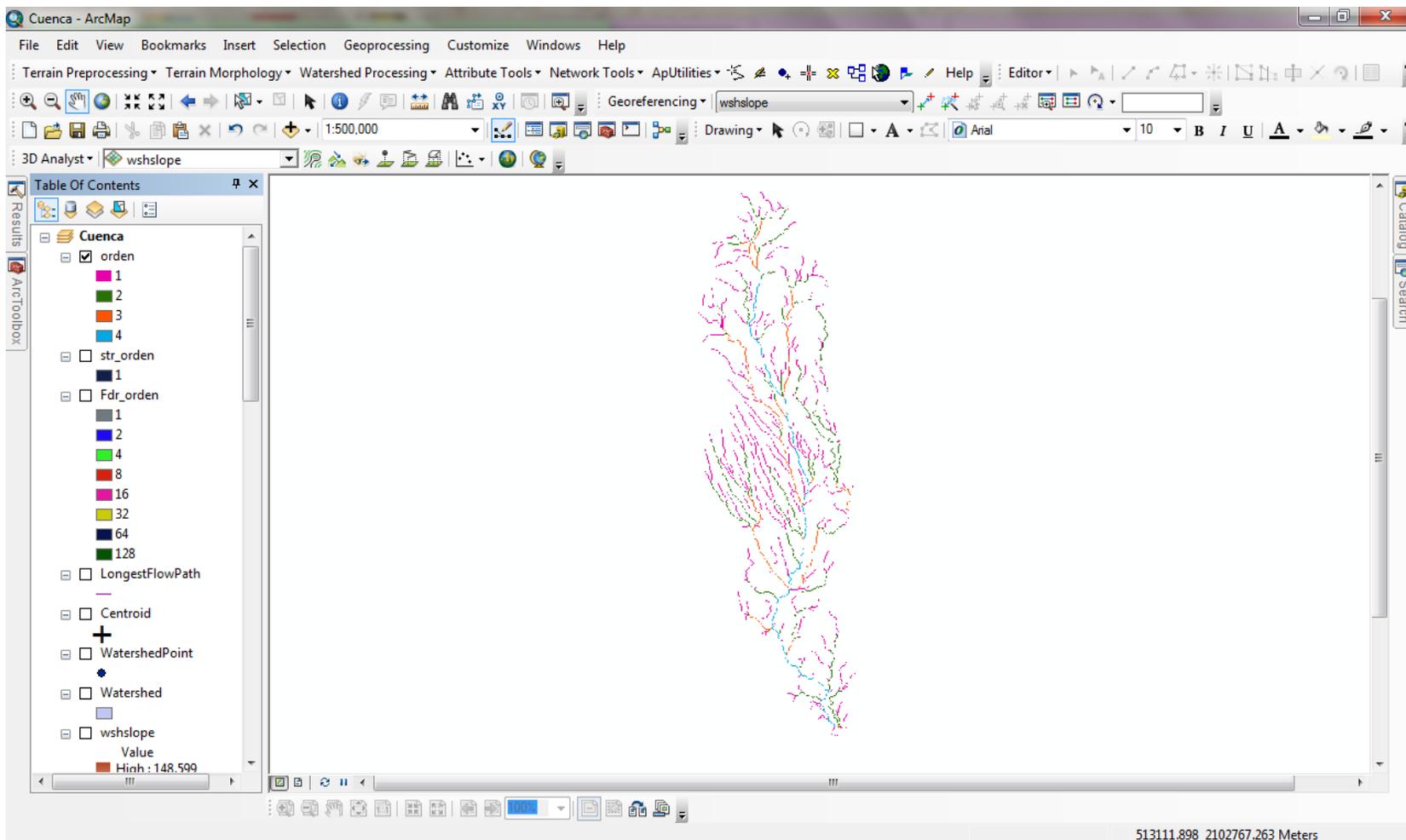


Figura A.44. Capa resultante de aplicar la función *Stream Order*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

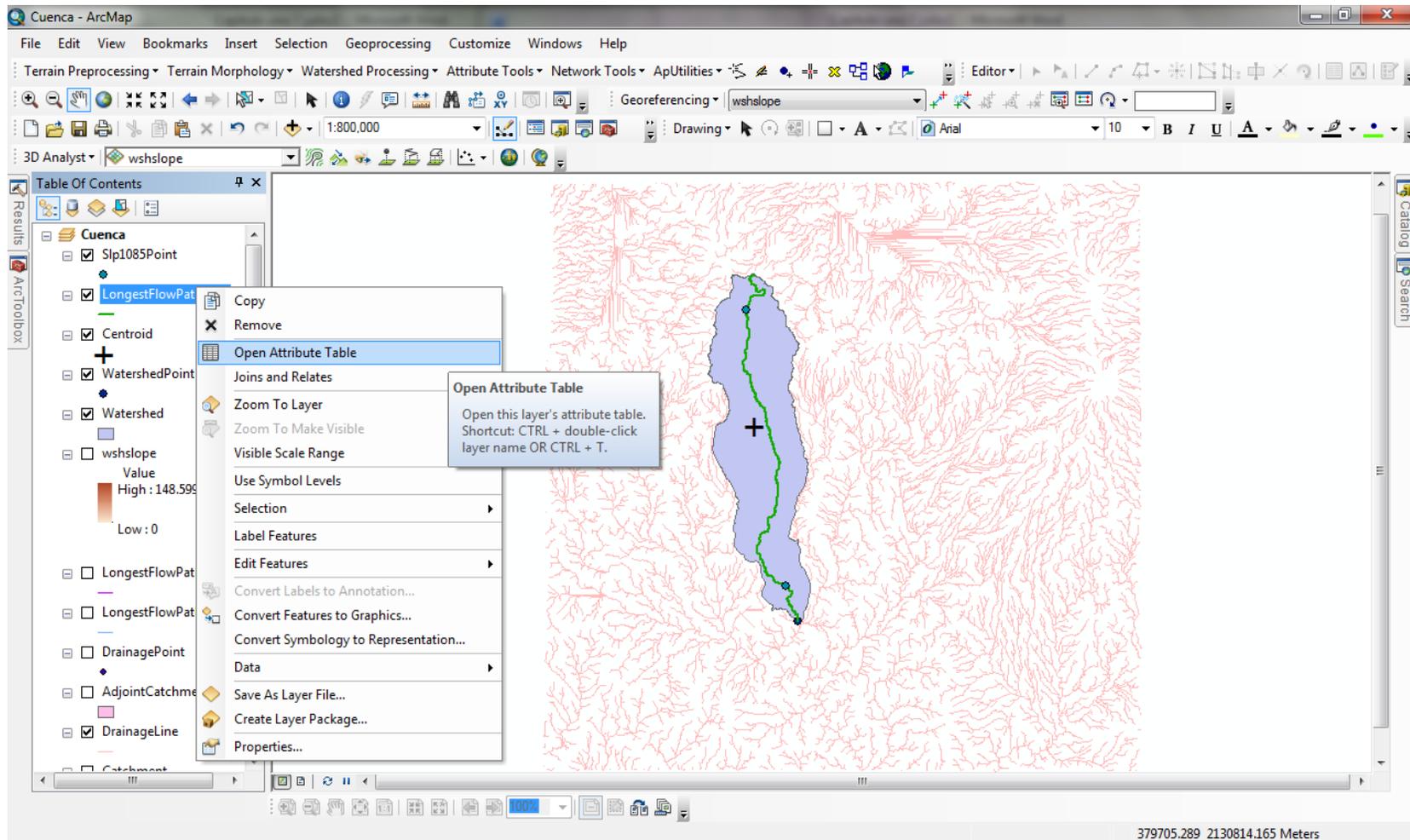


Figura A.45. Ubicación de la Tabla de Atributos para una capa en particular. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Shape*	OID*	Shape_Length	HydroID	DrainID	LengthMi	SlpFM	Slp1085FM	Slp	Slp1085	ElevUP	ElevDS	Elev10	Elev85
Polyline	1	90281.50729	32819	32817	56.101065	172.527026	162.584791	0.032676	0.030793	3841	891	925	3010

Figura A.46. Tabla de Atributos para una capa en particular. (ArcGIS 10.1, 2012b).

A.2 Funciones útiles en el uso de ArcGIS

Este subcapítulo mostrará algunas de las funciones más útiles de ArcGIS, es importante considerar que es un *software* muy completo y cuenta con cientos de herramientas por lo que explicarlas todas esta fuera del alcance de este trabajo.

Definir un sistema de coordenadas a un mapa

Cuando se abre un mapa nuevo en ArcMap es necesario especificar dentro del marco de datos, *Data Frame*, el sistema de coordenadas en el que se desea visualizar los datos; este sistema no necesita ser igual al de los datos que se estén utilizando. Si el sistema de coordenadas para el marco de datos no se define, este se establece al añadir la primera capa siendo el mismo sistema para la capa y el marco de datos, las siguientes capas que sean agregadas se mostraran en el mismo sistema de coordenadas que el marco de datos (ArcGIS 10.1, 2013).

Para definir el sistema de coordenadas en el marco de datos es necesario dar *click* derecho en el nombre de “marco de datos” y seleccionar la opción *Properties* para que aparezca el cuadro de diálogo *Data Frame Properties* (Propiedades del Marco de Datos) y dentro de la pestaña *Coordinate System* se puede seleccionar el Sistema de Coordenadas a utilizar, Figura A.47 (ArcGIS 10.1, 2013).

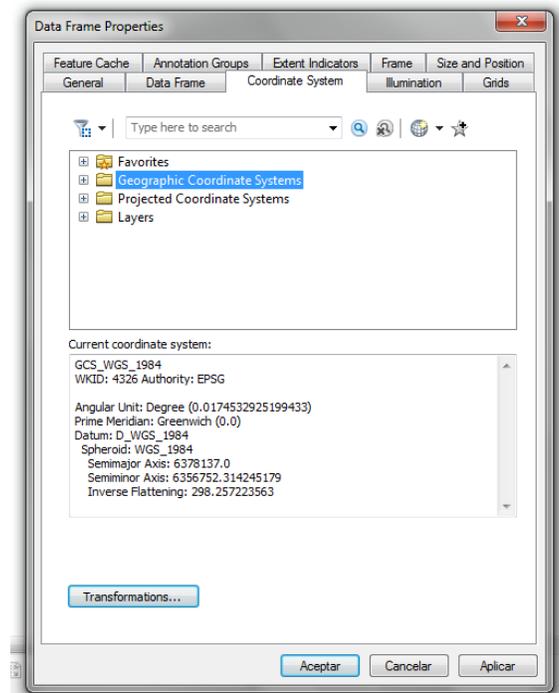


Figura A.47. Cuadro de diálogo Propiedades del Marco de Datos. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Si dentro del marco de datos existe una capa con el sistema de coordenadas que se desea utilizar, este se encontrara al desplegar la carpeta *Layers*.

Definir un sistema de coordenadas a una capa

Si al agregar una capa en ArcMap aparece un cuadro de dialogo indicando que la capa no tiene un sistema de coordenadas de referencia, Figura A.48, es necesario utilizar la función **Define Projection**, Figura A.50, que sobrescribe la información del sistema de coordenadas almacenado con un conjunto de datos, es de vital importancia conocer el sistema de coordenadas correcto.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Define Projection

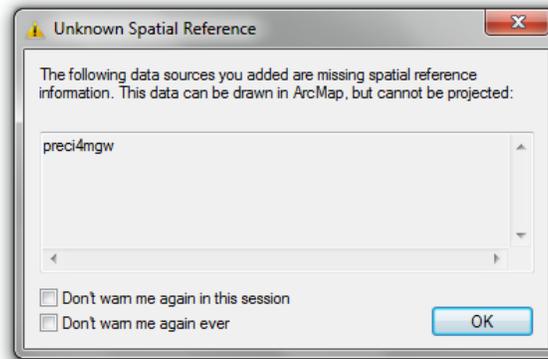


Figura A.48 Cuadro de diálogo indicando que la capa a utilizar no tiene un sistema de coordenadas de referencia. (ArcGIS 10.1, 2012b).

El origen de los datos se puede observar al dar *click* derecho en el nombre de la capa y seleccionando la opción *Properties* aparecerá el cuadro de diálogo *Layer Properties* (Propiedades de Capa) y dentro de la pestaña *Source* se observa la información de interés, Figura A.49.

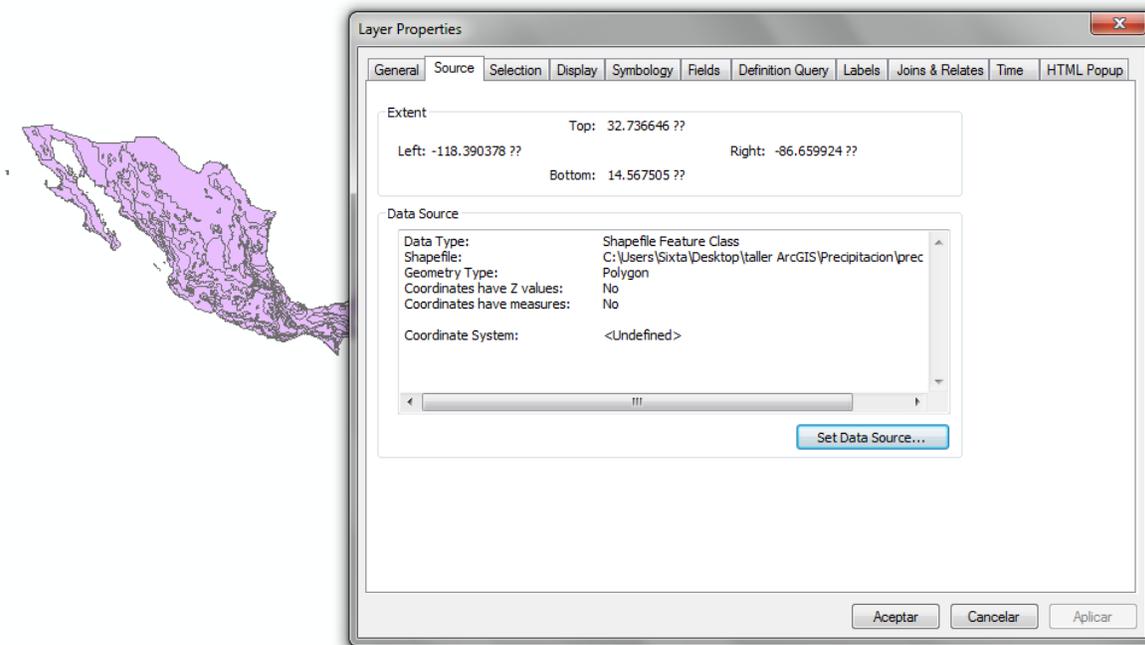
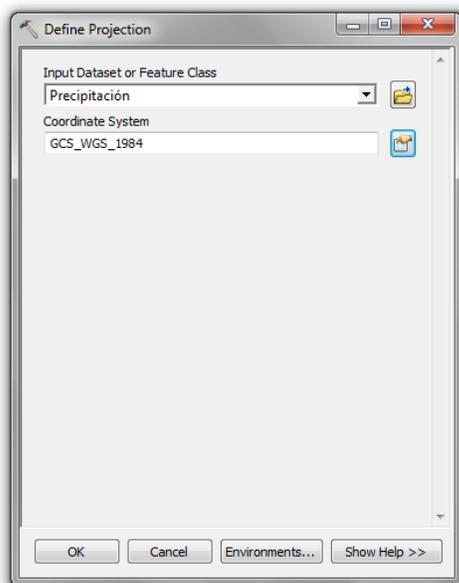


Figura A.49. Propiedades de capa donde se puede observar que el sistema de coordenadas no está especificado. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Dataset or Feature Class: Capa que no tiene definido un sistema de coordenadas.

Coordinate System: Sistema de Coordenadas a definir, un cuadro de dialogo similar al de la Figura A.47 se desplegara mostrando las opciones.

Figura A.50. Información requerida por la función *Define Projection*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

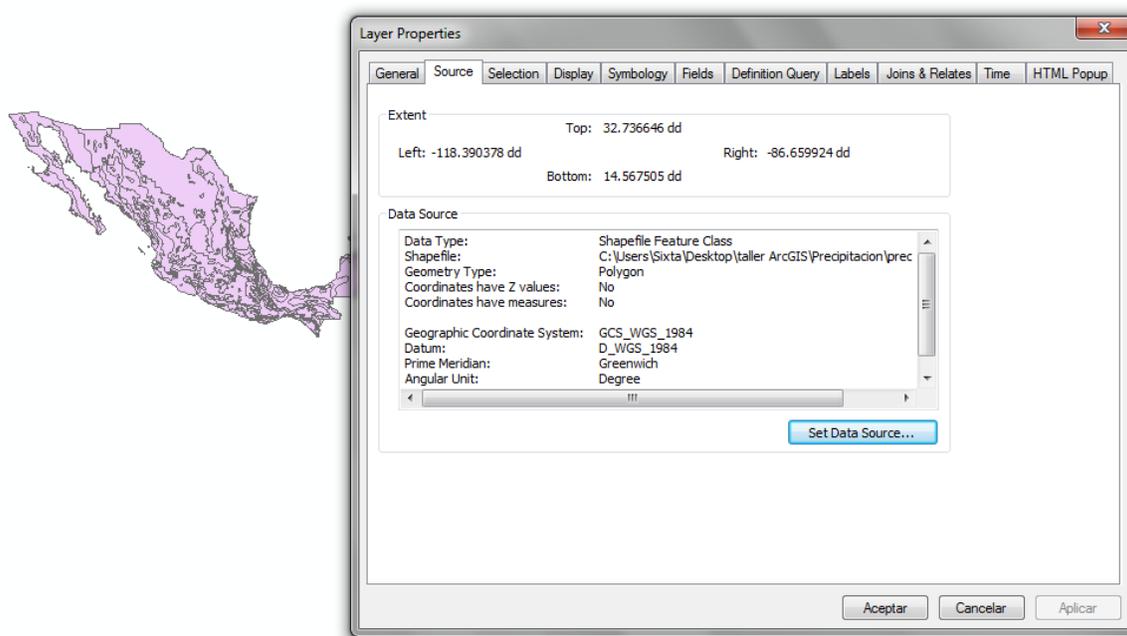
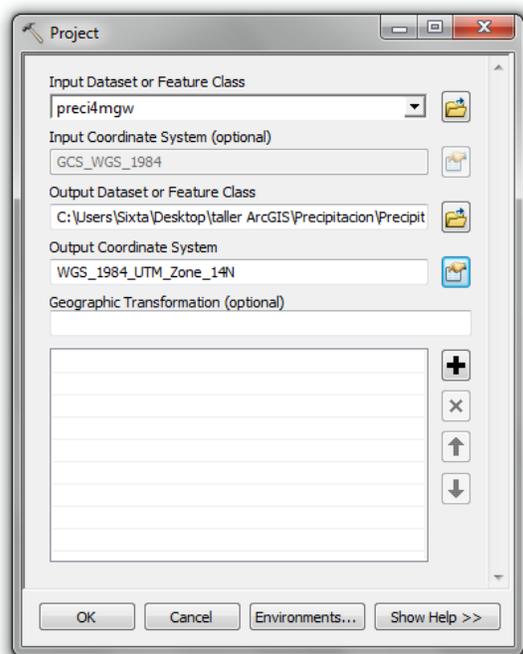


Figura A.51. Propiedades de capa donde se puede observar que el sistema de coordenadas ha sido definido. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Proyectar un archivo de formas shapefile

Cuando es necesario cambiar un archivo de tipo *shapefile* de un sistema coordinado a otro o a una proyección cartográfica se realiza con la función **Project**, Figura A.52.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Feature > Project



Input Dataset or Feature Class: Capa de clases de entidad en archivo *shapefile* que se desea cambiar de coordenadas.

Input Coordinate System: Sistema de coordenadas actual del archivo.

Output Dataset or Feature Class: Ubicación donde se guardara la nueva capa.

Output Coordinate System: Sistema de coordenadas al que se desea cambiar el archivo, un cuadro de dialogo similar al de la Figura A.47 se desplegara mostrando las opciones.

Figura A.52. Información requerida por la función *Project*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Proyectar un archivo raster

Para cambiar un archivo de tipo *raster* de un sistema coordinado a otro se utiliza la función **Project Raster**, Figura A.55.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster

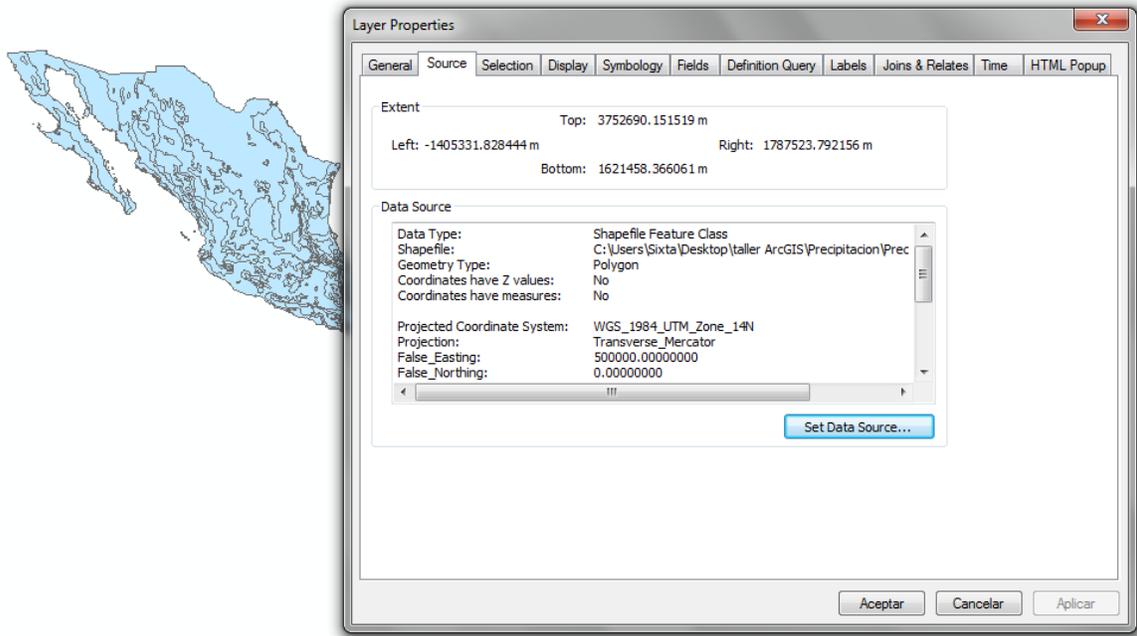


Figura A.53. Propiedades de capa donde se puede observar que la nueva capa generada (*shapefile*) ha sido proyectada. (ArcGIS 10.1, 2012b).

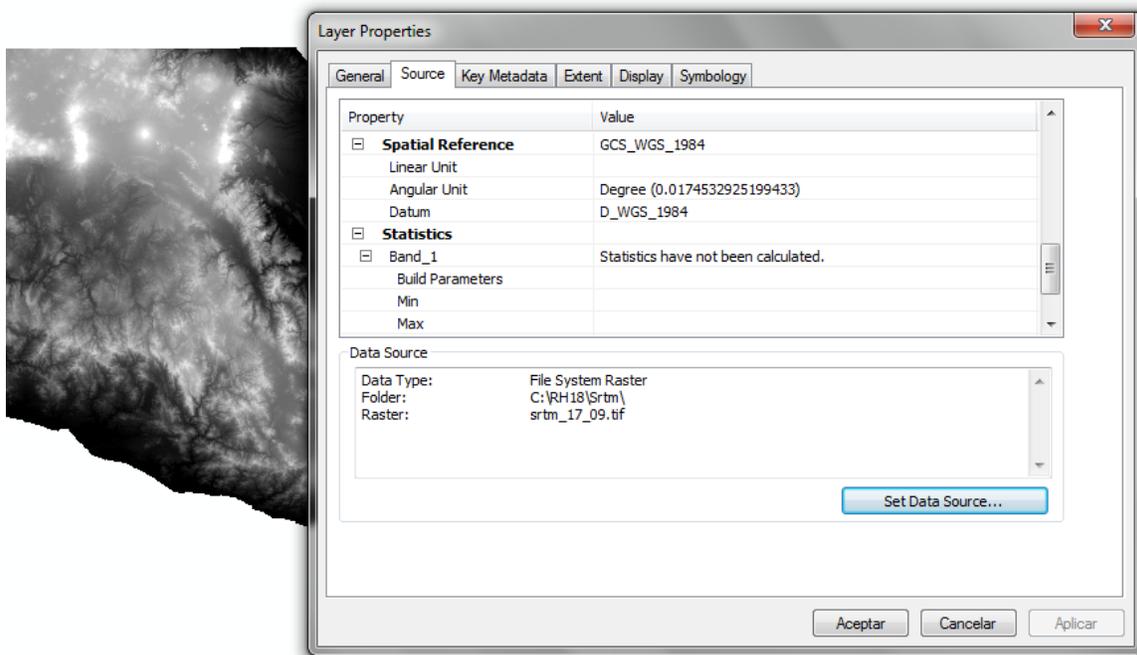
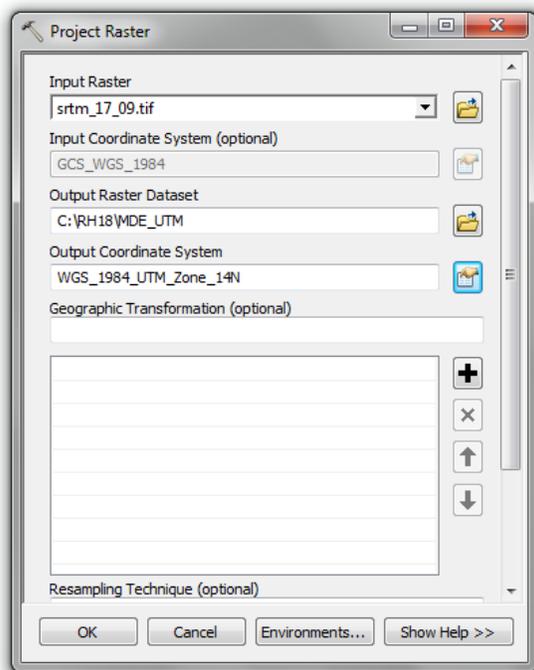


Figura A.54. Propiedades de capa donde se puede observar el sistema de coordenadas del archivo *raster*. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Dataset or Feature Class: Capa raster que se desea cambiar de coordenadas.

Input Coordinate System: Sistema de coordenadas actual del archivo.

Output Dataset or Feature Class: Ubicación donde se guardara la nueva capa.

Output Coordinate System: Sistema de coordenadas al que se desea cambiar el archivo, un cuadro de dialogo similar al de la Figura A.47 se desplegara mostrando las opciones.

Figura A.55. Información requerida por la función *Project Raster*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

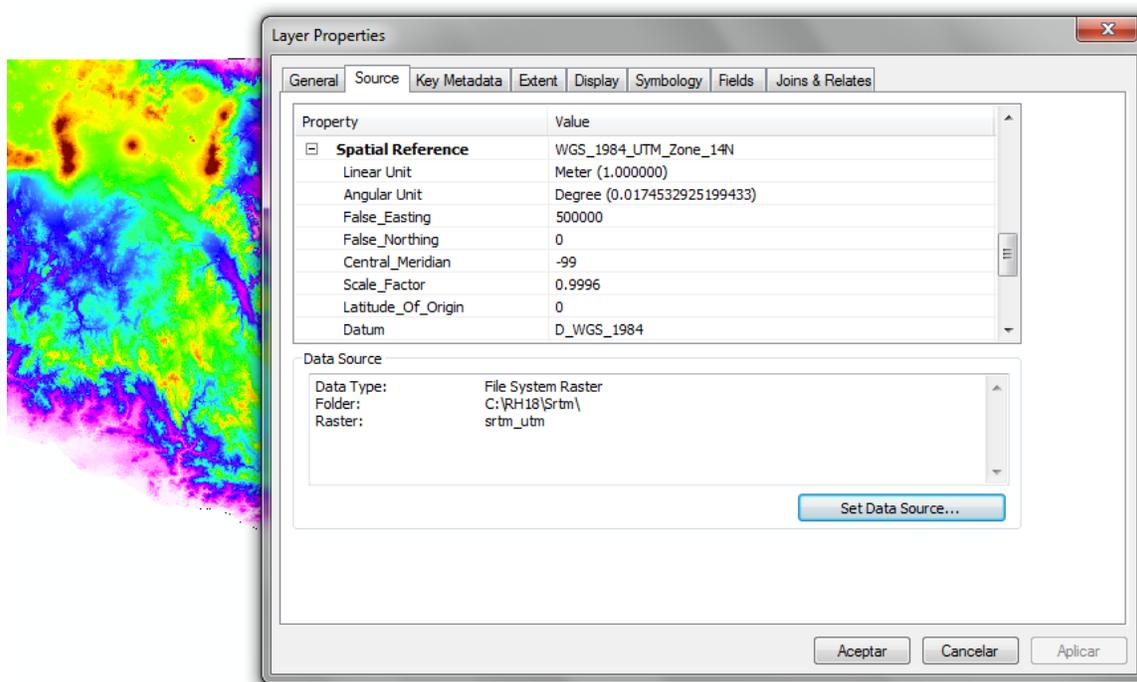
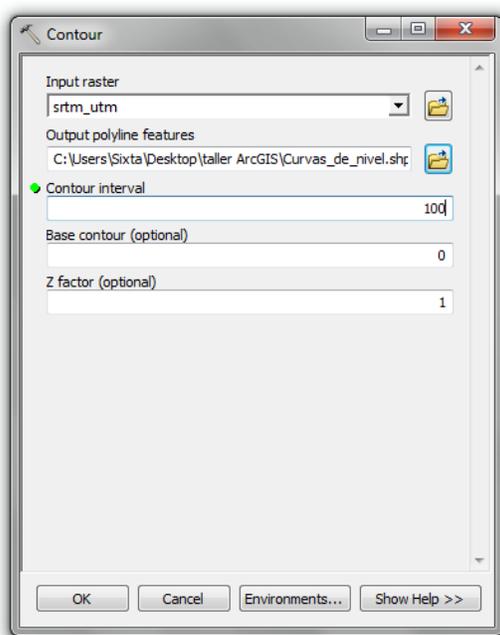


Figura A.56. Propiedades de capa donde se puede observar que la nueva capa generada (*raster*) ha sido proyectada. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Curvas de nivel

La función **Contour**, Figura A.57, permite obtener curvas de nivel a través de un MDE referenciado a un sistema de coordenadas adecuado como la proyección UTM.

Arc Toolbox > 3D Analyst Tools > Raster Surface > Contour



Input raster: Modelo Digital de Elevaciones en coordenadas adecuadas.

Output Polyline Features: Ubicación de la nueva capa.

Contour Interval: Distancia a la que se obtendrán las curvas de nivel, manejando la misma unidad que el MDE.

Figura A.57. Información requerida por la función **Contour**. (ArcGIS 10.1, 2012b).

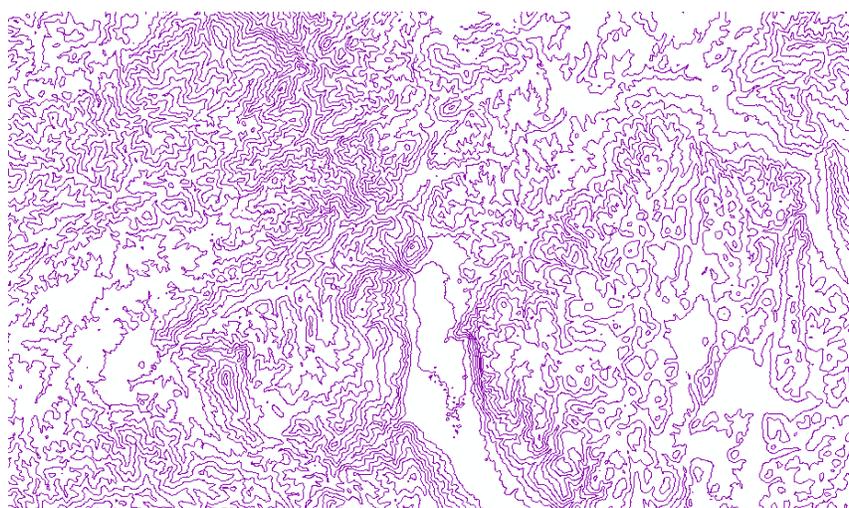
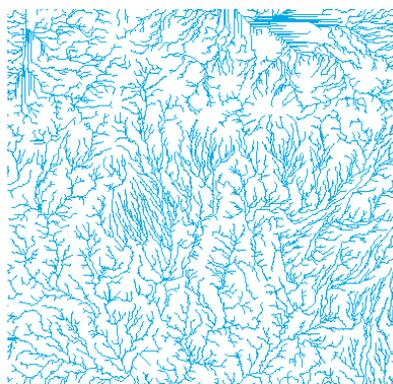


Figura A.58. Clase de entidad obtenida con la función **Contour**. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Cortar un archivo de formas shapefile

Si es necesario extraer una zona de interés de una clase de entidad, esto puede hacerse utilizando otra clase de entidad para cortar la capa mediante la función **Clip**, Figura A.60.

Arc Toolbox > Analysis Tools > Extract > Clip

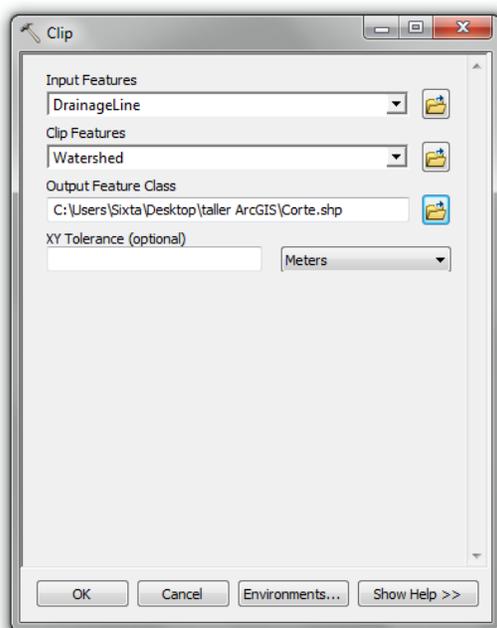


a)



b)

Figura A.59. a) Capa de clase de entidad, b) geometría utilizada para cortar la capa. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Features: Capa de clase de entidad a cortar.

Clip Features: Geometría utilizada para cortar la capa.

Output Feature Class: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.60. Información requerida por la función **Clip**. (ArcGIS 10.1, 2012b).

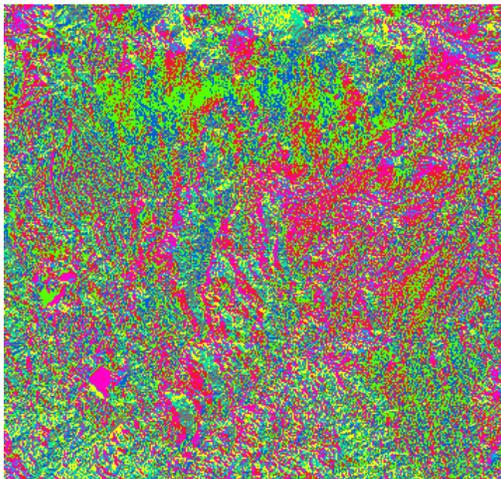


Figura A.61. Clase de entidad obtenida con la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Cortar un archivo raster

A partir de una capa tipo *raster* se pueden extraer secciones rectangulares o en base a una clase de entidad (geometría) específica utilizando la función ***Clip***, Figura A.63.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip

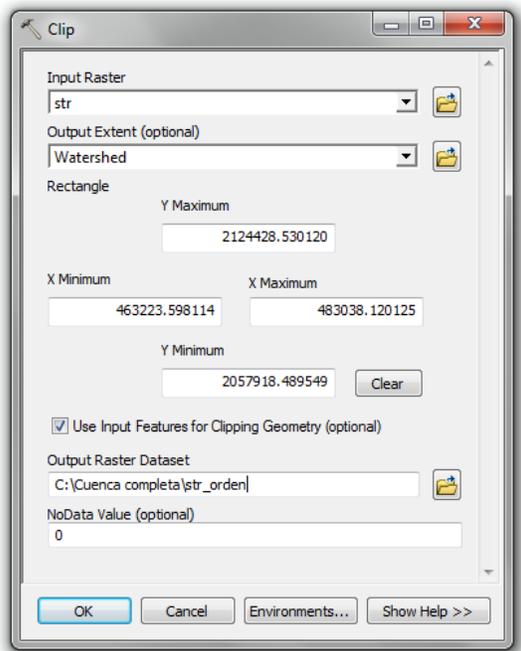


a)



b)

Figura A.62. a) Capa tipo *raster*, b) geometría utilizada para cortar la capa. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Raster: Capa raster a cortar.

Output Extent: Geometría utilizada para cortar la capa.

Output Raster Dataset: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.63. Información requerida por la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

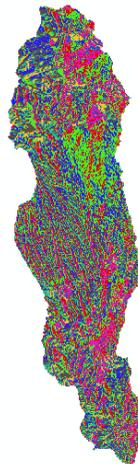


Figura A.64. Capa obtenida con la función *Clip*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Unir archivos de formas shapefile

Si se cuenta con diferentes clases de entidad que requieren ser unidas, Figura A.65, la función ***Union***, Figura A.66, genera una nueva capa que contiene una sola geometría y todas las características asociadas a ella, Figura A.67.

Arc Toolbox > Analysis Tools > Overlay > Union

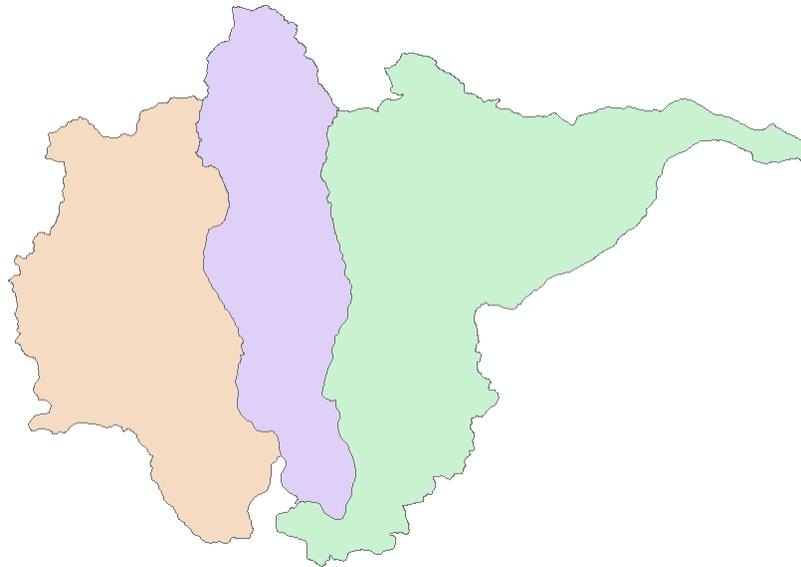
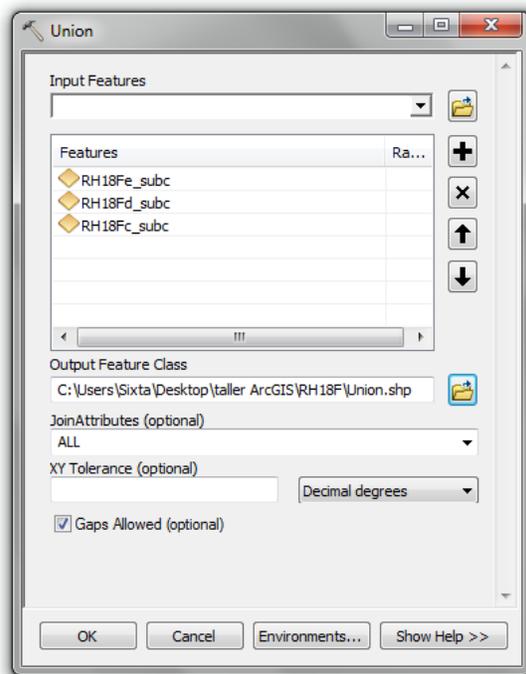


Figura A.65. Tres diferentes clases de entidad que requieren ser unidas. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Features: Clases de entidad a unir.

Output Feature Class: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.66. Información requerida por la función *Union*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

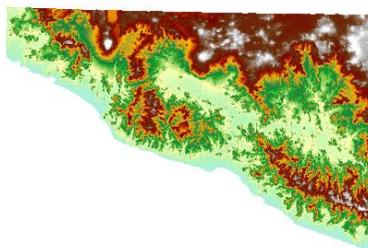


Figura A.67. Clase de entidad obtenida con la función *Union*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

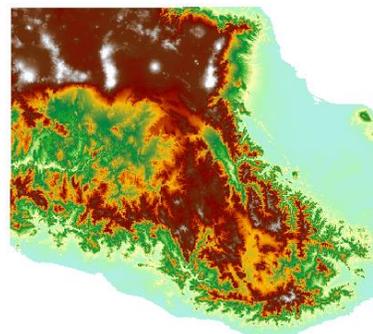
Unir archivos raster

Es posible unir dos archivos *raster*, Figura A.68, mediante la función ***Mosaic to New Raster***, Figura A.69, en la cual se debe indicar el nombre del archivo y la extensión con la cual se generara, si esto se omite la función crea la capa con la extensión predeterminada. Es recomendable que los archivos estén referenciados a un sistema de coordenadas geográficas o una proyección cónica para mantener la homogeneidad del nuevo *raster*.

Arc Toolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic to New Raster

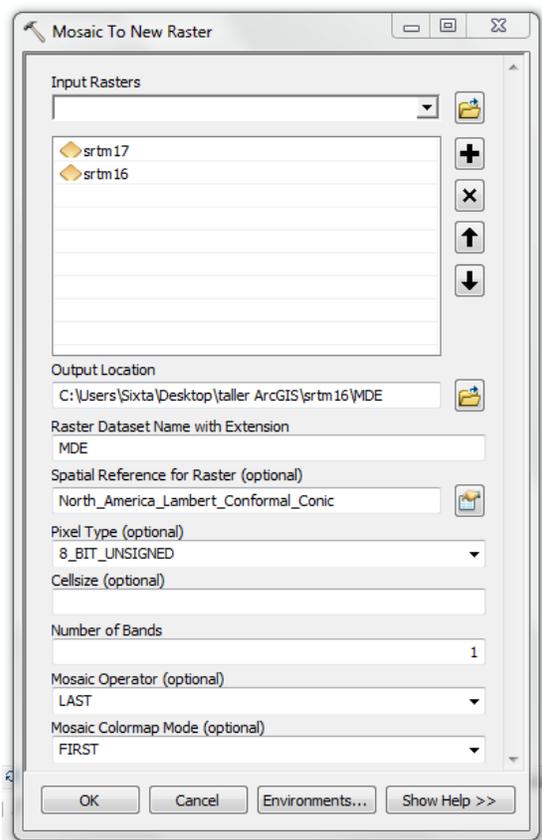


a)



b)

Figura A.68. Diferentes archivos *raster* a unir. (ArcGIS 10.1, 2012b).



Input Raster: Capas raster a unir

Output Location: Ubicación de la nueva capa.

Raster Dataset Name with Extension: Nombre de la nueva capa indicando la extensión en la que se quiere generar, si esto se omite la función utiliza la extensión predeterminada.

Spatial Reference for Raster: Se puede indicar la referencia espacial para la nueva capa, si se omite se considera la referencia de los archivos originales.

Figura A.69. Información requerida por la función *Mosaic to New Raster*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

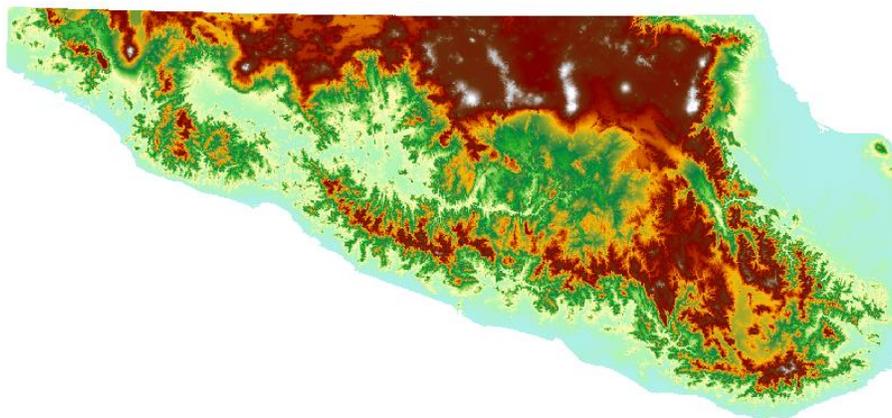
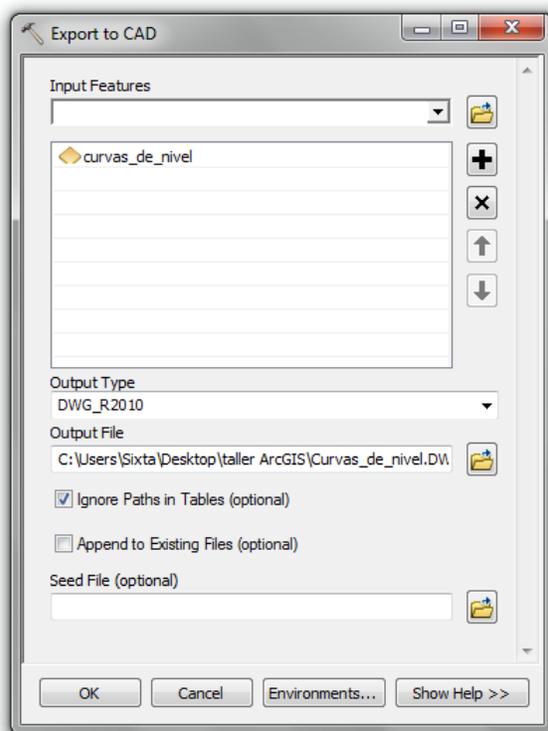


Figura A.70. Raster generado que conserva las características de los archivos originales. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Exportar una capa de clases de entidad a formato CAD

Las entidades de clase, Figura A.58, son exportadas a formato CAD con la función **Export to CAD**, Figura A.71.

Arc Toolbox > Conversion Tools > To CAD > Export to CAD



Input Features: Capas de clase de entidad a ser exportadas.

Output Type: Tipo de Archivo CAD al que se exportaran las capas.

Output File: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.71. Información requerida por la función *Export to CAD*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

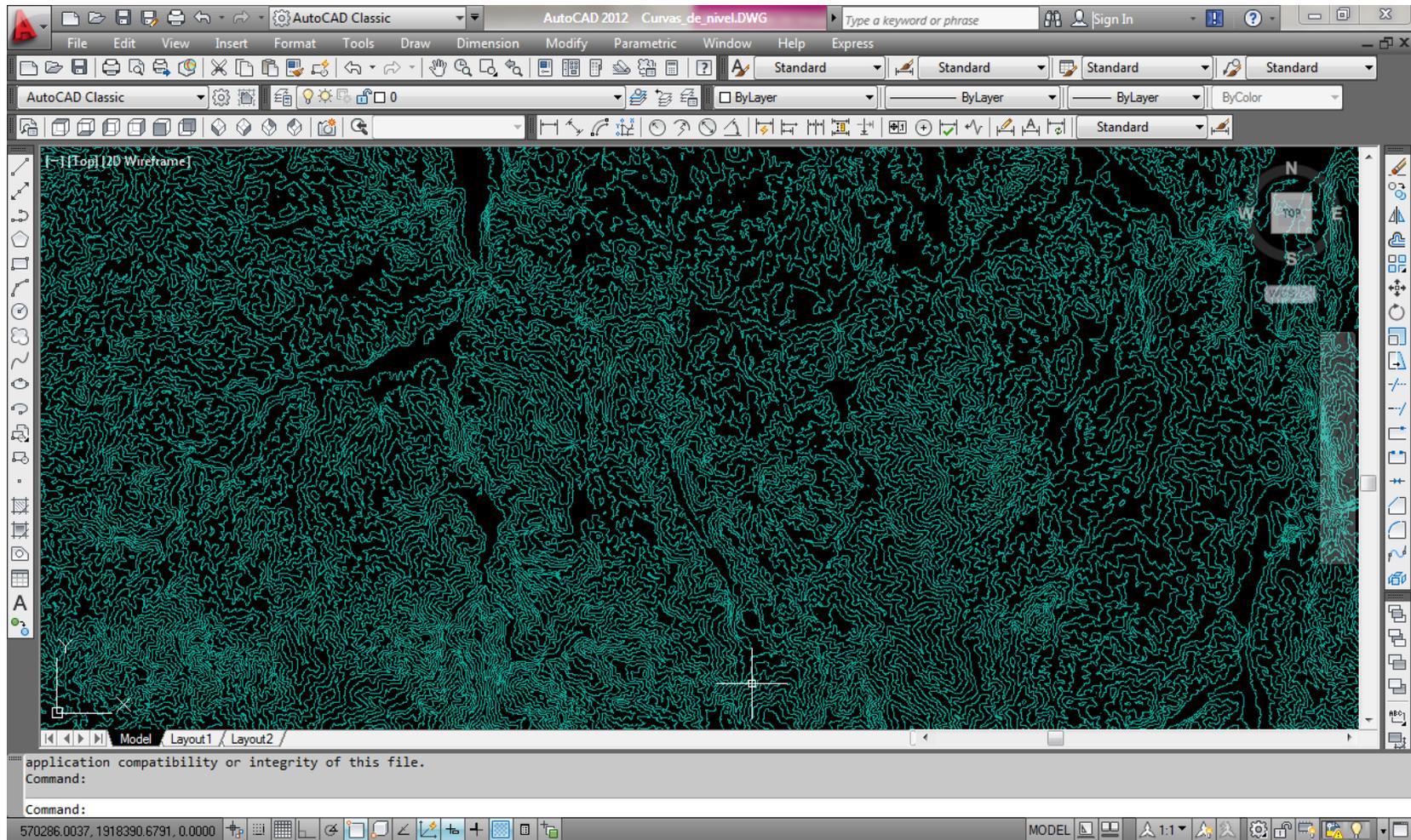
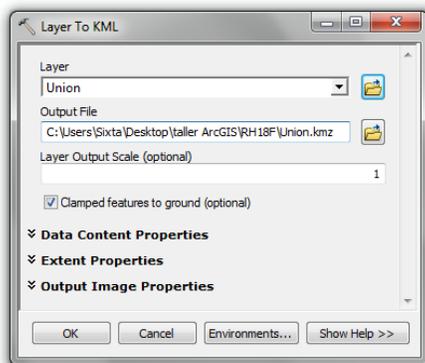


Figura A.72. Capa exportada con la función *Export To CAD* vista en AutoCAD. (ArcGIS 10.1, 2012b).

Exportar una capa de clases de entidad a formato KML

Una entidad de clase o un archivo *raster*, Figura A.62, se convierte a un archivo KML con la función **Export to KML** que puede ser visualizado en ArcGIS Explorer, ArcGlobe y Google Earth.

Arc Toolbox > Conversion Tools > To CAD > Export to KML



Layer: Capa a ser exportada.

Output File: Ubicación de la nueva capa.

Figura A.73. Información requerida por la función *Export to KML*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

La información detallada de todas las funciones de ArcToolbox se puede encontrar en las referencias ArcGIS 10.1. (2012a) y ArcGIS 10.1. (2013).

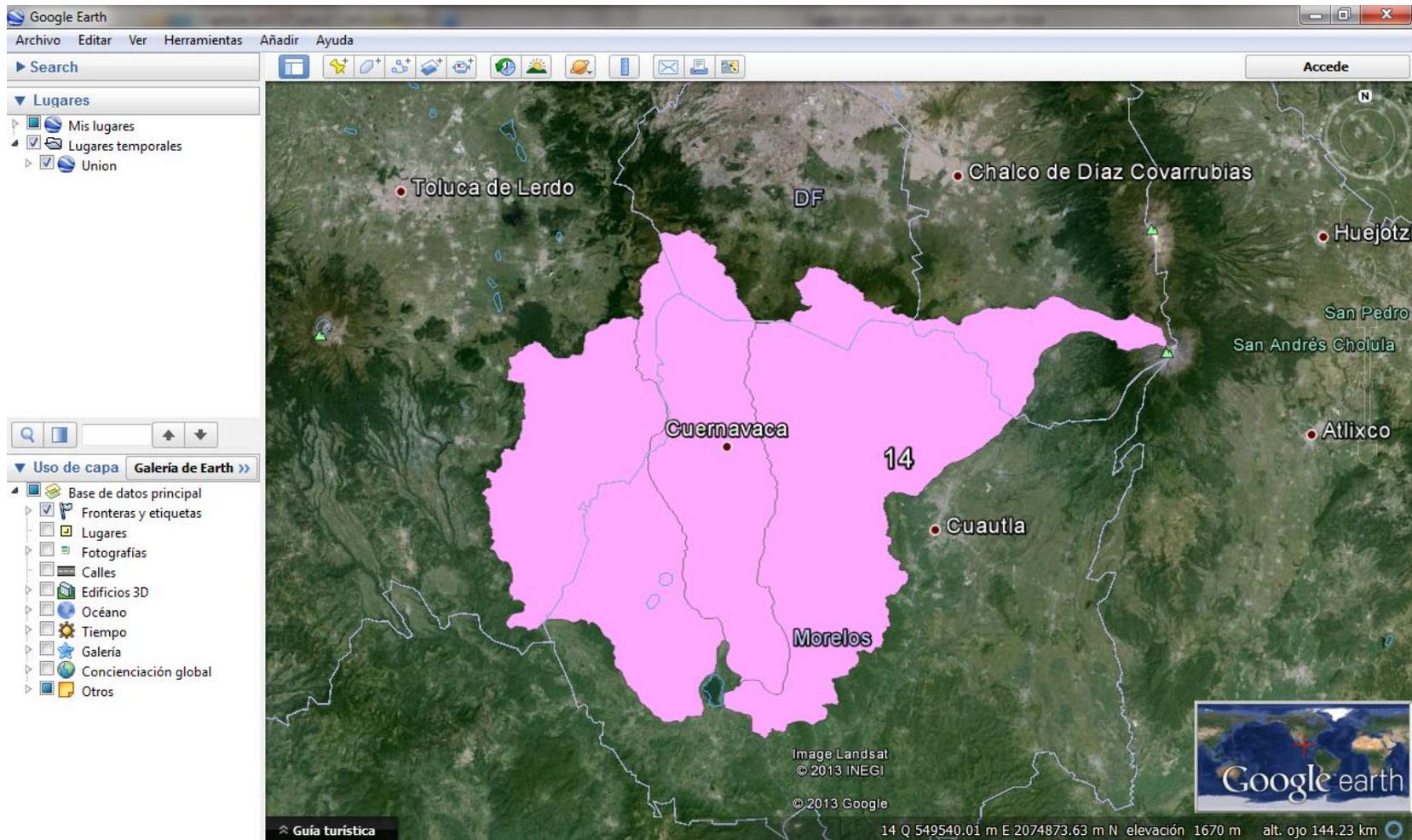


Figura A.74. Capa exportada con la función *Export To KML* vista en *Google Earth*. (ArcGIS 10.1, 2012b).

A.3 Conceptos básicos

Atributos e información descriptiva. Es la Información organizada en tablas que describe las propiedades de los objetos utilizados en SIG.

Capa, Layer. Contiene un tipo de información geográfica específica referida a un sistema de coordenadas que se almacena en un archivo digital y es representada mediante algunas estructuras de datos como: clases de entidad (*Feature class*), *raster* y atributos e información descriptiva.

Clase de entidad, Feature class. Es un conjunto de elementos del mismo tipo contenidos en una capa utilizados para representar geodatos a través de entidades tales como puntos, líneas, polígonos y anotaciones.

Datum. Está basado en los datos de un elipsoide, Tabla A.2; horizontalmente define la posición y orientación de la longitud y latitud del sistema de coordenadas geográficas, un *datum* vertical es considerado el nivel medio del mar y en consecuencia puede incorporar variaciones locales en la elevación.

Datum	Nombre del Elipsoide
NAD27	LARKE 1866
WGS84	WGS84
ITRF92	GRS80

Tabla A.2. *Datum* más utilizados en México con su correspondiente Elipsoide.

Existen dos tipos de *datum*; los Geocéntricos utilizan el centro de masa de la tierra como origen, en los que el elipsoide es lo más aproximado posible a la superficie de la tierra en un área en particular se llaman Locales, Figura A.75.

Elipsoide o Esferoide. Es una geometría en tres dimensiones con la cual se trata de representar a la tierra de forma regular, definida por el radio desde el centro de la tierra hasta el ecuador como el semieje mayor y el radio desde el centro de la tierra hasta el polo es el semieje menor, Figura A.76.

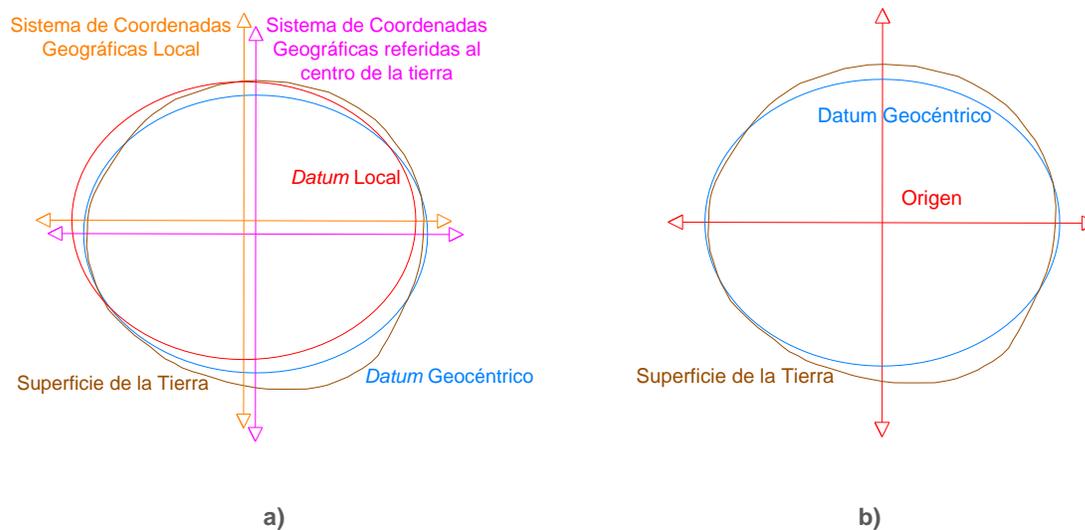


Figura A.75. Comparación entre un datum Local a) y uno geocéntrico b). (ArcGIS 10.1, 2013).

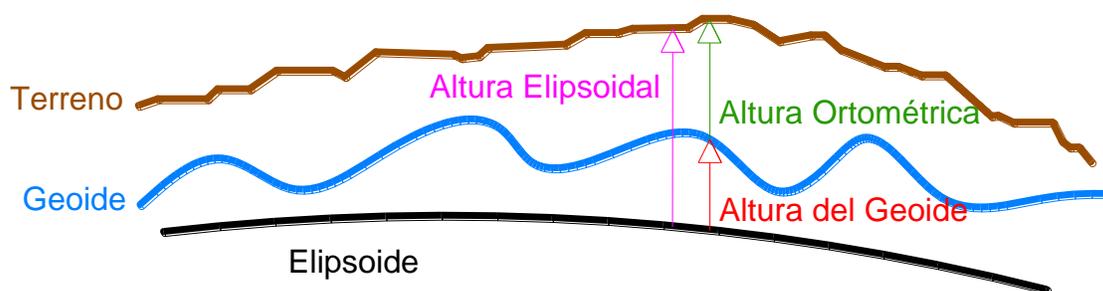


Figura A.76. Alturas ortométricas frente a elipsoides. (ArcGIS 10.1, 2013).

Geodatabase. Colección de bases de datos geográficos de varios tipos contenida en una carpeta de sistema de archivos común (ArcGIS 10.1, 2013).

Geodato. Información geográfica referenciada a un sistema de coordenadas con gran utilidad en los SIG almacenados en formatos de bases de datos, *geodatabase*, *shapefile*, cobertura, *raster*, dbf y hoja de cálculo de Microsoft Excel.

Geoide. Es una superficie teórica aproximadamente igual al nivel medio del mar y perpendicular a la dirección de la atracción gravitatoria, al igual que la tierra su geometría es irregular.

Figura A.76

Modelo Digital de Elevación. Es una cuadrícula espaciada y distribuida de forma regular donde cada celda contiene datos X y Y que representan su ubicación geográfica referidos a un sistema de coordenadas geográficas, y un valor Z indica la elevación respecto del nivel medio del mar; con el que es posible caracterizar en dos y tres dimensiones las formas del relieve y los elementos presentes en él analizando todas las perspectivas factibles.

Proyección Cartográfica. Sistema de coordenadas que proyecta de manera cartográfica la superficie esférica de la tierra sobre un plano cartesiano de dos dimensiones donde si es posible cuantificar distancias y áreas. Algunos tipos de proyecciones más usuales son la Universal Transversal de Mercator (UTM) y la Cónica Conforme de Lambert (CCL).

Raster. Son cuadrículas referenciadas geográficamente integradas por celdas espaciadas y distribuidas de forma regular donde cada una contiene un valor que representa información específica como pueden ser MDE, fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales y otros datos temáticos.

Sistema de Coordenadas Geográficas, *Geographic Coordinate System*. Es utilizado para definir ubicaciones en la tierra basándose en valores de latitud y longitud medidos en grados, no posee una longitud estándar lo que no permite cuantificar distancias o áreas. Están conformados por la unidad (grados), un meridiano base y un *datum*.

Sistema de Información Geográfica. Tiene la capacidad de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar información referenciada espacialmente, con el objetivo de representar mediante capas temáticas un modelo de la realidad en el que es posible editar datos, crear mapas, administrar cualquier tipo de información y obtener nueva información como resultado del geoprocesamiento.

Shapefile o Archivo de formas. Es un formato de archivo vectorial donde se almacena la ubicación geométrica y la información de atributos de clases de entidad, se conforma de archivos con las extensiones siguientes:

.dbf Base de datos, en forma dBASE donde se almacena la información de los atributos de los objetos.

.shp Archivo que almacena las clases de entidades.

.shx Archivo que almacena el índice de las clases de entidades.

.prj Contiene la información referida al sistema de coordenadas.

Unidad de tierra, *Ground unit*. Es la unidad X, Y utilizada para la distancia y el cálculo de áreas. Para convertir una distancia o área a una unidad específica, es obligatorio conocer la unidad asociada a la capa. La unidad de tierra puede ser definida dentro de ArcCatalog para clases de entidad (*feature class*), archivo de formas (*shapefile*) o *raster* estableciendo una referencia espacial (ArcGIS 10.1, 2012).

Unidad-Z, *Z-unit*. Es la unidad que se aplica a los valores almacenados en una cuadrícula (*grid*). Conocer la unidad-Z es esencial cuando se realizan operaciones como el cálculo de la pendiente, donde la relación entre la unidad-Z y la unidad de tierra deben tenerse en cuenta para obtener resultados significativos. La unidad-Z puede ser definida mediante la edición de un archivo de proyección asociado a un *grid* (ArcGIS 10.1, 2012).

ANEXO B

B.1 Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, World Reference Base for Soil Resources (WRB)

Acrisol [AC]

Acrisol (del latín *acris*: agrio, ácido), son suelos ácidos con un contenido de arcilla en el subsuelo mayor al superficial resultado de una migración de arcilla; se caracterizan por sus colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas.

Se encuentran en regiones de clima tropical húmedo, subtropical húmedo y templado cálido donde el tipo de vegetación natural es selva; como lo son las sierras orientales de Oaxaca, la llanura costera veracruzana, la sierra Lacandona y los Altos de Chiapas.



Figura B.1. Acrisol en Sierra Pajaritos, Nayarit. (INEGI, 2004).

La baja capacidad de nutrientes limita su uso en la agricultura a la producción de frutos tropicales como cacao, café o piña; en el ámbito ganadero son utilizados al tener pastos inducidos; es conveniente que el uso de los acrisoles sea forestal, ya que ayuda a su conservación al ser un suelo susceptible a la erosión.

Albeluvisol [AB]

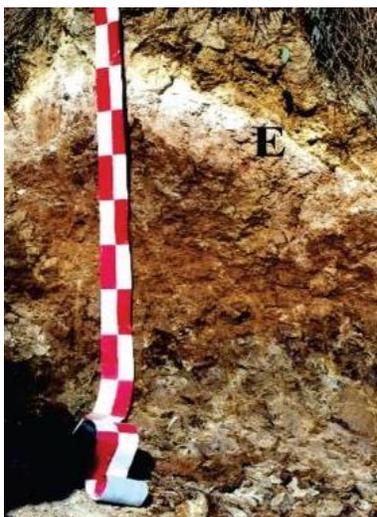


Figura B.2. Albeluvisol en Buenavista, Morelos. (Cabadas, et al., 2010).

Albeluvisol (del latín *albus*, blanco y *elvere*, lavar), suelos que presentan acumulación de arcilla en el primer metro de profundidad. En el perfil se presenta un horizonte de color oscuro sobre un horizonte subsuperficial de color blanco y este a su vez sobre el horizonte arcilloso.

Son encontrados en áreas de bosque de coníferas o bosque mixto donde el clima es templado con inviernos fríos.

Alisol [AL]

Alisol (del latín *alumen*, alumbre), es un suelo muy ácido que tiene una importante concentración de arcilla en el subsuelo en conjunto con una alta cantidad de aluminio intercambiable dentro del primer metro de profundidad, se desarrollan del producto de la meteorización de rocas básicas y materiales no consolidados.

Los climas tropical húmedo, subtropical húmedo y templado cálido propician su formación, se encuentran en la selva húmeda y bosques templados de Chiapas y Oaxaca.



Figura B.3. Alisol en China. (Ibáñez y Manríquez, 2012a).

Andosol [AN]



Figura B.4. Andosol en Volcán Ceboruco, Nayarit. (INEGI, 2004).

Andosol (del japonés *an*, negro y *do*, suelo), suelos negros de paisajes volcánicos con material parental de vidrio, eyecciones volcánicas (principalmente ceniza) u otro material rico en silicato, se desarrollan por meteorización ácida en climas húmedos teniendo un contenido de arcilla menor al 10 %.

Naturalmente se extienden en bosques o selvas como las regiones de Mil Cumbres y la Neovolcánica Tarasca, en el estado de Michoacán; en las Sierras Neovolcánicas Nayaritas; Sierra de los Tuxtlas en Veracruz; y en la región de Lagos y Volcanes de Anahuac, en el centro del país.

Debido a su retención de fósforo tiene bajos rendimientos agrícolas mientras que su uso pecuario es principalmente ovino; al ser un suelo susceptible a la erosión eólica se recomienda ser de uso forestal para su preservación.

Antrosol [AT]

Antrosol (del griego *anthropos*, ser humano), se caracteriza por la modificación de sus materiales innatos constituyentes debido a actividades humanas en las que se adicionan materiales orgánicos o desechos domésticos, de riego y labranza, frecuentemente se localiza en regiones donde la agricultura se ha practicado por un tiempo prolongado.

Es posible que el antrosol esté presente solo en la parte superficial del perfil coexistiendo con suelos inherentes a profundidades mayores. Este tipo de suelo no es encontrado en nuestro país.



Figura B.5. Antrosol en Retamar Puerto Real, España. (Ibañez, 2012a).

Arenosol [AR]

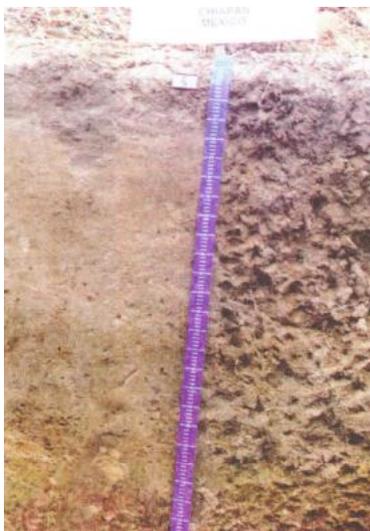


Figura B.6. Arenosol en Palenque, Chiapas. (INEGI, 2004).

Arenosol (del latín *arena*, arena), como su nombre lo refiere son suelos conformados por más del 65 % de arena de textura gruesa, comprende suelos desarrollados en arenas residuales (formados por la meteorización de sedimentos o rocas ricos en cuarzo) y arenas recién depositadas.

Tienen poca presencia en el territorio nacional, situándose en zonas tropicales o templadas con altas precipitaciones como lo son las llanuras y pantanos tabasqueños y del norte de Chiapas y la llanura costera del estado de Nayarit.

Presentan una alta permeabilidad y en consecuencia una baja capacidad para retener agua y almacenar nutrientes, en cuestión de erosión su susceptibilidad es de moderada a alta.

Calcisol [CL]

Calcisol (del latín *calx*, calcáreo), son suelos de color pardo pálido con una acumulación secundaria de carbonatos de calcio dentro del primer metro de profundidad, formados debido a depósitos aluviales, coluviales y eólicos de material meteorizado rico en bases.

Se extienden en el 10.40 % del territorio nacional, en ambientes áridos y semiáridos donde la vegetación natural es escasa y dominada por arbustos, árboles xerófitos y pastos efímeros, gracias a estas características son suelos representativos del desierto mexicano propiamente en la península de Baja California, las llanuras desérticas de Coahuila y Nuevo León, las sierras plegadas del norte de

Chihuahua, los lomeríos áridos de Aldama y Río Grande en Zacatecas, así como los extensos desiertos sonorenses. Sus condiciones de elevada pedregosidad limitan su uso en la agricultura.



Figura B.7. Calcisol en Ojinaga, Chihuahua. (Xix, 2010).

Cambisol [CM]



Figura B.8. Cambisol en Atolinga, Zacatecas. (INEGI, 2004).

Cambisol (del italiano *cambiare*, cambiar), se consideran suelos nacientes de color parduzco. La diferencia de horizontes en el subsuelo es evidente por cambios en la estructura; el acumulación de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso; y la ausencia de materia orgánica y compuesto de aluminio y fierro. De material parental de textura media a fina, se forman por la meteorización moderada de una amplia gama de rocas, y presentan una alta susceptibilidad a la erosión.

Se desarrollan en regiones con cualquier tipo de vegetación y clima (excepto árido), sobre terrenos montañosos, como por ejemplo la llanura costera del estado de Nayarit, los Santitos en Baja California Sur, los

bosques templados de Durango, Zacatecas y Oaxaca y la selva húmeda de Oaxaca y Yucatán, abarcando el 4.30 % de la superficie del país. Su rendimiento asociado a actividades económicas es variable ya que depende del clima donde se localice.

Chernozem [CH]

Chernozem (del ruso *chernij*, negro y *zemlja*, tierra), suelo con un horizonte superficial negro rico en materia orgánica, nutrientes y carbonatos secundarios en los primeros 50 cm de profundidad, formado principalmente por sedimentos producto de la erosión eólica de manera análoga son moderadamente susceptibles a la erosión.

Se ubican en climas semiáridos o de transición hacia climas de mayor precipitación, como la selva húmeda de Tamaulipas; el matorral xerófilo de Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, y Zacatecas; el pastizal natural de Durango; las llanuras y lomeríos del norte de Veracruz y parte de la llanura costera tamaulipeca.



Figura B.9. Chernozem en Saltillo, Coahuila. (INEGI, 2004).

Sus usos en el territorio nacional comprenden la ganadería extensiva mediante pastoreo o intensiva a través de pastos cultivados; en la agricultura para el cultivo de granos, oleaginosas y hortalizas, ambos con rendimientos generalmente altos.

Criosol [CR]

Criosol (del griego *kryos*, frío), son suelos de componentes minerales y orgánicos en los que el agua se presenta permanentemente congelada, manteniendo la temperatura del suelo por debajo de los cero grados centígrados.



Figura B.10. Criosol en el norte de Rusia. (Ibáñez y Manríquez, 2012b).

Lo forman materiales eólicos, aluviales, coluviales y residuales. El agua congelada dentro de estos suelos tiene efectos como levantamiento por helada, agrietamiento térmico y segregación de hielo.

Se desenvuelven en climas de tundra (escasa y continuamente vegetada), bosques de coníferas, mixtos de coníferas y deciduos que se ubican en las regiones Antártica, Ártica, subártica y boreal. En México existen indicios de estos suelos en las zonas de deshielo de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba.

Durisol [DU]

Durisol (del latín *durus*, duro), es un suelo con alto contenido de sílice, el cual propicia el endurecimiento de la capa subsuperficial dentro del primer metro de profundidad; formado principalmente por depósitos aluviales fuertemente meteorizados originando suelos moderadamente profundos y bien drenados.

Se encuentra en regiones áridas y semiáridas de baja pendiente, en particular la selva subhúmeda de Sinaloa, el bosque templado de Chihuahua y Durango, el matorral xerófilo en San Luis Potosí y las llanuras desérticas de piso cementado en Aguascalientes.



Figura B.11. Durisol en La Tinaja, Aguascalientes. (Balbontin, 2007).

Ferralsol [FR]



Figura B.12. Ferralsol en Brasil.
(Ibañez, 2013).

Ferralsol (del latín *ferrum*, hierro y *alumen*, alumbre), figuran suelos antiguos formados de rocas básicas con una capa subsuperficial que ha sido intensa y prolongadamente meteorizada, que causa la concentración de minerales primarios como el cuarzo, su fracción de arcilla está dominada por arcillas de baja actividad (caolinita), ambas características producen los colores amarillentos y rojizos del suelo.

Los climas húmedos como la selva húmeda y el bosque mesófilo de montaña de Chiapas favorecen su desarrollo.

Fluvisol [FL]

Fluvisol (del latín *fluvius*, río), son suelos poco desarrollados de mediana profundidad; se forman en estratos de sedimentos de origen fluvial, marino o lacustre presentados en capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas a causa de los escurrimientos en ríos de gran caudal.

Se hallan en todos los climas y relieves del país como los abanicos fluviales en bajadas y terrazas de la Península de Baja California, la llanura costera del estado de Nayarit y el matorral xerófilo Baja California Sur, Coahuila y Sonora; se desarrollan cerca de lechos de ríos propiciando una cubierta vegetal a base de ahuehuetes, ceibas y sauces.



Figura B.13. Fluvisol en márgenes del Río Grande en Santiago Ixcuintla, Nayarit.
(INEGI, 2004).

En la agricultura estos suelos son apreciados gracias a su disponibilidad de nutrientes en las plantas.

Gleysol [GL]



Figura B.14. Gleysol en Abreu, Campeche. (INEGI, 2004).

Gleysol (del ruso *gley*, masa lodosa: pantano), son, literalmente, suelos pantanosos que se desarrollan en áreas bajas donde el agua freática es somera o están saturados de agua la mayoría del año, esto es causa de su policromía (colores grises, azules y verdes). Está formado de materiales fluviales, marinos y lacustres donde predominan las arcillas y en consecuencia hace que las zonas ocupadas por estos suelos sean afectados por el fenómeno inundación.

En México se pueden encontrar en la selva húmeda de Campeche, las llanuras costeras de Nayarit y Veracruz, y los pantanos de Tabasco donde se desarrolla vegetación de pastizal, cañaveral o manglar.

Al encontrarse en gran extensión del sureste del país su uso es destinado a la ganadería bovina con buenos rendimientos, en limitadas ocasiones se emplean en la agricultura de cultivos tolerantes a la inundación como arroz y caña.

Gipsisol [GY]

Gipsisol (del griego *gypsos*, yeso), son suelos con una capa cementada por yeso producto de la acumulación de sulfato de calcio secundario que da origen al color claro del horizonte superficial; su material parental está constituido por depósitos aluviales, coluviales y eólicos no consolidados de material meteorizable.

Se ubican en las llanuras desérticas de Coahuila y el norte de San Luis Potosí donde la vegetación natural es del tipo arbustos, matorral xerófilo y pastizal natural.



Figura B.15. Gipsisol en el Ejido Puestecitos, San Luis Potosí. (Balbontin, et al., 2007).

Histosol [HS]



Figura B.16. Histosol en Xochimilco, Distrito Federal. (INEGI, 2004).

Histosol (del griego *histos*, tejido), se caracterizan por la presencia de materia orgánica en más del 20 % de su peso, su perfil es generalmente de color negro, esponjoso, ligero y con alta capacidad de retención de humedad, lo que los hace poco susceptibles a la erosión.

Se desarrollan en regiones donde el agua freática es somera como pantanos y lechos de lagos, la acumulación de desechos orgánicos y agua favorecen tanto su formación como la cubierta vegetal de tipo pastizal y popal. Es común encontrarlos en las zonas lacustres de Xalatlaco, Estado de México y en las chinampas de Xochimilco en el Distrito Federal. Su uso en la agricultura de hortalizas ofrece resultados aceptables.

Kastañozem [KS]

Kastañozem (del latín *castanea* y ruso *kashtan*, castaña y *zemlja*, tierra), son suelos alcalinos, constituidos en gran medida por materia orgánica, nutrientes y carbonatos; su capa superficial de color pardo o rojizo oscuro se prolonga aproximadamente a un metro de profundidad.

En nuestro país, se extienden en las sierras y llanuras del norte de Zacatecas, parte del Bolsón de Mapimí y las llanuras occidentales de San Luis Potosí presentando principalmente una vegetación de pastizal y matorral.

Su uso más eficiente es en la agricultura de granos, oleaginosas y hortalizas resultado de su alta fertilidad natural y moderada susceptibilidad a la erosión.



Figura B.17. Kastañozem en Dolores, Guanajuato. (INEGI, 2004).

Leptosol [LP]



Figura B.18. Leptosol en Tapias Viejas, Aguascalientes. (Xix, 2010).

Leptosol (del griego *leptos*, fino), son suelos someros, con una profundidad menor a los 25 cm que presentan a lo largo del perfil roca dura y continua.

En México, los leptosoles abarcan el 28.3 % de la superficie total, ubicándose en regiones con topografía accidentada y de extensas planicies como: las Penínsulas de Yucatán y Baja California, las sierras de San Carlos, Sierras del Petén, Serranía del Burro, Sierras del Sur de Puebla, el Carso Yucateco, la Gran Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental y el desierto Chihuahuense; desarrollándose favorablemente en los diferentes climas que se presentan.

Su uso agrícola solo es posible utilizando técnicas adecuadas a su poca profundidad, alta pedregosidad y contenido de calcio que afecta los nutrientes absorbidos por las plantas, debido a esto su uso óptimo es mantenerlo con su vegetación original.

Lixisol [LX]

Lixisol (del latín *lixivia*, sustancias lavadas), están constituidos por arcilla, con alto contenido en la capa subsuperficial y en menor cantidad en la capa superficial, formados debido a la erosión química de materiales de textura fina.

El ambiente en que se desarrollan los lixisoles comprende regiones con clima tropical, subtropical y templado. Aunque en México tienen poca presencia abarcan gran parte de la zona tequilera conocida como el triángulo de oro del Agave, formado por la meseta entre Atotonilco, Tepatitlán, Arandas y Jesús María, dentro de los Altos de Jalisco, en menor superficie se ubican en la selva húmeda y bosque templado de Nayarit y Tabasco.



Figura B.19. Lixisol en Ghana. (Ibáñez y Manríquez, 2012c).

Luvisol [LV]



Figura B.20. Luvisol en la Sierra Alica, Nayarit. (Balbontin, et al., 2007).

Luvisol (del latín *luere*, lavar), son suelos que han sido afectados por procesos erosivos y en consecuencia presentan un horizonte superficial menor a 18 cm; su subsuelo es rico en arcillas de alta actividad dando las tonalidades rojas y pardas en el perfil, su material parental lo constituyen depósitos eólicos, aluviales y coluviales.

El 9 % del territorio nacional está cubierto por luvisoles asociados a climas templados, cálidos y tropicales lluviosos que pueden ser encontrados en los bosques de coníferas, valles centrales y selvas caducifolias de las sierras escarpadas de Oaxaca; las sierras tropicales al norte de Chiapas y la Selva Lacandona; el extremo sur de la Sierra Madre Occidental; las llanuras aluviales asociadas con lomeríos de la costa veracruzana y el estado de Nayarit; también se ha observado su presencia en climas más secos como las grandes mesetas de Durango y Chihuahua, y los Altos de Jalisco. Son utilizados en la agricultura de café, frutas y aguacate con buenos rendimientos, en la ganadería presentan moderados beneficios con pastos naturales e inducidos, su uso primordial es la contención de los aserraderos más importantes del país.

Nitosol [NT]

Nitosol (del latín *nitidus*, brillante), son suelos profundos con tonalidades rojizas o pardas rojizas muy brillantes, producto de la meteorización de rocas intermedias presentan una capa superficial muy delgada de color oscuro, donde la parte orgánica está bien mezclada con la parte mineral y un horizonte subsuperficial constituido de arcilla.



Figura B.21. Nitosol en Uxmal, Yucatán. (INEGI, 2004).

Se encuentran en regiones cálidas con vegetación de selva, principalmente en los Cansos de Yucatán y Campeche, y las costas de Nayarit. Son destinados al cultivo de tabaco y la cría de ganado bovino, pero su uso óptimo es el forestal siendo moderadamente susceptibles a la erosión.

Phaeozem [PH]



Figura B.22. Phaeozem en La Celayita, Polotitlán, Estado de México. (Xix, 2010).

Phaeozem (del griego *phaios*, oscuro y ruso *zemlja*, tierra), presentan una capa superficial de color oscuro rica en materia orgánica (humus); formados primordialmente por materiales no consolidados de origen eólico.

Es uno de los suelos dominantes en nuestro país abarcando el 11.7 % de la superficie, son encontrados en climas cálidos como la Sierra Madre Occidental; la Sierra de Tamaulipas; en las llanuras de la Mesa del Centro, específicamente en las partes bajas de la Sierra de Guanajuato y Sierra del norte de Zacatecas; las mesetas y lomeríos basálticos en el Eje Neovolcánico, particularmente en la región de Guadalajara, Querétaro e Hidalgo donde se desarrolla vegetación natural de pastos altos o bosques.

Son típicamente usados en la agricultura de temporal de granos como soya, trigo y cebada. Dos peligros importantes que atacan a este tipo de suelos son la erosión hídrica y eólica.

Planosol [PL]

Planosol (del latín *planus*, plano), son suelos medianamente profundos que se localizan en relieves planos, los cuales en alguna época del año son afectados por el fenómeno inundación. Se estructuran de un horizonte superficial, altamente erosivo, que muestra signos de estancamiento de agua, seguido de una capa infértil de color claro con menor contenido de arcilla que las capas suprayacentes y subyacentes; el subsuelo es impermeable con alto contenido de arcilla, roca o tepetate.

En México se desarrollan en climas templados y semiáridos, frecuentemente se encuentran en los Altos de Jalisco, llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, los valles zacatecanos y las planicies tarahumaras donde, la vegetación natural es de pastizal o matorral. Son utilizados en el centro norte de nuestro país para la ganadería de bovinos, ovinos y caprinos.



Figura B.23. Planosol en el Valle de Guadalupe, Jalisco. (Balbontin, et al., 2007).

Plintosol [PT]



Figura B.24. Plintosol en Las Choapas, Veracruz. (Balbontin, et al., 2007).

Plintosol, (del griego *plinthos*, ladrillo), describen a suelos compuestos principalmente de plintita con una capa subsuperficial rojiza rica en hierro (originado por el material parental y por la percolación de agua) y poco contenido de materia orgánica, con un horizonte endurecido por el mojado y secado del material.

Están asociados con relieves suavemente inclinados o planos donde el nivel freático es somero y a un clima lluvioso con vegetación de selva; tienen muy poca presencia en el país encontrándose en la costa de Veracruz y el estado de Chiapas.

Podzol [PZ]

Podzol (del ruso *pod*, por debajo y *zola*, ceniza), suelo que presenta una capa superficial generalmente gris decolorada por la percolación debida al agua de materia orgánica y óxidos de hierro, estos lixiviados dan origen a la capa subsuperficial de color oscuro. Se forman a partir de la meteorización de rocas silíceas como depósitos aluviales y eólicos de arenas cuarcíticas. Favorecidos por los climas húmedos templados y relieves llanos; se han encontrado indicios de su presencia en los bosques mesófilos de la Sierra Norte de Oaxaca, a pesar de esto se tienen pocos datos sobre su localización.



Figura B.25. Podzol en Irlanda. (ISRIC 2013).

Regosol [RG]



Figura B.26. Regosol en Chimaltitán, Jalisco. (INEGI, 2004).

Regosol (del griego *rhegos*, manta), son suelos someros, jóvenes y muy poco desarrollados, en consecuencia no presentan capas diferentes en su perfil; se caracterizan por un color claro y bajo contenido de materia orgánica, generalmente son muy parecidos a su material parental.

Abarcan el 13.7 % del territorio siendo el segundo grupo de suelo más importante en el país, se localizan en diversos climas así como en todos los estados principalmente en la Península de Baja California, en el desierto del Vizcaino y la Sierra de la Giganta en Baja California Sur; la Sierra Madre Occidental y del Sur, en el bosque templado de Jalisco y la selva húmeda de Oaxaca; la selva subhúmeda de Sonora; el bosque templado de Chihuahua y Durango; la llanura costera del estado de Nayarit y los pantanos tabasqueños. Son utilizados en la agricultura de coco, sandía y granos con buenos rendimientos.

Solonchak [SC]

Solonchak (del ruso *sol*, sal), son suelos que presentan dentro de los primeros 50 cm de profundidad un alto contenido de sales.

Los podemos encontrar en las regiones áridas y semiáridas del país como las llanuras costeras salinas asociadas con ciénegas, deltas, playas y barras; al igual que en vasos lacustres y llanuras desérticas, ejemplo de estas son la Laguna de Mayrán en Coahuila y la llanura costera del estado de Nayarit donde se desarrolla vegetación de pastos y hierbas halófitas (tolerantes al exceso de sal). Son escasamente utilizados en la agricultura de cultivos resistentes a sales.



Figura B.27. Solonchak en Laguna de Sayula, Jalisco. (INEGI, 2004).

Solonetz [SN]

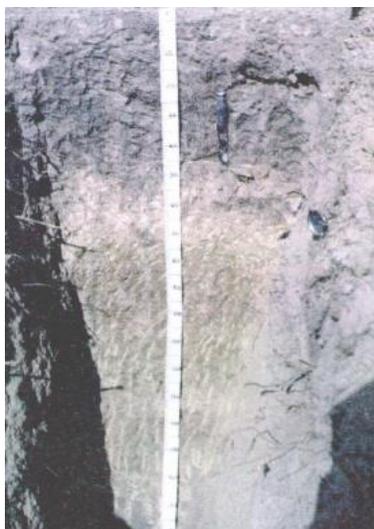


Figura B.28. Solonetz en Tanquecillos, Nuevo León. (INEGI, 2004).

Solonetz (del ruso *sol*, sal), tienen una capa subsuperficial densa caracterizada por un incremento de arcilla asociado a un elevado contenido de sodio y magnesio dando un color negro o pardo al perfil.

Se presentan en regiones semiáridas templadas donde se acumulan sales, particularmente álcali de sodio; en ellos se desarrolla una vegetación natural escasa de tipo matorral y pastizal. Se han localizado principalmente en los estados de Chihuahua y Coahuila, sin embargo no son utilizados en la agricultura debido a que su recuperación es difícil y costosa.

Stagnosol [ST]

Stagnosol (del latín *stagnare*, inundar), son suelos afectados por una capa de agua a causa de intensas precipitaciones, este encharcamiento superficial se origina debido a su material parental poco permeable que impide la infiltración. El perfil se caracteriza por una capa superficial notoriamente decolorada y un horizonte subsuperficial moteado. Este tipo de suelo se forma por la meteorización de materiales francos eólicos, aluviales y coluviales.

Son favorecidos por climas templados a subtropicales húmedos, en México no se tienen datos de su ubicación.



Figura B.29. Stagnosol en República Checa. (Ibañez y Manríquez, 2011).

Tecnosol [TC]

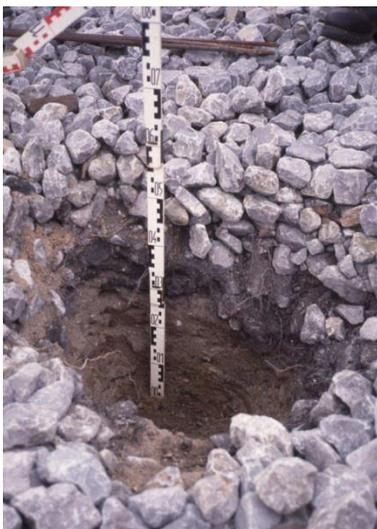


Figura B.30. Tecnosol en medio urbano. (Ibañez, 2012b).

Tecnosol (del griego *technikos*, hábilmente hecho), son suelos influenciados por el ser humano en los que es posible encontrar materiales de origen antrópico tales como geomembranas o roca dura técnica que de otra manera no existirían en la superficie terrestre, aun así es posible que el perfil de origen aun este presente.

Se crean mayormente en áreas urbanas e industriales de pequeño tamaño donde están asociados a otros grupos de suelo.

Umbrisol [UM]

Umbrisol (del latín *umbra*, sombra), estos suelos presentan un horizonte superficial suave de color oscuro, rico en materia orgánica formado a causa de la meteorización de rocas silíceas.

Se desarrollan en climas tropicales y subtropicales, en el territorio nacional han sido encontrados en el bosque templado de Chihuahua y Durango.



Figura B.31. Umbrisol en Borbollones, Durango. (Balbontin, et al., 2007).

Vertisol [VR]



Figura B.32. Vertisol en Villa Montemorelos, Durango. (Balbontin, et al., 2007).

Vertisol (del latín *vertere*, dar vuelta), tienen una estructura masiva en la que más del 30 % de su perfil está constituido por arcillas pesadas mezcladas con arcillas expansibles de alta capacidad para retener humedad; la expansión y contracción de las arcillas expansibles forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo en época de sequía. Su capa superficial presenta buen contenido de carbono orgánico, comúnmente son de color negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y en el norte del país de color café rojizo.

Ocupan el 8.60 % del territorio nacional, siendo el sexto grupo de suelos dominantes en el país; se ven favorecidos por climas templados, cálidos y semiáridos como los presentados en las llanuras fértiles de las costas de México, en particular al norte de Veracruz, Tamaulipas, Sonora y Sinaloa, también son encontrados con frecuencia en Jalisco, el Bajío Guanajuatense y Michoacano, así como en el Carso de Campeche y parte de las llanuras tabasqueñas, donde se desarrolla vegetación del tipo selvas bajas, pastizales naturales e inducidos y matorrales. Su uso principal es en las zonas agrícolas de riego de variados cultivos, entre ellos caña, cereales, hortalizas y algodón; siendo de alta productividad gracias a su fertilidad y baja susceptibilidad a la erosión.

ANEXO C

C.1 Tipos de vegetación de acuerdo con la Carta de Uso del Suelo y Vegetación Serie V escala 1: 250 000 elaborada por el INEGI

Bosque de Coníferas [MJ]

Junto con el Bosque de Encino [BQ] pertenecen al grupo de Bosque Templado. Dominan los árboles perennifolios del grupo de las coníferas, principalmente pinos (*Pinus*), oyameles (*Abies*), pinabetes (*Pseudotsuga*), enebros (*Juniperus*) y cedros (*Cupressus*).

Es favorecido por los climas templados y fríos de las partes altas de las cordilleras, encontrándose en el 8.6 % de la superficie del país, en los extremos norte y sur de Baja California, a lo largo de la Sierra Madre Occidental, del Eje Volcánico Transversal, de la Sierra Madre del Sur, de las sierras del norte de Oaxaca, de las dos grandes sierras de Chiapas, la Sierra Madre Oriental y la sierra de Tamaulipas.



Figura C.1. Bosque de coníferas de la sierra de San Pedro Mártir, Baja California. (SEMARNAT, 2010).

Bosque de Encino [BQ]



Figura C.2. Bosque de encino Los Picachos, Guanajuato. (SEMARNAT, 2010).

Esta formación vegetal está constituida por árboles de hoja ancha como encinos o robles del género *Quercus* que alcanzan los 30 m de altura.

Se desarrollan en los climas templados de las montañas y en regiones cálidas; se extienden de manera similar a los bosques de coníferas, aunque en menor superficie (8 %), localizándose en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, el Eje Volcánico Transversal, la Sierra Madre del Sur, las sierras del norte de Oaxaca, las sierras de Chiapas y Baja California y las llanuras costeras del Golfo de México y del Atlántico.

Debido a la fertilidad de sus suelos son empleados para la extracción de madera, lo que deriva en la degradación de la cuenca y, en ocasiones, el cambio de uso de suelo hacia actividades agropecuarias.

Bosque Mesófilo de Montaña [BM]

Está formado por una cubierta de vegetación densa constituida por árboles de las especies *Liquidambar*, *Magnolia*, Nogales (*Juglans*), *Ostrya*, *Clethra*, *Podocarpus*, *Turpinia*, *Oreopanax*, pinos y encinos; gran cantidad de helechos y lianas, así como plantas epífitas (crecen sobre los árboles); una cantidad importante de la flora del bosque mesófilo en México es endémica.

Se localiza entre los 600 y 3200 msnm, en regiones con condiciones favorables de humedad y neblina en la mayor parte del año, es encontrado en el 1 % del país a lo largo de la Sierra Madre Oriental desde el suroeste de Tamaulipas hasta el norte de Oaxaca, pasando por San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla y Veracruz; en Chiapas se desenvuelve en la vertiente septentrional del Macizo Central y en ambos declives de la Sierra Madre; por el Pacífico se encuentra en menor superficie en Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán, en la Sierra Madre del Sur de Guerrero, al sur del Estado de México y en el norte de Morelos.

Este ecosistema ha sido afectado por cambios de uso de suelo hacia actividades agropecuarias como agricultura de café y explotación de ganado vacuno.

Selva Perennifolia [SP]

Forma parte de la selva húmeda, su vegetación está conformada por árboles de diferentes especies cuyas copas rebasan los 40 metros de altura y es clasificada como perennifolia debido a que más del 75 % de ellos conservan sus hojas todo el año.



Figura C.3. Bosque mesófilo de montaña en el Nevado de Colima, Jalisco. (SEMARNAT, 2010).



Figura C.4. Selva Perennifolia en el Parque Ecológico Jaguarundi, Coatzacoalcos, Veracruz. (SEMARNAT, 2010).

Se ubica en los climas lluviosos y cálidos de nuestro país cubriendo la mayor parte de Campeche y Quintana Roo, en menor proporción en el sureste de San Luis Potosí y Yucatán, y en los estados de Veracruz, Nayarit, Guerrero, Tabasco, Hidalgo, Puebla y la Sierra Madre del Sur de Oaxaca y la Sierra Madre de Chiapas ocupando un total del 4.7% de la superficie nacional.

Dentro de estas selvas es común la explotación de especies de alto valor comercial como la caoba (*Swietenia*) o el cedro rojo (*Cedrella*), así como de varios productos forestales no maderables. Gran parte de ellas han sufrido cambios a un uso de suelo agropecuario.

Selva Caducifolia [SC]

La Selva Subhúmeda agrupa a las Selvas Caducifolia [SC] y Subcaducifolia [SM], donde dominan árboles de diferentes especies de hoja caduca, en algunos casos su dosel llega hasta los 30 metros de altura. Se desarrollan en ambientes cálidos con diferencias muy marcadas entre las temporadas de lluvia y estiaje; la condición de caducifolia se atribuye a que más del 75 % de las especies vegetales pierden sus hojas en la época seca.

Esta selva se extiende en el 8.6 % de nuestro país; es característica del pacífico mexicano, se encuentra en la parte inferior de Baja California Sur, entre las sierras de la Laguna y la Giganta; se extiende desde el sur de Sonora y Chihuahua hasta Chiapas donde ocupa gran parte de la depresión Central. Puntualmente se localiza en el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí, el extremo noreste de Querétaro, el norte y centro de Veracruz; y en el sureste ocupa la mayor parte del estado de Yucatán y una porción de Campeche. Este ecosistema es uno de los más degradados mundialmente, ya que es ampliamente utilizado en la agricultura nómada y ganadería extensiva.



Figura C.5. Selva caducifolia en el municipio de Los Reyes, Michoacán. (SEMARNAT, 2010).

Selva Subcaducifolia [SM]



Figura C.6. Selva subcaducifolia, Campeche. (INEGI, 2009b).

Se desarrolla en las mismas condiciones climáticas que la Selva Caducifolia, la diferencia principal es que entre el 50 y 75 % de la vegetación que compone la Selva Subcaducifolia pierde sus hojas en la época de estiaje.

Se presenta en el 2.3 % de la superficie nacional en porciones aisladas desde el centro de Sinaloa hasta la zona costera de Chiapas; del lado del Golfo de México en Veracruz y el sureste de Tamaulipas; mientras que en la península de Yucatán ocupa una extensa área.

Matorral xerófilo [MKX]

Como su nombre lo indica (del griego xero, seco) este tipo de vegetación es característico de las zonas áridas y semiáridas del país; en él se encuentran arbustos microfilos (de hoja pequeña) y espinosos entre los que destacan matorrales rosetófilos, *sarcocaulas* y *cactáceas (crasicaules)*. Las especies que constituyen esta vegetación son en su mayoría endémicas.

Es el tipo de vegetación predominante, abarcando el 29.6% de la superficie total, se ubica en la península de Baja California, la planicie costera y de las montañas bajas de Sonora, Tamaulipas y Oaxaca; en la Altiplanicie mexicana está presente en los estados de Chihuahua, Coahuila, San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo, Estado de México y Puebla. Debido al déficit hídrico habitual por el tipo de clima, su uso en la agricultura es escaso, contrariamente la ganadería es ampliamente utilizada ocasionando la degradación del ecosistema a causa del sobrepastoreo.

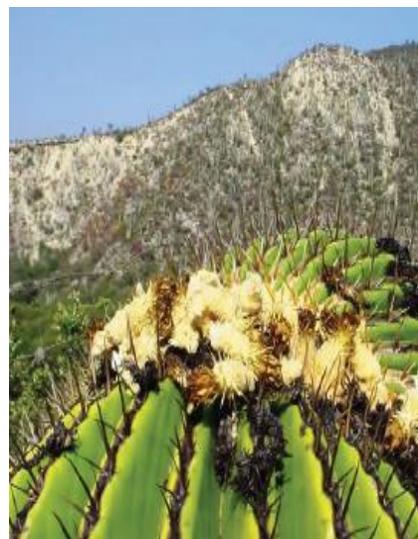


Figura C.7. Matorral xerófilo en Metztitlán, Hidalgo. (SEMARNAT, 2010).

Selva espinosa [SK]



Figura C.8. Selva espinosa en Yucatán. (SEMARNAT, 2010).

Está constituida por especies leguminosas y arboles espinosos tales como ébano, cascalote, brasil y mezquite, que son altamente apreciados en ebanistería y en la elaboración de carbón. Se localiza en el 1 % del territorio principalmente en las zonas áridas del país; por el Pacífico desde Sonora hasta el sur de Sinaloa; por el Golfo de México en el estado de Tamaulipas; también es encontrada en Yucatán, Campeche y Quintana Roo.

Pastizal natural [PN]

En este sistema natural dominan las comunidades vegetales gramíneas (pastos o zacates) o graminoides que a su vez están acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias.

Abarca el 6.2 % del territorio nacional desarrollándose en cualquier clima, aunque principalmente se encuentran en las regiones semiáridas del país y por arriba de los 4 000



Figura C.9. Pastizal natural en Valle Colombia, Coahuila. (SEMARNAT, 2010).

msnm, esto es en las partes más altas de las montañas. Existen en mayor superficie desde el noroeste de Chihuahua hasta el noroeste de Jalisco sobre la base de la Sierra Madre Occidental, y en el suroeste de Campeche desde donde se extienden a Tabasco y Chiapas. En menor área se observan en el Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo y Querétaro; así como en las partes más altas del Pico de Orizaba y la vecina Sierra Negra, el Popocatepetl, el Ixtaccíhuatl, la Malinche, el Nevado de Toluca, el Nevado de Colima, el Tacaná, el Cofre de Perote, el Tancítaro, el Ajusco y el Tláloc.

Este ecosistema es intensamente utilizado en actividades pecuarias, lo que ha provocado su degradación y cambio a vegetación secundaria.

Vegetación hidrófila

Está formada por vegetación apta para habitar en suelos pantanosos e inundables de aguas salobres o dulces de poca profundidad, se presentan en climas húmedos y secos, a altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 4000 msnm; abarcando el 1.3 % del país. Incluye Bosque de Galería [BG], Manglar [VM], Popal [VA], Tular [VT], Selva de Galería [SG], Vegetación de Galería [VG], Vegetación Halófila Hidrófila [VHH] y Vegetación de Petén [VP]. Los tipos principales son:



Figura C.10. Manglares en la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Quintana Roo. (SEMARNAT, 2010).

Manglar [VM]: Predominan las especies de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle salado o negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*); se caracterizan por tener una altura que va de 3 a 5 metros y sus raíces en forma de zancos. Se desarrollan en las planicies costeras cerca de las desembocaduras de ríos y arroyos o alrededor de esteros y lagunas, constituyendo la transición entre los ecosistemas terrestres y

marinos. Se encuentran en las costas del Océano Pacífico, Golfo de México y el Mar Caribe, aportando importantes servicios ambientales como el control de las inundaciones, la estabilización de la línea costera, el control de la erosión, la retención de sedimentos y sustancias tóxicas y contribuye en gran medida a la formación de suelo.

Popal [VA]: Conformado por herbáceas de hojas grandes y anchas que crean una cubierta densa, es utilizado en ganadería y piscicultura. Se localizan desde el sur de Chiapas hasta Baja California, así como en el Golfo de México desde Quintana Roo hasta Tamaulipas.



Figura C.11. Popal en Veracruz. (Unidad de comunicación social, 2009).



Figura C.12. Tular en Campeche. (SEMARNAT, 2010).

Tular [VT]: Esta constituido principalmente por vegetación de tule, encontrándose mayormente en Tabasco, Campeche y Quintana Roo; y en menor superficie en Veracruz, Chiapas, Guerrero, Nayarit y Sinaloa.

Vegetación inducida

Esta vegetación surge cuando la vegetación primaria ha sido eliminada, se constituye de especies que han sido introducidas por actividades antropogénicas (dada su importancia económica o con fines de reforestación) o a causa de circunstancias naturales que contribuyeron a su desarrollo, tales como incendios. Este tipo engloba a las comunidades de Bosque Inducido [BI], Pastizal Inducido [PI], Palmar Inducido [VPI] y Vegetación Sabanoide [VSI] que ocupan el 3.2 % de la superficie total. Los principales se describen a continuación:

Palmar inducido [VPI]: Abunda la vegetación monopódica mejor conocida como palmas; son resultado de la perturbación de las selvas en las zonas tropicales del país, siendo observadas principalmente en el noreste de Guerrero, noroeste de Oaxaca y en menor extensión en el sur de Puebla, Veracruz, Chiapas, Campeche, Yucatán, San Luis Potosí, Coahuila y Baja California Sur.



Figura C.13. Palmar inducido en Oaxaca. (INEGI, 2009b).



Pastizal inducido [PI]: Es posible que en algún momento formaran parte de bosques o matorrales y a consecuencia del desmonte de la vegetación, el pastoreo intenso y los incendios periódicos fueron alterados y se mantienen en forma de pastizal.

Figura C.14. Pastizal inducido en zona plana del camino a Corral de Piedra en el municipio de Temascaltepec, Estado de México. (SEMARNAT, 2010).

Vegetación sabanoide [VSI]: En su cubierta vegetal abundan las especies de gramíneas y ciperáceas con vegetación arbórea dispersa, se extienden en regiones de drenaje deficiente y nivel freático superficial, lo que provoca su inundación en la época de lluvias. Le favorecen los climas cálido húmedo, subhúmedo y semiseco, ubicándose en el istmo de Tehuantepec en Oaxaca y los estados de Tabasco y Chiapas.



Figura C.15. Vegetación sabanoide en Oaxaca. (INEGI, 2009b).

Otros tipos de vegetación

Comprende a las comunidades vegetales diferentes de las típicas (bosques, selvas, matorrales y pastizales) en su origen, características ecológicas, espaciales y fisonómicas; consiguientemente son de escasa extensión en el territorio nacional, ocupando el 0.3 % de este. Está clasificación refiere a los ecosistemas de Dunas Costeras [VU], Bosque de Mezquite [MK] y Palmar [VP].

Bosque de mezquite [MKJ]: Dominada principalmente por mezquites (*Prosopis spp.*), se desarrollan como arbustos combinados con especies como los huizaches en zonas áridas mientras que en condiciones húmedas crecen como arboles espinosos que pueden alcanzar los 10 metros de altura. Se extienden principalmente en, Baja California Sur, Sonora, Tamaulipas y Jalisco.

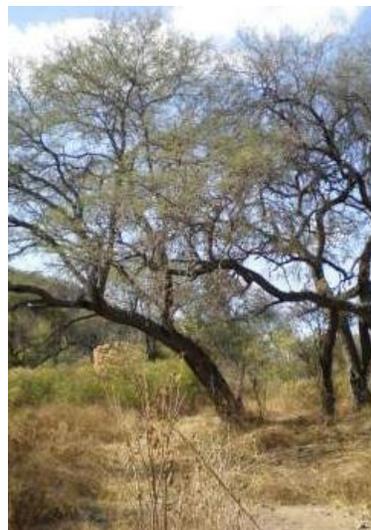


Figura C.16. Bosque de mezquite en Colotlán, Jalisco. (SEMARNAT, 2010).



Figura C.17. Dunas costeras en Huatulco, Oaxaca. (SEMARNAT, 2010).

Dunas costeras [VU]: Se establece a lo largo de las costas del país sobre los bancos de arena, formado de plantas pequeñas, rastreras y suculentas como el nopal (*Opuntia dillenii*), riñonina (*Ipomoea pescaprae*), alfombrilla (*Abronia maritima*), (*Croton sp.*), verdolaga (*Sesuvium portulacastrum*), uvero (*Coccoloba uvifera*), pepe (*Chrysobalanos icacos*), cruceto (*Randia sp.*), espino blanco (*Acacia sp. haerocephala*), mezquite (*Prosopis juliflora*), zacate salado (*Distichlis spicata*), zacate (*Sporobolus sp.*) entre otras. Su uso principal es el pecuario de bovinos y caprinos.

Palmar [VP]: Esta vegetación está formada por plantas de la familia Arecaceae (Palmar), entre las que destacan la palmita (*Brahea dulcis*), palma real (*Sabal pumos*) y palma (*Erythea spp.*). Se desarrollan en climas cálidos húmedos y subhúmedos de regiones donde el nivel freático es somero y por lo tanto, con frecuencia se encuentran anegados. En ocasiones forman parte de selvas o son el resultado de alteraciones antropogénicas. Se localizan en pequeñas porciones en los estados de Baja California, Nayarit, Jalisco, la frontera entre San Luis Potosí y Tamaulipas, Campeche y el sur de Quintana Roo.

Generalmente son utilizados como zonas ganaderas, donde se cultivan o se inducen pastos.



Figura C.18. Palmar natural en Veracruz. (INEGI, 2009b).

Áreas sin vegetación aparente

Se denomina así a los eriales, depósitos de litoral, jales, dunas, bancos de ríos y bancos de materiales en los que no existe vegetación o debido a su escasa presencia y tamaño no es apreciable y por ende no se considera bajo ninguno de los conceptos antes mencionados. Estas áreas cubren el 0.5 % del país y se concentran en los estados de Coahuila, Chihuahua, Sonora y la península de Baja California.



Figura C.19. Dunas de Bilbao, Coahuila. (INEGI, 2009b).

Agrícola, Pecuario y Forestal (Agroecosistemas)

Conjunta los ecosistemas naturales cuya cubierta vegetal original ha sido modificada por el hombre para su manejo y explotación; involucrando a la agricultura y la ganadería con el fin de obtener bienes, servicios y productos de consumo humano. Para el año 2007, estos ecosistemas cubrían poco más de 45 millones de ha, el 23.2 % de la superficie nacional (SEMARNAT, 2010), Figura C.20. En este gran grupo se incluyen las actividades Agrícola, Pecuaria, Forestal y Acuícola.



Figura C.20. Agroecosistemas. (SEMARNAT, 2010).

Agrícola

Áreas en las que el suelo es utilizado para la producción de cultivos, con la finalidad de obtener alimentos y materias primas agroindustriales (forrajes, ornamental) necesarios para el desarrollo de las actividades antropogénicas. Incluye: Agricultura de riego, Agricultura de temporal, Agricultura de humedad, Agricultura nómada, Bosque Cultivado (BC) y Pastizal Cultivado (PC). Las principales actividades se describen a continuación:

Agricultura de humedad: En esta práctica los terrenos se cultivan antes o después de la temporada de lluvias, ya que consiste en aprovechar la humedad del suelo para el beneficio de los cultivos. Se realiza en zonas inundables (lechos de los embalses) o de materiales amorfos que retienen agua y aun en periodos de sequía presentan humedad o en los cuales resistan cultivos de invierno (después de la temporada de lluvias).

Su uso se extiende en el centro del país, y los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, México y Veracruz.

Agricultura de Riego: Consta de aplicar agua complementaria a un cultivo para su desarrollo durante el ciclo vegetativo a través de técnicas como: aspersión, goteo, agua rodada (distribución del agua a través de surcos, melgas o bien tubería a partir de un canal principal y que se distribuye directamente a la planta), por bombeo desde la fuente de suministro o por gravedad cuando va directamente a un canal principal desde aguas arriba de una presa o un cuerpo de agua natural, siendo este último el más utilizado en nuestro país debido a la sencillez de su operación.

Al no depender de la temporada de lluvias, la duración del ciclo vegetativo del cultivo puede ser de meses, años o décadas. Este tipo de agricultura es utilizado en buena parte del territorio nacional, principalmente en la zona norte del país, planicie costera del estado de Sinaloa, así como en el Altiplano Mexicano hasta las estribaciones del Sistema Volcánico Transversal.

Agricultura de Temporal: Es la agricultura en donde el ciclo vegetativo de los cultivos depende de la precipitación y la capacidad del suelo para retener agua.



Figura C.21. Maíz. Agricultura de temporal en Sinaloa. (INEGI, 2009b).

Un terreno es considerado de temporal si su superficie permanece sembrada al menos un 80 % del ciclo agrícola, pueden ser áreas de monocultivo, policultivo o estar combinadas con pastizales o zonas de riego. Esta práctica predomina en los estados de Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Jalisco, Zacatecas, Michoacán, Chiapas, Chihuahua y Puebla.

Bosque Cultivado [BC]: Se establece en áreas que han sido afectadas por las actividades antropogénicas mediante la reforestación con árboles de especies como: pino (*Pinus* spp.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), cedro (*Cupressus* spp.), casuarina (*Casuarina* sp.), pirul (*Schinus molle*), álamo o chopo (*Populus* spp.), fresno (*Fraxinus* sp.) y aïle (*Alnus* sp.); dependiendo de las condiciones climáticas. Son considerados bosques artificiales con fines



Figura C.22. Bosque cultivado en el Estado de México. (INEGI, 2009b).

recreativos, ornamentales, forestales, de conservación del medio ambiente, así como para evitar la erosión del suelo. Se encuentra en pequeñas superficies en el Sistema Volcánico Transversal, el sur de la Llanura Costera del Golfo y el estado de Campeche.

Pastizal cultivado [PC]: Son pastos nativos como: Zacate Pangola (*Digitaria decumbens*), Zacate Buffel (*Pennisetum ciliaris*), Zacate Guinea o Privilegio (*Panicum maximum*), Zacate Pará (*Panicum purpurascens*), entre otros; que se introducen intencionalmente en una región.

En zonas tropicales forman potreros, generalmente con buenos coeficientes de agostadero (producción de forraje). Dentro del territorio nacional se encuentran a lo largo de la llanura costera del Golfo de México, el oeste de Campeche, Quintana Roo, norte de Yucatán, Sonora y en una faja dispersa y angosta desde el sur de Sinaloa hasta Chiapas.



Figura C.23. Pastizal cultivado en Yucatán. (INEGI, 2009b).

Pecuaria

Comprende las áreas donde se realiza la explotación ganadera de manera intensiva o extensiva para la obtención de productos de consumo básico como carne, leche, huevo, entre otros. Engloba los tipos de ganado bovino, caprino, equino y ovino.



Figura C.24. Actividad Pecuaria. Ganado bovino charolais y criollo en la Presa San Blas, Aguascalientes. (INEGI, 2012).

Forestal



Se define forestal al área en la que se explotan distintas especies forestales cultivadas con fines comerciales, conservación-reforestación, forestación y recreativos; las actividades que se consideran son: corte de madera, leña y rizomas; extracción de taninos, resinas, látex, fibras y ceras; recolección de frutos, hojas y semillas.

Figura C.25. Plantación de chicle en Chontalpa, Veracruz. (INEGI, 2012).

Acuícola

Son áreas destinadas al cultivo de peces, reptiles, anfibios, crustáceos, moluscos plantas y algas con el objeto de ser utilizados para alimento o con fines de recreación, estudio, obtención de productos o para su conservación y protección. Estas áreas implican la construcción de embalses artificiales, sistemas hidráulicos e instalaciones de procesamiento como piscifactorías (instalaciones para la producción de crías o de engorda de peces en estanques, jaulas o canales de corriente rápida) y granjas acuícolas (instalaciones dedicadas a la producción de crustáceos como el camarón).

Esta actividad se localiza en una franja dispersa desde el sur de Sonora hasta Sinaloa, en áreas muy pequeñas en el noreste y sur de la Península de Baja California y en los estados de Tamaulipas, Campeche y Yucatán.

ANEXO D

D.1 Obras para el control de la erosión hídrica laminar

Terrazas de muro vivo



Figura D.1. Terrazas de muro vivo. (Cardoza, et al., 2007).

Las terrazas de muro vivo, Figura D.1, se forman al colocar conjuntos de árboles o arbustos siguiendo las curvas a nivel, los cuales tienen la función de retener el suelo que se desprende a partir de las labores de cultivo.

Su cometido es aminorar la erosión hídrica controlando la velocidad de los escurrimientos superficiales, dirigiendo estos hacia una salida controlada; en consecuencia se disminuye el contenido de sedimentos en el agua favoreciendo la infiltración y aporte de materia orgánica al suelo. Así mismo se disminuye la pendiente y se impide la formación de cárcavas mejorando el paisaje. El ámbito de producción se mejora al generarse productos adicionales como leña o forraje.

Terrazas de formación sucesiva

Las terrazas de formación sucesiva, Figura D.2, se originan con la construcción de un bordo, el cual aguas abajo tiene un canal de desagüe, Figura D.3.



Figura D.2. Terraza de formación sucesiva o paulatina. (Cardoza, et al., 2007).

Estos bordos tienen como función detener el suelo proveniente del área entre terrazas, con el fin de interceptar los escurrimientos superficiales para controlar la erosión laminar, además favorecen la retención de humedad y el desarrollo de especies forestales y vegetación natural.



Figura D.3. Bordo para terrazas sucesivas. (Cardoza, et al., 2007).

Terrazas individuales



Figura D.4. Terraza individual. (Cardoza, et al., 2007).

Las terrazas individuales, Figura D.4, son terraplenes circulares de aproximadamente un metro de diámetro, en su parte central se planta una especie forestal ya que la retención de humedad en la terraza favorece su desarrollo y supervivencia.

Tienen la capacidad de actuar como círculos de captación de agua pluvial y suelo de los escurrimientos permitiendo el control de la erosión. Se recomienda su uso en suelos con profundidades mayores a 30 cm.

Barreras de piedra en curvas a nivel

Las barreras de piedra, Figura D.5, se construyen en sección cuadrangular de 30 cm colocando linealmente un grupo de rocas sobre las curvas a nivel.

Al ser perpendiculares a la pendiente del terreno reducen la velocidad de los escurrimientos superficiales disminuyendo así la erosión hídrica, retienen los sedimentos mejorando la calidad del agua y se aumenta la infiltración.

Este tipo de prácticas son usuales en terrenos que han sido afectados por la erosión laminar a causa de la escasa cubierta vegetal y la pendiente.



Figura D.5. Barrera de piedra en curva a nivel. (Cardoza, et al., 2007).

Zanja Trinchera



Figura D.6. Zanja trinchera. (Cardoza, et al., 2007).

También conocidas como zanjas ciegas, Figura D.6, son excavaciones de 0.4 m de ancho x 0.4 m de profundidad y 2 m de longitud, trazadas sobre curvas de nivel a <<tres bolillo>> y separadas con un tabique divisor de 2 m de largo.

Dentro de las zanjas se captan los escurrimientos superficiales, esto permite controlar su volumen y velocidad, propiciar la infiltración, conservar la humedad, retener azolves y en consecuencia reducir la erosión hídrica. Para que estas obras sean eficientes es necesario captar el 50 % de los escurrimientos para un periodo de retorno de cinco años.

Zanja bordo



Figura D.7. Zanja bordo. (Cardoza, et al., 2007).

Son un conjunto de zanjas trazadas sobre una curva a nivel, donde el volumen de excavación es utilizado aguas abajo para formar un bordo, Figura D.7.

Tienen como objetivo disminuir la erosión hídrica favoreciendo el desarrollo de especies forestales que retengan la humedad, propicien la infiltración y disminuyan la velocidad de los escurrimientos.

Zanjas derivadora de escorrentía

Las zanjas derivadoras de escorrentía, Figura D.8, cuentan con una sección lo suficientemente amplia que permite captar el agua de lluvia y escurrimientos con el fin de conducirla, a velocidades no erosivas, a un cuerpo de agua donde no provoque daños, esta característica es de gran utilidad en el control de la erosión hídrica. Dichas obras son

ampliamente utilizadas en la protección de caminos en zonas donde los suelos son poco permeables o las lluvias muy intensas.



Figura D.8. Zanja derivadora de escorrentía. (Cardoza, et al., 2007).

Bordos en curvas a nivel



Figura D.9. Bordos en curvas a nivel. (Cardoza, et al., 2007).

Los bordos en curvas a nivel, Figura D.9, son trazados de manera perpendicular a la pendiente del terreno propiciando la retención de azolves y escurrimientos, esto permite mejorar las condiciones del suelo aumentando la humedad aprovechable que favorece el crecimiento de vegetación nativa y especies forestales plantadas, Figura D.10, por esta razón su uso predomina en zonas áridas o semiáridas con deficiencia de humedad en el suelo.



Figura D.10. Bordo en curva a nivel almacenando agua pluvial. (Cardoza, et al., 2007).



Figura D.11. Roturación de un terreno con roca caliza. (Cardoza, et al.).

Roturación

La roturación de un terreno, Figura D.11, es necesaria cuando este ha sido afectado por erosión hídrica laminar dejando expuestas al intemperismo las capas de material parental superficial o subsuperficial del suelo; al fragmentar dichas capas se logra disminuir los escurrimientos superficiales aumentando la infiltración y humedad para dar paso al desarrollo de plantaciones forestales y vegetación natural que a largo plazo coadyuvarán al control de la erosión.

Cortinas rompevientos



Figura D.12. Cortinas rompevientos. (Cardoza, et al., 2007).

Las cortinas rompevientos, Figura D.12, son una barrera formada por árboles y arbustos, Figura D.13, colocados perpendicularmente a la dirección del viento, variable en la que es basado su diseño ya que tienen como función principal reducir la velocidad del viento para proteger los cultivos y disminuir la pérdida de suelo ocasionado por la erosión eólica, Figura D.14.

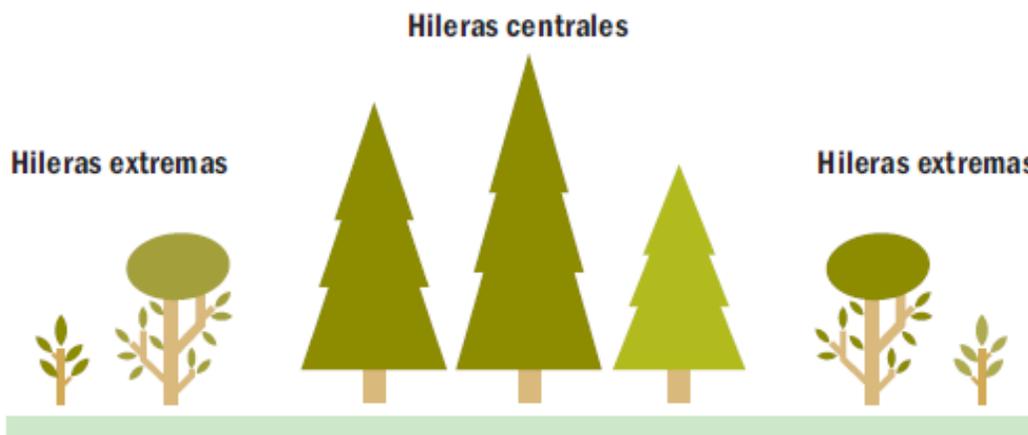


Figura D.13. Formación transversal de una cortina rompevientos. (Cardoza, et al., 2007).

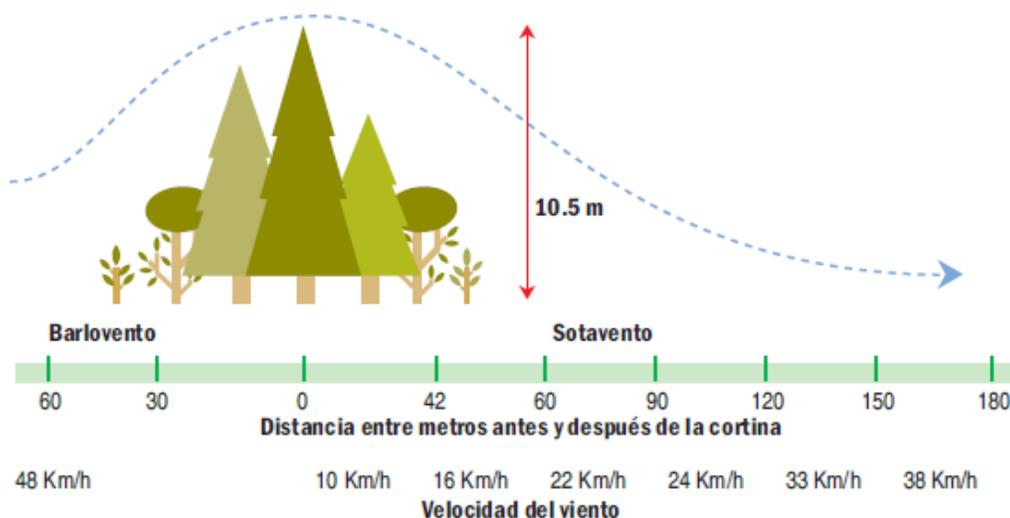


Figura D.14. Comportamiento del viento en una cortina vegetal. (Cardoza, et al., 2007).

Enriquecimiento de acahuals

Los acahuals, Figura D.15, son zonas ociosas formadas por vegetación secundaria (hierbas, arbustos y árboles) producto de la destrucción de la vegetación original de las selvas. El enriquecimiento de acahuals es una práctica agroforestal destinada a incrementar la cubierta vegetal de estas zonas, introduciendo especies forestales maderables y no maderables para contribuir a su protección, conservación, desarrollo y en especial controlar la erosión hídrica.



Figura D.15. Acahual. (Cardoza, et al., 2007).

Sistemas agroforestales



Figura D.16. Sistema Agroforestal cedro-maíz-limón. (Cardoza, et al., 2007).

Los sistemas agroforestales, Figura D.16, son una serie de técnicas en las que se interrelacionan ecológica y económicamente la agronomía, silvicultura y zootecnia. Estas prácticas comprometen la existencia de cobertura vegetal que contribuye a interceptar los escurrimientos superficiales aumentando la infiltración y reduciendo la erosión hídrica.

Son ecosistemas integrales y sustentables gracias a que se diversifica la producción de alimentos, recursos forestales maderables y no maderables incrementando los ingresos de los productores; en los últimos años se han utilizado eficientemente como método para detener la deforestación. Los sistemas agroforestales pueden clasificarse según Cardoza, R., et al. (2007) en:

- Sistemas agrosilvopastoriles (árboles con cultivos y ganadería), Figura D.17.
- Sistemas silvopastoriles (árboles asociados con ganadería), Figura D.18.
- Sistemas agropastoriles (cultivos combinados con ganadería), Figura D.19.
- Sistemas agroforestales o agrosilvoculturales (árboles combinados con cultivos), Figura D.20.



Figura D.17. Sistema agrosilvopastoril. (Cardoza, et al., 2007).

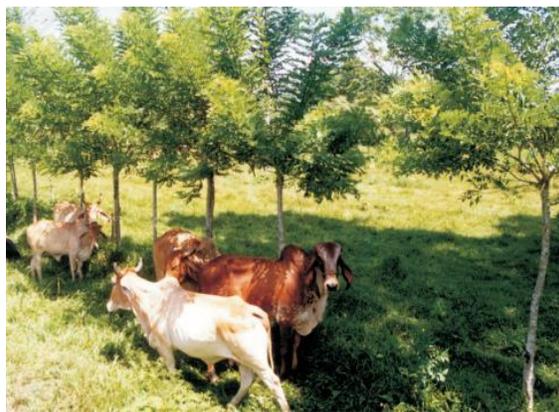


Figura D.18. Sistema silvopastoril. (Llanderal).



Figura D.19. Sistema agropastoril. (Zaragoza).



Figura D.20. Sistema agrosilvícola. (Cardoza, et al., 2007).

Acomodo de material vegetal muerto



Figura D.21. Acomodo de material vegetal muerto. (Cardoza, et al., 2007).

El material vegetal muerto que resulta del aprovechamiento forestal, podas, preaclareos, aclareos e incendios controlados se acomoda en barreras sobre las curvas a nivel, de manera perpendicular a la pendiente del terreno; esta práctica propicia la protección del suelo disminuyendo la velocidad de los escurrimientos superficiales, incrementando la infiltración de agua pluvial y la retención de azolves. La manera en la que se realiza el acomodo permite mantener el contenido de humedad en el suelo favoreciendo la cubierta vegetal y en consecuencia reduciendo la erosión hídrica.

D.2 Obras para el control de la erosión hídrica en cárcavas

Presa de malla de alambre electrosoldada o ciclónica

Es una estructura armada en sitio a base de piedra acomodada dentro de cajones fabricados con malla electrosoldada o ciclónica, Figura D.22, su diseño depende de las características de la cárcava a estabilizar, objetivo principal al que se adiciona la capacidad de retener azolves y disminuir la cantidad y velocidad de los escurrimientos con el fin de controlar la erosión hídrica.



Figura D.22. Presa de malla de alambre electrosoldada o ciclónica. (Cardoza, et al., 2007).

Presas de morillos



Figura D.23. Presa de morillos. (Cardoza, et al., 2007).

Las presas de morillos, Figura D.23, están constituidas de troncos con diámetros mayores a 10 cm., son generalmente construidas en sentido perpendicular a la dirección del flujo dentro de cárcavas pequeñas y angostas con el propósito de detener su crecimiento,

proteger obras de infraestructura y propiciar el establecimiento de cobertura vegetal al retener humedad y azolves ayudando a la disminución de la erosión hídrica en la zona.

Presas de ramas



Figura D.24. Presa de ramas. (Cardoza, et al., 2007).

Construidas con pequeñas ramas entrelazadas y unidas con acero a una hilera de estacas base, Figura D.24, son eficientes en cárcavas pequeñas donde su función es reducir la velocidad del escurrimiento para: controlar la erosión dentro de la cárcava, contribuir al establecimiento de cobertura vegetal, proteger obras de infraestructura y reducir la erosión hídrica.

Presas de piedra acomodada

Se construyen a base de piedra con peso y dureza considerable para que la obra funcione como una presa filtrante mejorando la calidad del agua, Figura D.25, además tiene la finalidad de controlar la erosión en cárcavas al retener azolves y reducir la velocidad de los escurrimientos.



Figura D.25. Presa de piedra acomodada. (Cardoza, et al., 2007).

Presas de geocostales



Figura D.26. Presa de geocostales. (Cardoza, et al., 2007).

Los geocostales son fabricados con materiales geotextiles (fibras de polipropileno), y rellenos con suelo para construir presas ubicadas de manera ortogonal a la pendiente

del terreno, Figura D.26, su material de origen permite que la presa filtre el agua de los escurrimientos reteniendo azolves y mejorando su calidad, así como el desarrollo de vegetación natural o inducida que contribuya a la estabilización de la cárcava en la que se ubica.

Presas de llantas



Figura D.27. Presa de llantas. (Cardoza, et al., 2007).

Son estructuras muy durables y económicas, ya que en su construcción se utiliza material de desecho, Figura D.27, estas presas funcionan como barrera dentro de cárcavas ayudando a estabilizarlas favoreciendo la acumulación de sedimentos para el desarrollo de especies vegetales que controlen la erosión del suelo.

Presas de mampostería

Las presas de mampostería están constituidas por piedra, arena y cemento, Figura D.28, su costo es elevado al ser estructuras permanentes, las cuales requieren un diseño elaborado que contemple el mayor tiempo de vida útil y la ubicación más adecuada de la cortina de modo que se maximice el área de captación de la obra.

El propósito principal de su construcción es la reducción de la velocidad del flujo superficial para contrarrestar la erosión hídrica; es recomendable que sean construidas al

final del control de los escurrimientos ya que las obras y prácticas realizadas aguas arriba de la cortina propiciarán la mejora en la calidad del agua, pues los sedimentos ya habrán sido retenidos, pudiendo ser aprovechada en diferentes usos.



Figura D.28. Presa de mampostería. (Cardoza, et al., 2007).

Presa de gaviones



Figura D.29. Presa de gaviones. (Cardoza, et al., 2007).

Este tipo de presa se realiza para la estabilización de cárcavas con una profundidad mayor a 1.5 m., es considerada una estructura permanente ya que su durabilidad es mayor a cinco años, Figura D.29. Consiste en una caja rectangular hecha con malla de alambre de triple torsión rellena de piedras, se coloca de manera perpendicular a los escurrimientos con el objetivo de controlarlos para evitar el crecimiento de las cárcavas; la presa retiene los sedimentos del agua evitando el azolvamiento de obras hidráulicas localizadas aguas abajo de ella.

Cabeceo de cárcavas



Figura D.30. Cabeceo de cárcavas. (Cardoza, et al., 2007).

El cabeceo consiste en recubrir la parte inicial de una cárcava con material vegetal muerto, piedras, cemento, o algún otro elemento para aminorar el impacto del escurrimiento sobre el suelo y de esta manera evitar la erosión aguas arriba, Figura D.30.

Estabilización de taludes

El recubrimiento de taludes laterales se realiza en cárcavas, cauces intermitentes, caminos, arroyos o ríos. Dentro de las cárcavas tiene el propósito de inducir el establecimiento de cubierta vegetal para controlar la erosión y evitar su crecimiento; en cauces y caminos disminuye la pendiente de los taludes previniendo deslizamientos. En

general esta práctica protege al suelo de las corrientes de agua superficial y el impacto de la precipitación.



Figura D.31. Estabilización de Taludes. (Cardoza, et al., 2007).

Protección y conservación de caminos



Figura D.32. Protección y conservación de caminos. (Cardoza, et al., 2007).

La principal causa de erosión en zonas forestales son los caminos al mismo tiempo que forman un componente esencial para su desarrollo, razón por la que se deben llevar a cabo medidas necesarias para mantenerlos en estado eficiente. El principal elemento destructor de vías de comunicación es el agua, las obras de mantenimiento deben estar enfocadas a encauzar los escurrimientos superficiales hacia áreas de control donde no provoquen erosión y daños.

La correcta elección de una práctica para la conservación y restauración de suelos contribuirá a la preservación de los servicios ambientales que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales, tales como: la provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros (LGDFS, 2003).