



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

**CÁLCULO DE FACTORES DE REDUCCIÓN POR
ÁREA EN HIDROLOGÍA, UTILIZANDO SISTEMAS
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

T E S I S

para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

NORBERTO JOSÉ TORRES GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS

VÍCTOR FRANCO



MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE 2007



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.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

- 1.1 Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG)
- 1.2 Componentes de un SIG
- 1.3 Concepto de Modelo
- 1.4 Modelos Digitales de Terreno
- 1.5 Modelo Digital de Elevación
 - 1.5.1 Modelos vectoriales
 - 1.5.2 Modelo ráster
 - 1.5.3 Ventajas e inconvenientes de los SIG vectoriales y matriciales
 - 1.5.4 Captura de datos
 - 1.5.5 Interpolaciones
 - 1.5.5.1 Métodos de interpolación globales
 - 1.5.5.2 Métodos de interpolación locales

2. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE UNA CUENCA

- 2.1 Ciclo Hidrológico
- 2.2 Concepto de cuenca
- 2.3 Características de una cuenca y los cauces

3. MODELACIÓN FISIAGRÁFICA DE UNA CUENCA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SONORA

- 3.1 Modelación fisiográfica de la cuenca con el Sistema de Información Geográfica
 - ArcView GIS 3.2
- 3.2 Recopilación de la información espacial
- 3.3 Ubicación de la zona de estudio

4. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA

4.1 Precipitación

4.1.1 Tipos de precipitación

4.1.2 Medición de la precipitación

4.2 Factor de reducción por área (FRA)

4.3. Criterios de cálculo

4.3.1. Métodos empíricos

4.3.2. Métodos teóricos

4.3.3. Métodos teóricos-prácticos

5. APLICACIONES

5.1 Recopilación de la información de precipitación

5.2 Cálculo de FRA para la cuenca del Río Sonora

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXO 1

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente trabajo consiste en el cálculo del factor de reducción por área utilizado en Hidrología, para ajustar el valor de la precipitación tomando en cuenta el área donde se calculó esta. Con la ayuda de los sistemas de información geográfica, esto se realiza, ya que en la actualidad esta técnica tiene un papel importante en la toma de decisiones, así como la dirección que pueda tomar un estudio de ingeniería, donde se involucran un gran número de variables, siendo complejo el control total de todas.

En los últimos años los sistemas de información geográfica han tenido una importante evolución, todo esto debido al gran desarrollo de los equipos y paquetes computacionales, ya que en la actualidad con la ayuda de ellos se pueden almacenar y trabajar una capacidad importante de datos para su rápido manejo y manipulación, siendo que muchos de estos datos pueden actualizarse de un forma rápida y segura, así como comparar los nuevos con los anteriores, y con ello lograr una correcta observación de la evolución de los componentes donde se pretenda realizar un estudio hidrológico.

En Hidrología el sistema de información geográfica Arc View GIS 3.2 es una poderosa herramienta para el cálculo de las propiedades fisiográficas de la cuenca, por esa razón es cada día más común la necesidad de aprender a manejar este programa para todo aquel que requiera un eficiente manejo de información hidrográfica y así facilitar la obtención de la información hidrológica.

El cálculo del Factor de Reducción por Área tiene una importancia fundamental en la Hidrología superficial, ya que se basa en las precipitaciones medidas, así como en el área de influencia de dichas precipitaciones, su utilización se basa en conocer para una cierta área en la zona de estudio, cuanta cantidad de agua promedio caería en esa localidad, todo esto se basa en modelos de probabilidad en función de periodos de retorno para las estaciones y distintas áreas que se localicen en la zona que se requiera estudiar, es decir permite tomar en cuenta el tamaño del área en estudio con respecto a el área total donde se obtuvieron los datos.

Los programas AX del CENAPRED y Curve Expert 1.3 son de suma importancia para el desarrollo del presente trabajo, debido a que ambos permitieron hacer una mejor estimación para los datos de precipitación de las estaciones, así como para las distintas áreas de influencia de ellos dentro de la zona en estudio.

En el primer capítulo del presente trabajo se presenta una visión global de los Sistemas de Información Geográfica aplicados a Hidrología, así como la generación de los Modelos Digitales de Elevación que son la pauta para obtener las propiedades fisiográficas de una cuenca y así obtener los parámetros hidrológicos que se requieran.

En el segundo capítulo se presenta una visión global del concepto de cuenca, así como una revisión de sus características que son de gran utilidad en la Hidrología.

En el tercer capítulo se presenta un enfoque de la utilización del sistema de información geográfica Arc View GIS 3.2 y como trabajar con él, para la obtención de las propiedades fisiográficas de la cuenca.

En el cuarto capítulo se define el concepto de Factor de Reducción por Área (FRA) y se exponen algunos métodos para calcularlo, éstos van desde: empíricos (USWB, UK, Desbordes-Raous- Trévisol) pasando a los teóricos (Roche, Rodríguez, Iturbe, Nguyen - Rousselle, Asquith Famiglieth) y terminando con teórico prácticos (Myres - Zehr).

En el quinto capítulo se recapitula los temas anteriores dando paso al punto esencial del trabajo que es el cálculo del Factor de Reducción por Área aplicado a partir de la cuenca del río Son.

En el sexto capítulo se hacen las conclusiones y recomendaciones de este trabajo y finalmente se incluye un Anexo donde se muestra los cálculos de los factores para cada área de las tres subcuencas (El Orégano, El Cajón y Zanjón) que componen a la cuenca del río Sonora.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La progresiva introducción en muchos campos de la ciencia y de la técnica de los sistemas de información geográfica (SIG), proporcionada por la disponibilidad de equipos informáticos a un costo cada vez más accesible, ofrece a los ingenieros, cuyos problemas se plantean en términos territoriales la oportunidad de realizar un salto cualitativo en su resolución. Tal es el caso de la ciencia hidrológica, donde muchos problemas tienen un carácter evidentemente espacial.

Los SIG utilizan un gran volumen de información con referencia espacial y permiten el almacenamiento, gestión visualización y producción de mapas con gran comodidad y eficiencia. Su aplicabilidad es función de la zona a estudiar, de una base de datos espacial, con información de las características geográficas, y una base de datos alfanumérica, incluyendo atributos describiendo las características anteriores, esto se muestra en la Figura.1.1.

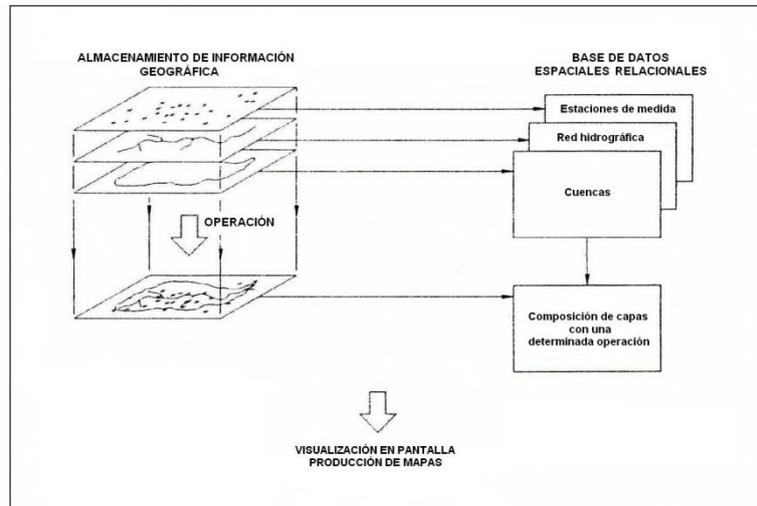


Figura 1.1 Funciones de un SIG

Las facetas clásicas de la Hidrología, consisten en la simulación del funcionamiento de una cuenca, dando a la aparición de fórmulas empíricas para su cálculo, partiendo de características físicas de la cuenca y sus condiciones climáticas ofreciendo un valor del escurrimiento en función de la precipitación.

El paso siguiente fue modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca mediante una serie de ecuaciones que simulan, en función de algunos parámetros, los procesos de transferencia hídrica entre la atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo.

El paso actual consiste en incorporar la tecnología que proporcionan los SIG en diversas fases de la simulaciones hidrológicas y utilizándolos como una herramienta que facilita el análisis espacial de variables y parámetros.

1.1 Definición de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Debido a esta complejidad, el primer problema que se plantea con los SIG es su propia definición.

Existen numerosas definiciones del SIG sin que exista realmente un consenso (Comas D. y Ruiz E.; 1993 y Gutiérrez Puebla J. Y Gould Michael, 1994), ya que ellas varían según el punto de vista que se considere (técnico, informático, comercial, etc.).

Por ejemplo, a continuación se describen algunas definiciones, ofrecidas por diferentes autores:

Stan Aronoff (Aronoff S., 1989)

“Un SIG es un sistema informático que permite cuatro grupos de operaciones para manejar datos georreferenciados (longitud, latitud y elevación): entrada, almacenamiento y recuperación, manipulación y análisis, y salida”

Meter Burrough (Burrough P., 1986)

“Un SIG es un conjunto de herramientas potentes para recoger, almacenar, recuperar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real para unos propósitos particulares”

Jordi Guimet (Guimet J., 1992)

“Un SIG es un subsistema especializado del “Sistema de Información Territorial” (SIT) que permite gestionar la base geográfica de la representación del territorio, sobre el que se proyecta un amplio conjunto de características y atributos del mismo. Un SIT es un conjunto datos-información de características o atributos del espacio territorial, con capacidad para sintetizar la dinámica de los fenómenos que pretende reflejar”

Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI, 1990):

“Un SIG es un conjunto organizado de hardware, software y datos geográficos, diseñado específicamente para capturar, almacenar, poner al día, manipular, analizar y mostrar todo tipo de información referenciada geográficamente”

Todas estas definiciones tienen mucho en común, definiendo el grado de concreción según la finalidad para el que se utiliza el SIG

Una definición sencilla de un SIG puede ser:

“Un SIG es un sistema de gestión de bases de datos gráficos (SGBDG), especializado en información geográfica”

Para entender bien esta definición hay que tener muy claro que es una base de datos, un SGBDG y que se entiende por información geográfica.

Base de datos

Se entiende por base de datos a un conjunto de datos no redundantes, almacenados en un soporte informático, organizado de forma independiente de su

utilización y accesible simultáneamente por distintos usuarios y para diferentes aplicaciones.

Antes de explicar los SGBDG es conveniente conocer los sistemas de gestión de bases de datos alfanuméricos (SGBDA), donde en ellos para manipular grandes cantidades de datos se tienen “bancos de datos” tratándose de almacenar ordenadamente datos en un juego de ficheros y gestionarlos por aplicaciones informáticas y un sistema de índices.

Al aumentar la complejidad de los bancos de datos se producen problemas cada vez más graves para asegurar la consistencia y la integridad de los datos.

Para resolver estos problemas los sistemas de gestión de bases de datos convierten el acceso a los datos y su gestión en una aplicación cerrada, interponiéndose entre los usuarios y los ficheros, teniendo a cargo los problemas de explotación, mantenimiento y comprobación de los datos.

Sistema de gestión de bases de datos gráficos (SGBDG)

Se define un SGBDG como “un conjunto coordinado de programas, procedimientos, lenguajes, etc. que suministra, tanto a los usuarios no informáticos como a los analistas programadores, o al administrador, los medios necesarios para describir y manipular los datos integrados en base, manteniendo su integridad, confidencialidad, seguridad y confianza”.

Se trata de aplicaciones informáticas cerradas que organizan la gestión global de los datos asegurando el acceso a ellos de una manera optimizada, haciéndose cargo de todas las tareas de comprobación, mantenimiento y administración e independizando totalmente las aplicaciones de los datos. También es llamada una aplicación con arquitectura a tres niveles:

- Nivel Interno: Es la manipulación física de los datos, a lo que el usuario se mantiene ajeno.
- Nivel conceptual: Es una descripción de la base de datos independiente de la forma de almacenamiento de los datos y de la vista que de la base tiene los usuarios finales.
- Nivel externo: Es el que percibe el usuario final constituido por lo que solo es de su interés.

Estos tres niveles deben ser independientes.

Hoy en día han prevalecido los SGDBG de tipo relacional a los tipos jerárquicos o en red. En el modelo relacional, las relaciones pueden improvisarse una vez construida la base de datos, dándole una gran ductilidad, mientras que en el modelo jerárquico las relaciones entre los elementos de la bases de datos tenían que predefinirse al construir la base.

1.2 Componentes de un SIG

Un SIG tiene la doble vertiente informática, “hardware” y “software”.

Hardware

Los equipos en los que están más extendidos los SIG, al menos en el área de la Hidrología, son en computadoras personales (PCs) y en las estaciones de trabajo.

Un gran sistema complejo donde la información ocupa cientos de millones de bytes (Mb) deberá tratarse casi obligatoriamente con una estación de trabajo: Sistemas sencillos de decenas de Mb podrán tratarse con una PC. Los SIG para estación de trabajo tienen más posibilidades (mayor número de comandos) que los soportados por los PCs.

Software

De manera simplificada un SIG consta de una serie de módulos o grupos de funciones para tareas concretas:

- Funciones de captura de datos proporcionados por dispositivos de captura periféricos
- Funciones de almacenamiento y gestión en SGBDG de los datos gráficos
- Funciones de edición y depuración de los datos gráficos
- Funciones para la generación de relaciones topológicas
- Funciones para el almacenamiento en SGBDG de atributos alfanuméricos
- Funciones de edición y depuración de los atributos alfanuméricos
- Funciones de relación entre datos gráficos y datos alfanuméricos
- Funciones para la conexión con SGBDG externas
- Funciones para el análisis e interrogación de los datos geográficos y sus atributos
- Funciones para la reproducción gráfica de mapas
- Funciones para la creación de interfases gráficas de usuario

1.3 Concepto de Modelo

Un modelo en ámbitos geográficos, se define como “*una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades*”. Los modelos están construyéndose y estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes.

Se pueden distinguir tres tipos de modelos geográficos:

- Modelos icónicos.- Su relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas, la relación entre los modelos real y el icónico es fundamentalmente una reducción de escala.
- Modelos análogos.- Poseen algunas propiedades similares a los objetos representados, pero sin ser una réplica morfológica de los mismos.
- Modelos simbólicos.- En estos se llega a un modelo a un nivel superior de abstracción, ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.)

Los modelos digitales del terreno (MDT), se incluyen en esta última categoría, consecuentemente las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos.

La elaboración de modelos debe realizarse de forma que la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo sea al menos parcialmente reversible y exista, por lo tanto una relación simétrica que permita la traducción de algunas propiedades de los modelos a la realidad.

1.4 Modelos Digitales de Terreno (MDT)

Los MDT se han definido como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio, teniendo como matiz su digitalización y la importancia de la distribución espacial de la variable representada.

Un modelo digital estará codificado en cifras permitiendo su tratamiento por métodos informáticos siendo necesario efectuar un proceso de codificación de la información que permite una representación virtual en forma de cifras.

Las relaciones espaciales o las características que se desean representar se traducen a diferentes tipos de estructuras numéricas (vectores, matrices, conjuntos, etc.) o a expresiones matemáticas que expresan relaciones topográficas y funcionales.

Los MDT pueden ser constituidos directamente a partir de la realidad a representar, pero es muy habitual que exista un modelo analógico intermedio a partir del cual se realiza la codificación. Por este motivo, los MDT han sido entendidos como una versión digital de los mapas convencionales.

Esto permite que la característica a representar sea diferente de la altitud, este aspecto debe ser destacado ya que es habitual identificar los MDT con los modelos digitales de elevaciones, cuando en realidad pueden ser representadas muchas otras propiedades del terreno.

En este sentido parece deseable diferenciar claramente que variable se está representando en el modelo (elevación, pendiente, corriente, etc.).

Es necesario realizar alguna limitación en cuanto al tipo de variable representada, por lo que se introducirá en la definición del MDT dos condiciones suplementarias:

En la primera debe existir una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos. La segunda es que la variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua excluyendo con esto variables categoriales.

Una definición más completa y precisa es la siguiente: “*un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua* (Felicísimo, 1994)”.

En la cartografía convencional la descripción hipsométrica, que es la representación de área planimétrica acumulada (en porcentaje) de una cuenca por diferencia de cotas o elevaciones del terreno, constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. El papel equivalente en los MDT lo desempeñan el modelo digital de elevaciones (MDE), y que describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados. Siguiendo la analogía cartográfica, es posible construir un conjunto de modelos derivados, elaborados a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE.

1.5 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Se define “un MDE como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la latitud de la superficie del terreno”. De forma general, un MDE puede describirse del modo siguiente:

$$Z = V(x, y) \quad (1.1)$$

donde

- Z altitud del punto situado en las coordenadas x e y , y
- V función que relaciona la variable con su localización geográfica

Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistemas de proyección cartográfica.

La ecuación anterior representa una superficie o campo escalar en la que la altitud es una variable continua. Dado que esta superficie está formada por un número infinito de puntos no es posible su modernización sin cierta pérdida de información, proceso equivalente al de generalización cartográfica en los mapas convencionales.

De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud Z , al que acompañan los valores correspondientes de x e y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial.

Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

Los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de datos: vectorial y raster. Los modelos vectoriales están basados en entidades (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas. Y en los raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que representan al terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada, ver Figura 1.2.

Esta división clásica, analizada en sus fundamentos, tiene bastante más interés en el caso de los SIG, donde interviene información categorial, que en los modelos digitales de terreno. En efecto, las matrices, caso característico de una estructura *raster* pueden ser consideradas fácilmente como un conjunto de puntos acotados, sin asumir necesariamente que el atributo se asigna a una celda cuadrada de altitud uniforme. En cualquier caso, el tratamiento posterior de la estructura matricial es idéntico con ambas concepciones.

En los modelos vectoriales los atributos del terreno se representan mediante líneas (vectores) y mediante puntos acotados (caso límite de reducción de un vector a un único elemento). Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas y las líneas, por tanto, mediante un vector de pares de coordenadas. La altitud puede ser única para la línea o diferente para cada punto integrante de la misma.

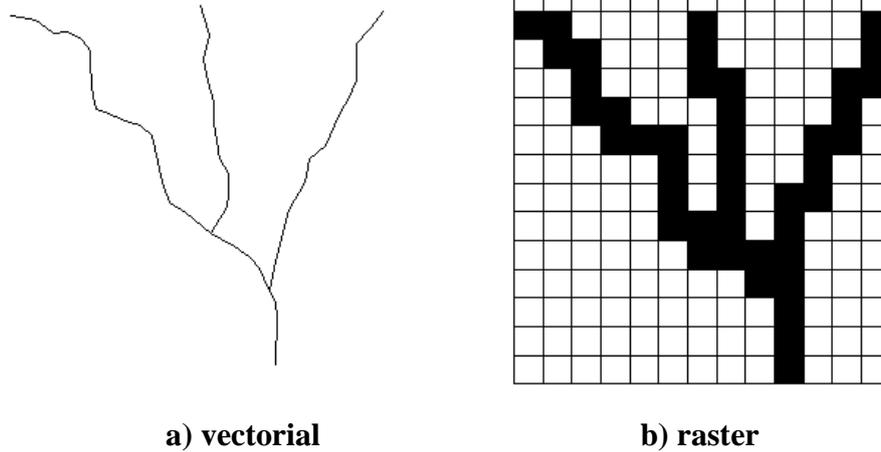


Figura 1.2 Representación vectorial y raster de un atributo del terreno

1.5.1 Modelos Vectoriales

Son aquellos modelos que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores (líneas) definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.

Con un par de coordenadas se define un punto, con dos puntos se genera una línea y con una agrupación de estas se forman polígonos. A estos objetos de dibujo, ya se les pueden asociar las diversas capas de información que se relacionan con el modelo espacial generado a través de contornos (puntos y líneas).

Contornos

La estructura básica es el vector, compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (x, y) que describe la trayectoria de líneas isométricas (coincidiendo, por tanto con las curvas de nivel o isohipas del mapa topográfico convencional), ver Figura 1.3.

El número de elementos de cada vector es variable y la reducción de éste número de elementos permite incorporar cotas puntuales sin introducir incoherencias

estructurales. Una curva de nivel concreta queda definida, por tanto mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados (no necesariamente iguales) para garantizar la exactitud necesaria del modelo.

La localización espacial de cada elemento es explícita, conservando los valores individuales de coordenadas. En el caso más sencillo, el MDE está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas, generalmente, por intervalos constantes de altitud.

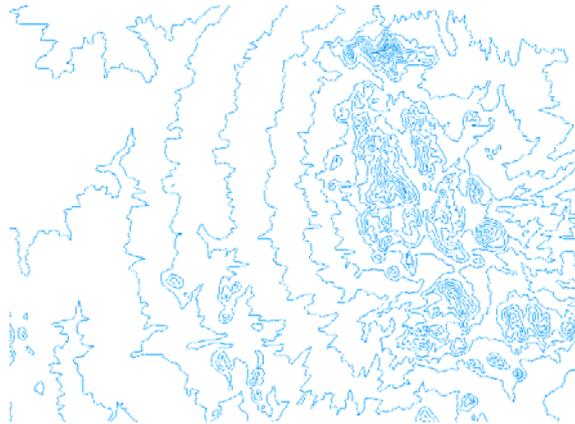


Figura 1.3 Curvas de nivel en formato vectorial

Redes de triángulos irregulares (TIN)

Una estructura de datos cada vez más utilizada es la que se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa de 1978: TIN o red irregular de triángulos (Triangulated Irregular Network), ver Figura 1.4.

Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, con una técnica matemática llamada triangulación de Delaunay, adosándose sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de los puntos.

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

hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas.

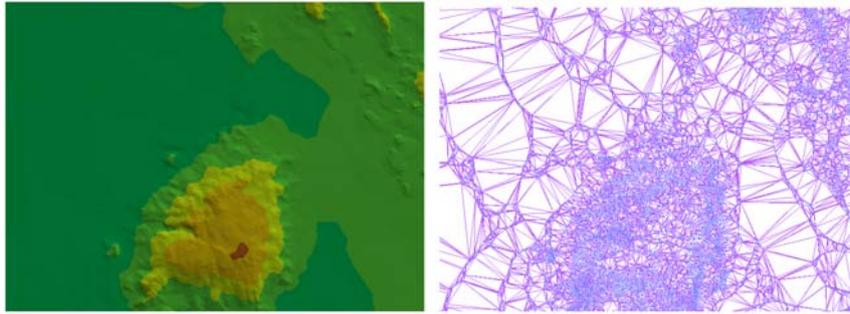


Figura 1.4 Modelo vectorial TIN: Triangular Irregular Network

Almacenamiento de datos gráficos en un SIG vectorial

Las primitivas gráficas en un SIG vectorial son fundamentalmente tres: puntos, líneas o arcos y polígonos.

El SIG se encarga de almacenar estos datos (número de puntos que lo forman, coordenadas, etc.) en forma de “coberturas”. Una cobertura es un conjunto de estos elementos (puntos, línea o polígonos) que va a representar un conjunto homogéneo de datos geográficos que cubren el territorio es decir, una información geográfica concreta, cada cobertura está compuesta de un solo tipo de primitivas gráficas.

Como se trata de elementos geográficos, todos ellos deben estar referidos a un sistema de coordenadas en un sistema de proyección, directamente o a través de puntos de referencia geográficas en los que apoyarse

Para evitar redundancias y errores, el SIG no almacena dos veces una línea perteneciente a dos polígonos contiguos sino que la almacena una sola vez y crea las tablas adecuadas para atribuir a cada polígono las líneas que lo componen, y a cada línea, sus vértices y nodos.

1.5.2 Modelo raster

Los modelos raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (píxeles) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático.

Dado que la malla es regular, el tamaño del píxel, cuya definición se dará más adelante, es constante y se conoce la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los píxeles están georreferenciados, con su longitud, latitud y elevación.

Matrices regulares

Esta estructura es el resultado de suponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud medida de cada celda, aunque habitualmente se utiliza un valor puntual, asociado a cada nudo de la retícula o punto medio de la celda, con lo que esencialmente se construye un modelo vectorial de puntos.

La retícula puede adoptar formas variadas, pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas. Las matrices de altitudes suelen ser generadas por interpolación a partir de un modelo previo de contornos o por métodos fotogramétricos.

La malla regular de esta matriz está formada por píxeles del mismo tamaño, los cuales se encuentran distribuidos en una matriz regular de $M \times N$ y cuentan con un valor asignado correspondiente al eje Z, que les da altura para la generación del MDE.

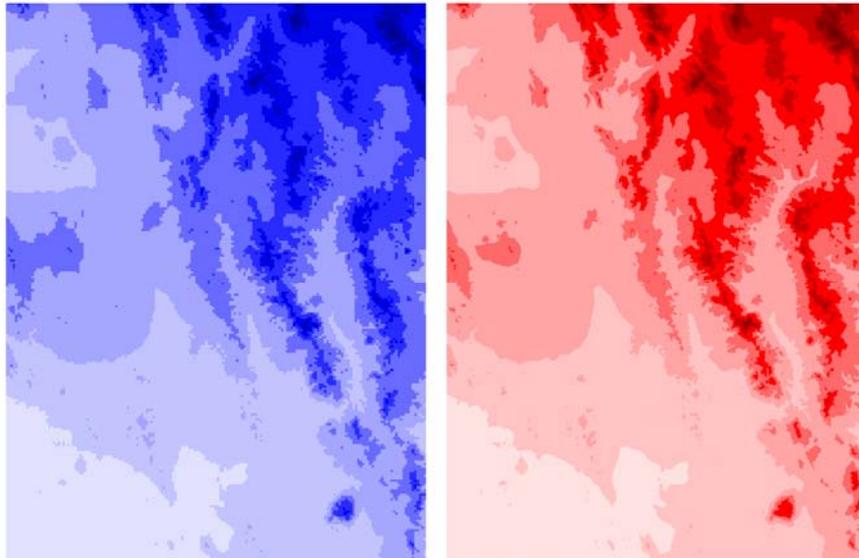


Figura 1.5 Imágenes raster

En la Figura 1.5 se observa el MDE de la cuenca del río Sonora, pero con diferente valor de celda, para la primera figura tiene un valor de 500 m, la cual no

representa un precisión la elevación del modelo, en cambio en la figura de la derecha se tiene un valor de 50 m, consiguiendo un mayor representación de las elevaciones.

Matrices jerárquicas

Estas matrices son utilizadas cuando es necesaria una mayor precisión en una zona particular de interés y no se desee aumentar la precisión de toda una imagen ya que esto puede ser innecesario.

La estructura de las matrices jerárquicas sigue una organización tipo árbol, con una raíz en lo alto de la jerarquía relacionado con uno o más elementos del nivel, inmediatamente inferior, los cuales a su vez pueden estar conectados con uno o más elementos subordinados a ellos. De esta forma, cada elemento está conectado máximo con solo un elemento inmediatamente superior y uno o más elementos inmediatamente inferiores, siendo que la relación conserva siempre un orden descendente.

El interés de estudiar las matrices jerárquicas reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices regulares (su resolución espacial prefijada) manteniendo, en principio, sus principales ventajas: la sencillez conceptual y operacional. En este tipo de matrices los elementos pueden ser bien datos elementales (como en las matrices regulares), bien submatrices con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel.

La relación establece que no pueden existir conexiones entre elementos de igual nivel jerárquico, ni entre elementos que no sean contiguos en jerarquía. Esta limitante constituye la principal falla de la estructura jerárquica. Una vez creado el árbol, es imposible establecer nuevos tipos de relaciones.

Definición de píxel

Un “píxel” (abreviatura de Picture Element) es la unidad más elemental de los modelos ráster, pudiendo ser almacenadas como matrices para la composición total de los modelos raster o matriciales.

El píxel es la unidad visual más pequeña que se puede representar en una imagen de satélite. El sensor detecta la radiancia media de un objeto sobre la superficie equivalente al tamaño de la celda. Este valor se traduce a un valor numérico al que llamamos nivel digital, a partir del cual se realiza el tratamiento o procesamiento digital de las imágenes. Cada píxel tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al nivel digital (ND) percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o nivel visual. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas fila, columna.

Las imágenes de satélite representan las formas de captura indirecta de la información espacial. Almacenadas como matrices, un píxel o celda, será cada elemento de imagen, tiene un valor proporcional a la reflectancia del suelo para el área de la imagen, siendo una unidad de imagen cuyo tamaño rectangular dependerá de la resolución con que se defina la cobertura.

El píxel en un software, se define por un byte y éstos pueden estar descritos con arreglos de:

- 8 bits con 256 niveles digitales posibles (28, de 0 a 256 niveles);
- 16 bits no signado con 65536 niveles digitales posibles (de 0 a 216)
- 16 bits signado (desde $-216/2$ a $216/2$)

La imagen que más discriminación nos da de niveles de grises está configurada en 32 bits real.

Por la naturaleza del proceso de adquisición de estas imágenes por satélite, los objetos geográficos están contenidos en la imagen y para individualizarlos, es necesario recurrir a técnicas de procesamiento y de clasificación automática.

Almacenamiento de los datos gráficos en un SIG matricial

En los SIG de tipo matricial, la única gráfica primitiva es el píxel. En cada celda se almacena un valor al que se suele llamar categoría, y que representa un parámetro del mundo real. Como en el SIG vectorial, estas celdas están georreferenciadas respecto de un sistema de coordenadas definidas en un sistema de proyección.

En el caso de los SIG matriciales no exista el concepto de topología de una manera tan clara como en el vectorial. Sin embargo suelen ofrecer funciones que se acercan a este modelo, posibilitando operaciones parecidas a las de inclusión, contigüidad, dirección, etc., generalmente esto lo hace con ayuda de módulos vectoriales.

Topología

Las capacidades de los SIG vectoriales es la posibilidad de generar la topología de una cobertura, es decir, almacenar, además de la geometría de los elementos, sus relaciones con otros elementos de coberturas.

Las coberturas de puntos no tienen topología posible, puesto que no existe ninguna relación espacial entre puntos.

En las coberturas de líneas la principal relación topológica es la conectividad: el SIG, al recibir la orden de generar la topología, distinguirá entre vértices interiores de las líneas y vértices finales de cada elemento a los que se denomina nodos. Tomará nota de si los nodos conectan con otros elementos línea, de manera que conocerá las conexiones entre todos ellos, ver Figura 1.6.

Otra relación topológica es la dirección o sentido de ellos. El SIG será capaz de recorrer las líneas en la dirección que se requiera porque ellas se almacenan con un nodo inicial y uno final.

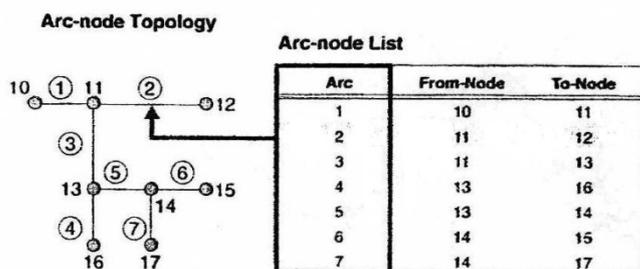


Figura 1.6 Topología de líneas. Conectividad y dirección (tomado de ESRI, 1994)

En las coberturas de polígonos la relación principal es la de inclusión, ver Figura 1.7. El SIG sabe que el polígono forma una superficie cerrada con una área dada y sabrá si un punto está dentro o fuera de ella.

Los polígonos cerrados podrán emparejarse con un punto llamado etiqueta, en el podrán reflejarse sus atributos.

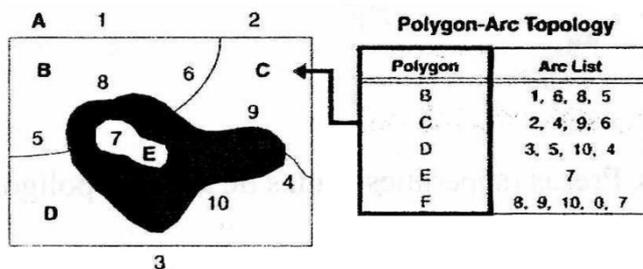


Figura 1.7 Topología de polígonos. Inclusión y contigüidad (tomado de ESRI, 1994)

Como las líneas comunes con otros polígonos son compartidas, también sabrá que polígonos son contiguos. Al generarse la topología mediante el correspondiente comando, todas las tablas en que se describen estas relaciones son creadas con la información adecuada, ver Figura 1.8.

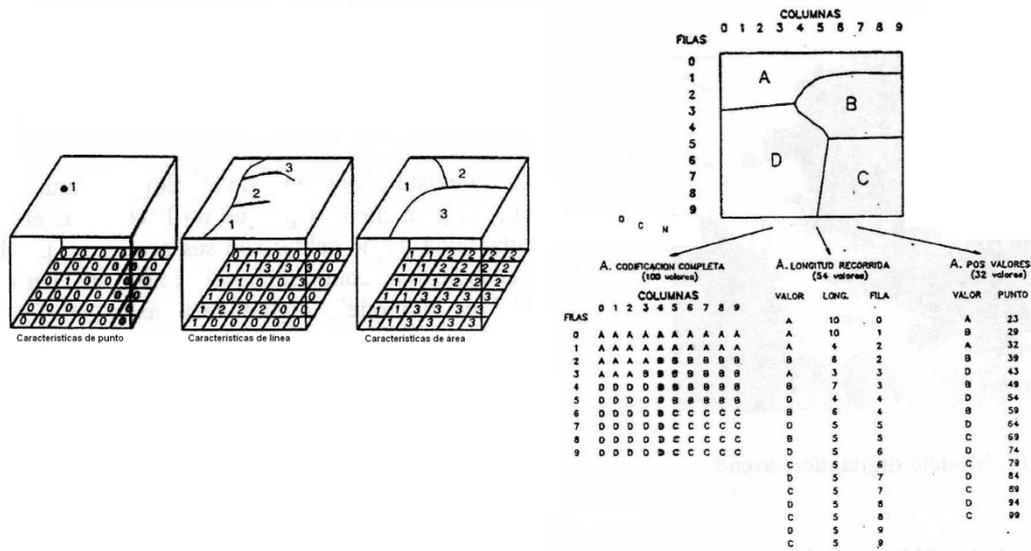


Figura 1.8 Métodos de compresión de datos matriciales (tomado de Aronoff, 1989)

Todas estas relaciones topológicas, conectividad, dirección, inclusión y contigüidad serán de una gran utilidad a la hora del análisis, cuando se hagan uso de las capacidades del SIG como SGBDG.

1.5.3 Ventajas e Inconvenientes de los SIG vectoriales y matriciales

Los dos tipos de SIG no son excluyentes, sus ventajas e inconvenientes se complementan, siendo necesario, frecuentemente, disponer de ambos. Este hecho ha propiciado que la mayoría de los SIG tengan ambas naturaleza, los SIG vectoriales tienen módulos matriciales y los SIG matriciales módulos vectoriales.

Ventajas del SIG vectorial

- Adecuado para representar elementos geográficos bien definidos: ríos, cuencas, carreteras, etc.
- Estructura de datos compacta, generando ficheros poco voluminosos
- Generación de topología, ofreciendo posibilidades de análisis muy potentes

Desventajas del SIG vectorial

- Estructura de datos compleja
- Dificultad de aprendizaje

Ventajas del SIG matricial

- Adecuado para representar elementos geográficos poco definidos (difusos o de variación espacial progresiva: tipos de suelo, humedad del suelo, modelos digitales del terreno, etc.)
- Estructura de datos sencilla
- Operaciones de análisis sencillas y potentes
- Facilidad de aprendizaje

Desventajas del SIG matricial

- Estructura de datos poco compacta, generando grandes ficheros de datos
- Análisis limitado por no tener topología y por limitaciones de resolución

1.5.4 Captura de datos

La captación de la información altimétrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, incluyendo la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos manipulable por medios informáticos. Tras la captación de los datos, éstos deben ser estructurados de forma adecuada para el manejo por parte de las aplicaciones informáticas lo cual puede realizarse de formas variadas, aún dentro del mismo esquema general (matricial, vectorial, etc.).

Se analizarán las principales alternativas que existen en la actualidad para realizar estas operaciones, hasta llegar al resultado: Un MDE preparado para ser sometido a las pruebas de control necesarias para la corrección de errores.

En principio, el origen de un modelo digital de elevaciones puede estar, en principio, en la medida directa sobre la superficie real del terreno mediante, por ejemplo, altímetros aerotransportados. Sin embargo, es más frecuente el uso de métodos indirectos, que utilizan como base un conjunto de documentos (analógicos o digitales) elaborados previamente. En la Tabla 1.1 se muestra algunos ejemplos de métodos que pueden ser utilizados con mayores o menores dificultades y limitaciones.

Tabla 1.1 Ejemplos de métodos de captura de datos para construcción del modelo digital de elevaciones

DIRECTOS	Altimetría	Altímetros transportados por plataformas aéreas
	GPS	Global positioning system, localización mediante satélites
	Topografía	Mediante estaciones topográficas con salida digital
INDIRECTOS	Restitución	Origen digital: imágenes digitales captadas por satélites con diferentes ángulos de visión
		Origen analógico: pares fotográficos convencionales (pancromático, color infrarrojo)
	Digitalización	Manual: mediante tablero digitalizadores Automática: mediante scanners

Métodos directos

Altímetros, GPS y estaciones topográficas

Los altímetros son instrumentos de medición que indican la diferencia de altitud entre el punto donde se encuentra localizado y un punto de referencia. Algunos satélites han incorporado altímetros entre sus instrumentos, con lo que se hace posible el registro directo de los altímetros en formato digital. Su mayor ventaja reside en que se trata de un método de captación remota de información, por lo que la toma de los datos no está limitada por la accesibilidad de la zona.

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

Las estaciones topográficas más avanzadas pueden generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital. Algunos sistemas de información geográfica incorporan utilidades que permiten el tratamiento e incorporación de los datos en este tipo de formatos (ESRI, 1991). La recolección de información exige la presencia física sobre el terreno, y el tiempo necesario para realizar una toma de datos fiable y completa.

Métodos indirectos

a) Restitución fotogramétrica

Es más frecuente utilizar métodos indirectos para la generación de los MDE. Principalmente las causas son que estos métodos no necesitan acceder físicamente a la totalidad de la zona de estudio, pues utilizan documentos preexistentes, y que la generación de datos se hace de forma relativamente rápida, cuestión básica cuando el volumen de información es muy elevado.

En las operaciones de restitución se utiliza como documento básico un conjunto de pares estereoscopios, que es una técnica para la visión de imágenes tridimensionales basándose en la observación de dos imágenes ligeramente distintas de una misma realidad, deducen de su paralelismo las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía. La información resultante es procesada mediante un proceso iterativo, calcular correlaciones que involucren las propiedades de ambos planos. El acceso al terreno es necesario para establecer un conjunto de puntos de apoyo que permitan fijar valores de altitud en una escala absoluta.

El método se utiliza también en la elaboración de cartografía analógica y sólo se diferencia en el formato de la salida de los datos. En la cartografía convencional, la salida se realiza sobre un soporte físico estable (minuta), mientras que en el otro caso se graba directamente en un soporte informático. Sin embargo, estos tipos de productos no son incompatibles y pueden ser generados paralelamente.

b) Digitalización de mapas topográficos

La opción alternativa es la digitalización de los mapas topográficos preexistentes, lo cual puede realizarse de forma manual (mediante un tablero digitalizador), y automáticamente (mediante sensores ópticos de exploración).

Digitalización manual

Este proceso se realiza sobre un tablero digitalizador sobre el que se sitúa el mapa. Las curvas de nivel se siguen manualmente con un cursor de forma que el ordenador recibe a ciertos intervalos, prefijados o decididos por el operador, las coordenadas que definen la trayectoria de la línea.

Es el método más simple de digitalización, el cual consiste en superponer físicamente al mapa topográfico una malla uniforme y extraer manualmente las altitudes correspondientes a cada nodo de la red. Esta es la versión estrictamente manual de una serie de procesos de muestreo e interpolación inherentes a la transformación vector-ráster y las circunstancias aconsejan el uso de este método sólo cuando la penuria de medios lo haga prescindible.

Digitalización automática

El método usado mayormente en la actualidad se basa en el uso de microdensitómetros de exploración (scanners) que detectan un cierto número de niveles de gris (o componentes de color) en un mapa original mediante sensores ópticos. Existen dos variantes básicas en función del formato del resultado, vectorial o ráster

En el formato vectorial, el cabezal se sitúa al inicio de una línea y realiza el seguimiento de la misma de forma automática, generando directamente una salida vectorial. Este proceso presenta problemas en los casos en que las líneas se interrumpen o se cruzan: cotas en medio de las curvas de nivel, caminos o carreteras que las cortan, etc.

La digitalización mediante scanners puede generar también salidas en formatos ráster cuando el barrido se hace de acuerdo con un esquema matricial. La salida digital es una matriz de valores de gris, de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) en los dispositivos sensibles al color o, simplemente, de blanco y negro. La generación de esta matriz es un proceso simple de blanco y negro.

De este conjunto de proceso resulta la versión digital del mapa topográfico original, cuya calidad debe ser ya suficiente para ser utilizada como MDE, una vez asignada a cada línea la altitud correspondiente.

1.5.5 Interpolaciones

La interpolación consiste en calcular valores de una determinada variable en una serie de puntos del territorio a partir de una serie limitada de muestras de esa variable. Es decir, la interpolación suministra los valores de esas variables en puntos no

muestreados del territorio. Un ejemplo sería si los datos fueran las curvas de nivel de una zona, o ciertos valores puntuales de las cotas, la interpolación ofrecería los valores de la elevación en lugares en los que no se muestro la elevación.

Esta será necesaria en estos tres principales casos:

- Cuando la superficie en SIG matricial (raster) tiene una resolución distinta de la resolución pedida.
- Cuando una superficie continua es representada por un modelo diferente al que se requiere.
- Cuando los datos no cubren toda la región de estudio.

Un método que predice, para una determinada localización, un valor del atributo que es idéntico al valor medido en esta posición se lo llama un método preciso ó exacto y otro tipo de método se le llama inexacto.

La diferencia (absoluta o cuadrada) entre el valor observado y el estimado es en la gran mayoría de los casos usada como un indicador de la calidad de la interpolación inexacta.

Desde un punto de vista general, a los métodos de interpolación se les clasifica en dos grandes grupos:

- Métodos globales
- Métodos locales

1.5.5.1 Métodos de interpolación globales

Estos métodos utilizan todo los datos disponibles para efectuar una estimación válida para toda la región de interés, son utilizados más bien para examinar y eliminar posibles tendencias presentes en los datos tanto más que para efectuar una interpolación.

Como ejemplos de este grupo podemos citar la clasificación usando información externa, superficies que poseen una tendencia en sus coordenadas, modelos de regresión y métodos de análisis espectral.

El método geo-estadístico o kriging, describe la correlación tanto espacial como temporal que existe entre los valores de un atributo. La geo-estadística proporciona estimaciones probabilísticas de la calidad de la interpolación, también ayuda hacer predicciones por superficies o volúmenes más grandes e incorporar en el cálculo datos livianos con el fin de mejorar la precisión de la interpolación.

Interpolación por Método Kriging

El interpolador de KRIGING, utiliza en la estimación las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la información, con el objeto de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial.

Este método de interpolación asume que la distancia o la dirección entre puntos de la muestra reflejan una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación en la superficie. Kriging encaja una función matemática a un número especificado de puntos, o todos los puntos dentro de un radio especificado, determinando el valor de salida para cada posición. Kriging es un proceso de multipaso; esto incluye el análisis exploratorio estadístico de los datos, variograma del modelamiento, la creación de la superficie, y (opcionalmente) la exploración de una superficie de discrepancia.

Esta función es apropiada cuando se sabe que hay una distancia espacialmente correlacionada o la tendencia direccional en los datos. A menudo es usado en la ciencia de suelos y la Geología.

1.5.5.2 Métodos de interpolación locales

Los métodos de interpolación locales operan dentro de una pequeña zona usando la información proveniente de los vecinos para calcular el valor del atributo. Esto significa:

- Definir una región alrededor de la ubicación donde el valor del atributo debe ser calculado
- Determinar cuántos vecinos se encuentran al interior de esta región
- Encontrar una función matemática que representa la variación de este conjunto de puntos
- Evaluar la variación del conjunto de puntos en una malla regular.

Ejemplos de interpolación local son los polígonos de Thiessen, métodos basados en un peso lineal e inversamente proporcional (IDW) a la distancia y métodos basados en cuñas (splines). Estos tipos de métodos de interpolación se encuentran disponibles en la mayoría de los programas SIG

Este procedimiento debe ser repetido hasta que todos los puntos en la malla regular hayan sido calculados. Y en este procedimiento también es posible considerar información externa y tendencias presentes en los datos.

Los dos tipos de interpolación local que incluye la extensión Spatial Analyst del SIG Arc View GIS 3.2 son:

- Inverse Distance Weighting (IDW), peso proporcional al inverso
- Splines, generación de cuña

Estos métodos tienen en común el hecho que uniformizan los datos, ya que utilizan un tipo de promedio al interior de la ventana que define la región de influencia de los vecinos alrededor de un punto.

Interpolación por IDW

El método IDW combina la idea de vecindad con la idea de un cambio gradual de las superficies con una tendencia. Se supondrá que el valor del atributo Z en una posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos pero donde los vecinos más cercanos tienen más peso e importancia que los más alejados.

Cada punto de la muestra ejerce una influencia sobre el punto a determinar y disminuye en función de la distancia. Así cada punto vecino contará con un "peso" en la determinación de la cota del punto a interpolar, que será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial.

Interpolación por Método Spline

Spline estima valores usando una función matemática $V(x, y)$ a un determinado número de puntos de apoyo, que reduce al mínimo la curvatura de la superficial total, dando como resultado una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos muestreados.

Este método es el mejor para que con mucho cuidado se puedan variar superficies como la elevación, alturas de superficie del agua o concentraciones de contaminación.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE UNA CUENCA

La Hidrología es la ciencia natural que trata sobre el agua, su ocurrencia, circulación y distribución sobre y abajo de la superficie terrestre, y es de importancia en todos los problemas que involucran el aprovechamiento del agua; sus principales objetivos, al diseñar una obra de ingeniería, pueden resumirse en dos grandes grupos:

a) Obtención de la avenida máxima que con una determinada frecuencia puede ocurrir en un cierto lugar, lo cual es necesario en general considerar al diseñar vertedores, puentes y drenajes.

b) Conocimiento de la cantidad, frecuencia y naturaleza de ocurrencia del transporte del agua sobre la superficie terrestre. Esto servirá para el diseño de instalaciones de irrigación, abastecimiento de agua, aprovechamientos hidroeléctricos y navegación de ríos.

El ciclo hidrológico es el foco central de la Hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua, siendo un término descriptivo aplicable a la circulación del agua.

2.1 Ciclo hidrológico

En la Tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por abajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es un movimiento continuo del agua en la tierra que empieza con la evaporación de los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa formando las nubes y luego se precipita sobre la superficie terrestre o en los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escurrimiento superficial.

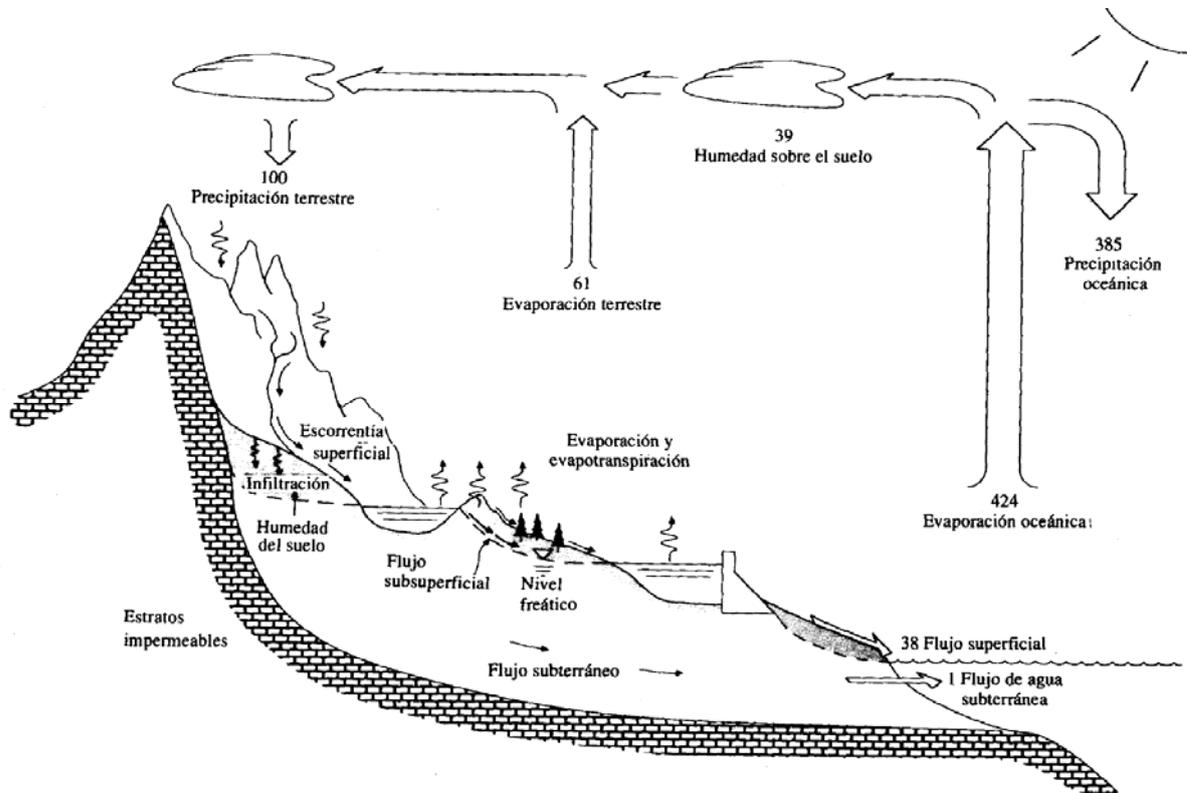
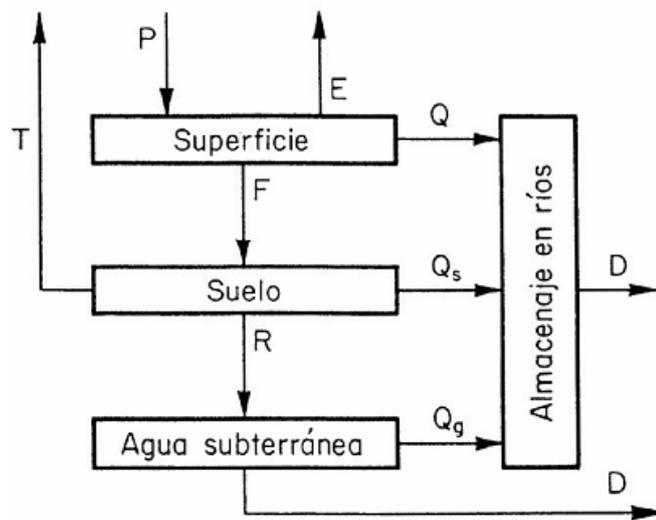


Figura 2.1 El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre (Chow 1994)

La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar el escurrimiento superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmosfera a medida que el ciclo hidrológico continúa, ver Figura 2.1.

Esta descripción simplificada del ciclo hidrológico es de tipo cualitativo y en ella no se ha incluido el tiempo. Por ejemplo, después de ocurrida una tormenta, el efecto inmediato en un río se deja sentir el escurrimiento superficial, además de existir una posible recarga del agua subterránea, dependiendo de la humedad relativa sobre el suelo de la cuenca, también puede decirse que no hay evaporación durante la tormenta, y que toda el agua de lluvia se intercepte, infiltre y escurra superficialmente

El ciclo hidrológico es de importancia básica para delimitar el campo de la Hidrología, la cual comprende la fase entre la precipitación sobre el terreno y su retorno a la atmósfera o al océano, ver Figura 2.2; corresponde el análisis de la atmósfera a la Meteorología y el estudio del océano a la Oceanografía.



- | | | |
|-------------------|--|----------------------------|
| E - Evaporación | Q - Escorrimento superficial | F - Infiltración |
| P - Precipitación | Q _s - Escorrimento subsuperficial | D - Descarga a los océanos |
| T - Transpiración | Q _g - Escorrimento subterráneo | R - Recarga |

Figura 2.2 Fases del ciclo hidrológico que estudia la Hidrología

2.2 Concepto de cuenca

El concepto de cuenca se define en función de la morfología que se requiera estudiar, es decir, las características hidrográficas, hidrológicas o subterráneas que se estudiarán en el sitio de interés.

Para un mejor entendimiento del concepto de cuenca hidrológica, primero se tiene que definir el concepto de cuenca hidrográfica.

Cuenca hidrográfica

Es el área natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado. Las cuencas hidrográficas son unidades morfológicas superficiales. Sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones; también conocido como "parteaguas", ver Figura 2.3.

Teóricamente el parteaguas, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja, cruzando o cierra las corrientes en los puntos de salida.

Al interior de las cuencas se pueden delimitar subcuencas o cuencas de orden inferior. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios. En general, estas subdivisiones se hacen de acuerdo con las estaciones hidrométricas existentes en la zona.

Conociendo este concepto ahora se puede definir el concepto de cuenca hidrológica, el cual será el que se maneje en el presente trabajo.

Cuenca hidrológica

La definición de cuenca hidrológica es más integral que la hidrográfica. Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales, ya que además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo.

Las funciones más importantes de una cuenca hidrológica son las siguientes:

- Captación de agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos.
- Almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.
- Descarga del agua como escurrimiento.

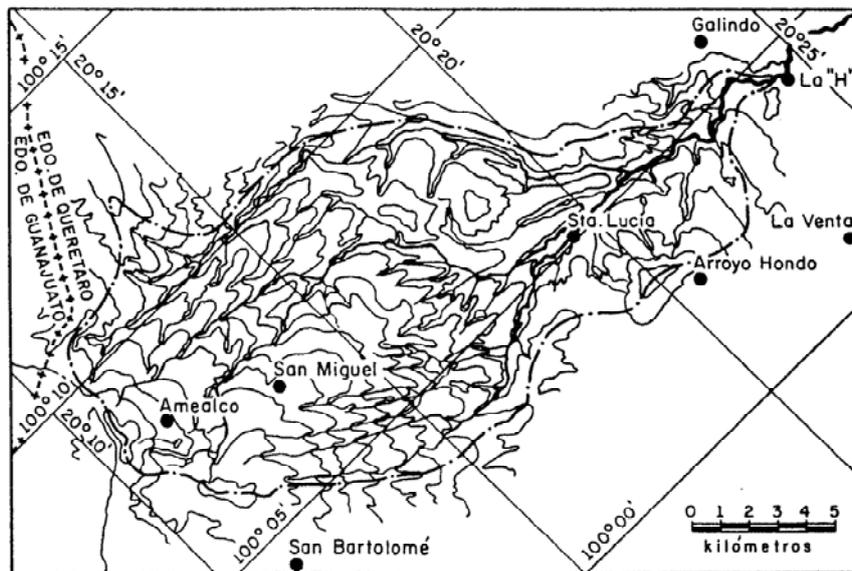


Figura 2.3 Mapa topográfico de la cuenca de una corriente (tomado de Springall 1970)

No necesariamente se analiza con el mismo criterio una cuenca tributaria o pequeña que en una grande. En una pequeña, su forma y cantidad de escurrimiento están influidas principalmente por las condiciones físicas del suelo; por lo tanto, el estudio hidrológico debe enfocarse con más atención a la cuenca misma. Para una cuenca grande, el efecto de almacenaje del cauce es muy importante, por lo cual deberá dársele también atención a las características de este último.

Es difícil distinguir una cuenca grande de una pequeña, considerando solamente su tamaño. En Hidrología, dos cuencas del mismo tamaño son diferentes. Una cuenca pequeña se define como aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, y donde predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce. Así, el tamaño de una cuenca pequeña puede variar desde unas

pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, se considera de 250 km² (Chow, 1962).

2.3 Características de una cuenca y los cauces

El escurrimiento del agua en una cuenca depende de diversos factores, siendo uno de los más importantes las características fisiográficas de la cuenca. Entre estas, se pueden mencionar su área, forma, pendiente, características del cauce principal, como longitud y pendiente, elevación de la cuenca y red de drenaje.

A continuación y según su uso se describirán las formas de calcular las características fisiográficas.

2.3.1 Área de una cuenca

Es el área drenada de una cuenca en proyección horizontal encerrada por el parteaguas. Generalmente, esta área se determina con un planímetro y se expresa en kilómetros cuadrados; así, por ejemplo, el área de la cuenca de la Figura 2.3 vale 207 km.², Las pequeñas generalmente se expresan en ha.

2.3.2 Forma de una cuenca

La forma estará en función de su salida, desde este punto de vista existen dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar, ver Figura 2.4.

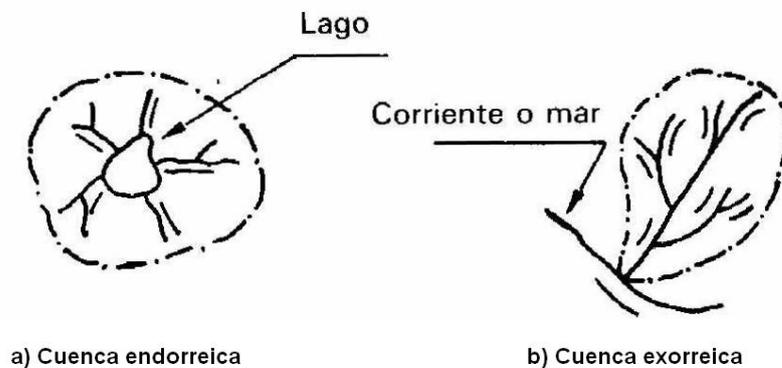


Figura 2.4 Cuencas endorreicas y exorreica (tomado de Aparicio 1992)

Para las endorreicas, generalmente su forma es de tipo circular, mientras que en las exorreicas, su forma dependerá de la longitud de su cauce principal, pudiendo ser circulares, estrechas o alargadas, ver Figura 2.5. La forma de la cuenca definitivamente afecta las características de la descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo.

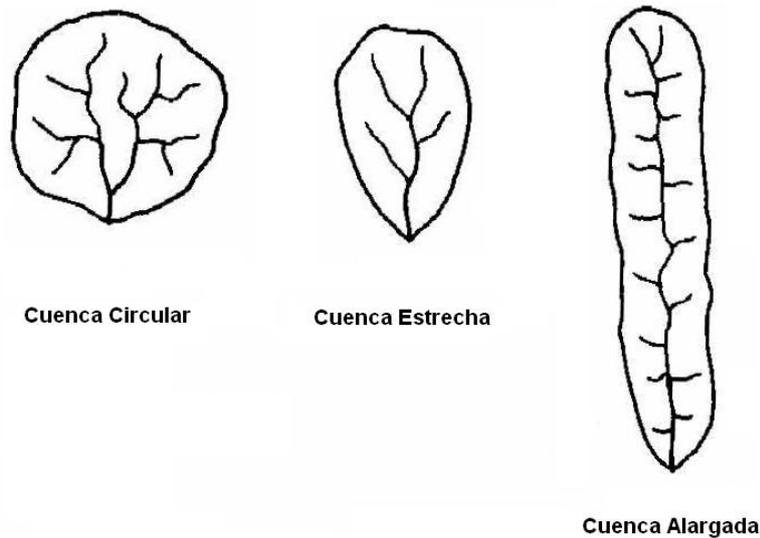


Figura 2.5 Formas generales de una cuenca (tomado de Campos A. 1998)

2.3.3 Pendiente de una cuenca

Existen diversos criterios para valuar la pendiente de una cuenca, dependiendo del uso posterior que se le vaya a dar al resultado o bien al criterio que lo requiere.

a) *Criterio de Alvord*

Para obtener la ecuación que proporciona la pendiente de la cuenca por este criterio se analiza primero la pendiente existente entre curvas de nivel. Analizando la faja definida por las líneas medias que pasan entre las curvas de nivel, se tiene que para una de ellas la pendiente de su área tributaria es:

$$S_1 = \frac{D}{W_1}$$

$$W_1 = \frac{a_1}{l_1}$$

donde

- S_l pendiente media de la faja referente a esa curva de nivel
- D desnivel entre las líneas medias. Como son líneas intermedias entre las curvas de nivel, se puede aceptar que es el desnivel entre dichas curvas
- W_l ancho de la faja
- a_l área de la faja
- l_l longitud de la curva de nivel

Entonces, la pendiente de la cuenca será el promedio pesado de la pendiente de cada faja en relación con su área; así, considerando n fajas:

$$S_c = \frac{Dl_1 a_1}{a_1 A} + \frac{Dl_2 a_2}{a_2 A} + \dots + \frac{Dl_n a_n}{a_n A}$$

ordenando

$$S_c = \frac{D}{A} (l_1 + l_2 + \dots + l_n)$$

por lo que

$$S_c = \frac{D L}{A} \tag{2.1}$$

donde

- S_c Pendiente de la cuenca
- A área de la cuenca, en km^2
- D desnivel constante entre curvas de nivel, en km
- L Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca, en km

b) Criterio de Horton

En este criterio se traza una malla de cuadrados sobre el plano del área de la cuenca en estudio, la cual conviene orientar en el sentido de la corriente principal, ver Figura 2.6. Si la cuenca es de 250 km^2 o menor, se requiere utilizar por lo menos una malla de cuatro cuadros por lado; si es mayor de 250 km^2 , deberá incrementarse el

número de cuadros de la malla, ya que la aproximación del cálculo depende del tamaño de esta.

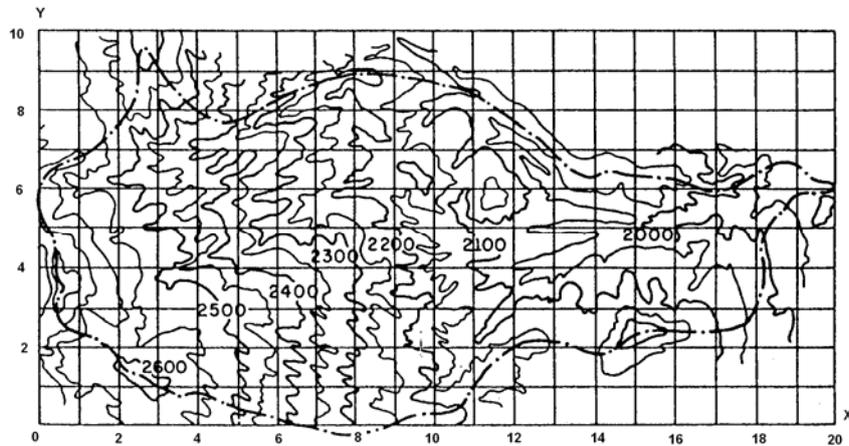


Figura 2.6 Malla para obtener la pendiente de una cuenca (tomado de Springall, 1970)

Una vez hecho lo anterior, se mide la longitud de cada línea de la malla comprendida dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel. La pendiente de la cuenca en cada dirección de la malla se valúa como

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \quad y \quad S_y = \frac{N_y D}{L_y} \quad (2.2)$$

donde

S_x pendiente de la cuenca en la dirección x

S_y pendiente de la cuenca en la dirección y

D desnivel constante entre curvas de nivel

L_x longitud total de las líneas de la malla en la dirección x , comprendidas dentro de la cuenca

L_y longitud total de las líneas de la malla en la dirección y , comprendidas dentro de la cuenca

N_x número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x con las curvas de nivel

N_y número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y , con las curvas de nivel

Finalmente, Horton considera que la pendiente media de la cuenca puede determinarse como

$$S_c = \frac{ND \sec \theta}{L} \quad (2.3)$$

donde

$$L = L_x + L_y$$

$$N = N_x + N_y$$

θ ángulo entre las líneas de la malla y las curvas de nivel

La ecuación se puede reescribir de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{1.57 ND}{L} \quad (2.3a)$$

donde

El valor promedio de 1.57 es un valor promedio de la $\sec \theta$ de cada intersección, obtenida de los cálculos realizados en un gran número de cuencas.

$$L = L_x + L_y$$

$$N = N_x + N_y$$

En la práctica, y para propósitos de comparación, es igualmente eficaz ignorar el término $\sec \theta$, o bien considerar el promedio aritmético o geométrico de las pendientes S_x y S_y como pendiente de la cuenca.

El promedio aritmético es una medición estadística que tiene importancia en el caso en que los datos se juntan aditivamente para obtener un total. De hecho, puede interpretarse como un valor que podría sustituir a cada uno de los datos para obtener la misma suma total, para el caso de la pendiente de la cuenca se calculará con la ecuación 2.3b

$$S_c = \frac{S_x + S_y}{2} \quad (2.3b)$$

donde

S_x pendiente de la cuenca en la dirección x

S_y pendiente de la cuenca en la dirección y

El promedio geométrico, es relevante cuando los datos se usan multiplicativamente para obtener un resultado. Es así que puede interpretarse como un valor que puede sustituir a cada dato para producir el mismo producto total.

El promedio geométrico sólo se aplica a números positivos y siempre resulta menor o igual que el promedio aritmético de los mismos, para el caso de la pendiente de la cuenca se calculará con la ecuación 2.3c

$$S_c = \sqrt{S_x S_y} \quad (2.3c)$$

donde

S_x pendiente de la cuenca en la dirección x

S_y pendiente de la cuenca en la dirección y

2.3.4 Elevación de una cuenca

La variación en elevación de una cuenca así como su elevación media, puede obtenerse fácilmente con el método de las intersecciones. El mapa topográfico de la cuenca se divide en cuadrados de igual tamaño considerando que por lo menos 100 intersecciones estén comprendidas dentro de la cuenca. La elevación media de la cuenca se calcula como el promedio de las elevaciones de todas las intersecciones.

Muchas veces conviene calcular en una cuenca la gráfica de distribuciones áreas-elevaciones, ver Figura 2.7. Esta gráfica se obtiene dibujando los porcentajes de área abajo o arriba de las distintas elevaciones. El empleo de porcentajes de área es conveniente cuando se desea comparar distribuciones de elevaciones en cuencas de diferentes tamaños.

La curva área-elevación se puede considerar como el perfil de la cuenca, y su pendiente media (en metros por kilómetro cuadrado) es de uso estadístico en comparación de cuencas.

Los datos para dibujar la curva área-elevación pueden obtenerse empleando un planímetro y con la ayuda del plano topográfico de la cuenca, se calcula el área encerrada entre las curvas de nivel y el parteaguas de esta. También se puede emplear el método de las intersecciones; en este se calcula el número de intersecciones correspondiente al intervalo de elevación escogido.

La elevación media de la cuenca puede calcularse de la curva área-elevación como la elevación que comprenda el 50 por ciento del área.

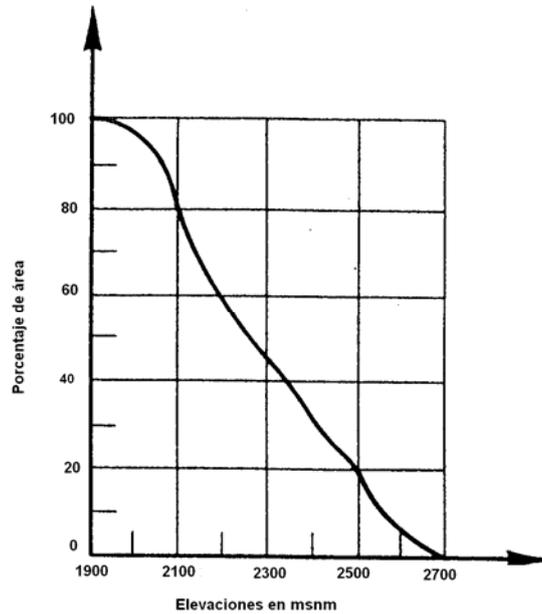


Figura 2.7 Distribución área - elevaciones de una cuenca (tomado de Springall 1970)

2.3.5 Red de drenaje

Otras características importantes de cualquier cuenca son las trayectorias o el arreglo de los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. La razón de su importancia se manifiesta en la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante. Por otra parte, la forma de drenaje proporciona indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

Las características de una red de drenaje pueden describirse principalmente de acuerdo con el orden de las corrientes, longitud de tributarios, densidad de corriente y densidad de drenaje.

a) Orden de las corrientes

Antes de hablar del orden de las corrientes, conviene ver su clasificación. Todas las corrientes pueden dividirse en tres clases generales, dependiendo del tipo de escurrimiento, el cual está relacionado con las características físicas y condiciones climáticas de la cuenca. Así, una corriente puede ser efímera, intermitente o perenne.

Una corriente efímera es aquella que solo lleva agua cuando llueve e inmediatamente después. Una corriente intermitente lleva agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en época de lluvias; su aporte cesa cuando el nivel freático desciende por abajo del fondo del cauce. La corriente perenne contiene agua todo el tiempo, ya que aun en época de sequía es abastecida continuamente, pues el nivel freático siempre permanece por arriba del fondo del cauce.

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. El procedimiento más común para esta clasificación es considerar como corrientes de orden uno, aquellas que no tienen ningún tributario; de orden dos a las que solo tienen tributarios de orden uno; de orden tres aquellas corrientes con dos o más tributarios de orden dos, etc., ver Figura 2.8. Así, el orden de la corriente principal indicará la extensión de la red de corrientes dentro de la cuenca. Para hacer esta clasificación se requiere de un plano de la cuenca que incluya tanto corrientes perennes como intermitentes.

b) Longitud de tributarios

La longitud de tributarios es una indicación de la pendiente de la cuenca, así como del grado de drenaje. Las áreas escarpadas y bien drenadas usualmente tienen numerosos tributarios pequeños, mientras que en regiones planas, donde los suelos son profundos y permeables, se tienen tributarios largos, los cuales generalmente, son corrientes perennes.

La longitud de los tributarios se incrementa como una función de su orden. También este arreglo sigue, aproximadamente, una ley de progresión geométrica. La relación no es válida para corrientes individuales.

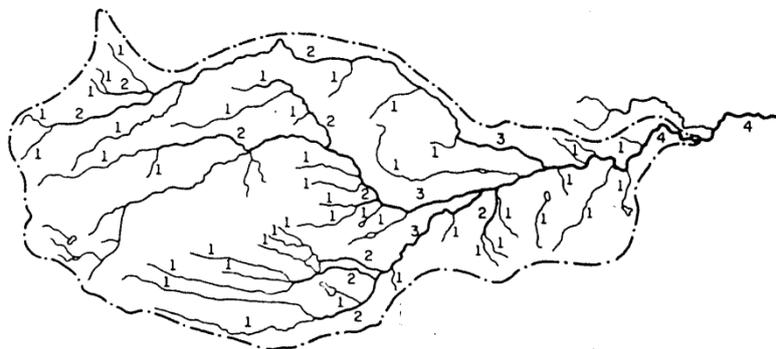


Figura 2.8 Orden de las corrientes de una cuenca (tomado de Springall 1970)

En general, la longitud de las corrientes, se mide a lo largo del eje del valle y no se toman en cuenta sus meandros. Además, la longitud que se mide consiste en una serie de segmentos lineales trazados lo más próximo posible a las trayectorias de los cauces de las corrientes.

c) Densidad de corriente

Se expresa como la relación entre el número de corrientes y el área drenada, se define como:

$$D_s = \frac{N_s}{A} \tag{2.4}$$

donde

D_s densidad de corriente, número de corriente por km^2

A área total de la cuenca, en km^2

N_s número de corrientes de la cuenca

Para determinar el número de corrientes solo se consideran las corrientes perennes e intermitentes. La corriente principal se cuenta como una desde su nacimiento hasta su desembocadura. Después se tendrán todos los tributarios de orden inferior, desde su nacimiento hasta la unión con la corriente principal, y así sucesivamente hasta llegar a los tributarios de orden uno.

Esta relación entre el número de corrientes y el área drenada no proporciona una medida real de la eficiencia de drenaje, pues puede suceder que se tengan dos cuencas con la misma densidad de corriente y estén drenadas en muy diferente forma, lo cual depende de la longitud de sus corrientes.

d) Densidad del drenaje

Esta característica proporciona una información más real que la anterior, ya que se expresa como la longitud de las corrientes por unidad de área, o sea que

$$D_d = \frac{L}{A} \tag{2.5}$$

donde

D_d densidad de drenaje por km

- A área total de la cuenca, en km²
- L longitud total de las corrientes perennes e intermitentes en la cuenca, en km

2.3.6 Pendiente del cauce

El perfil de un cauce se puede representar llevando en una gráfica los valores de sus distancias horizontales, medidas sobre el cauce, contra sus cambios de elevaciones respectivas. En general, la pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo dividido, por la longitud horizontal de dicho tramo, ver Figura 2.9, línea ab. Así

$$S = \frac{H}{L} \tag{2.6}$$

donde

- S pendiente del tramo de cauce
- H desnivel entre los extremos del tramo del cauce, en m
- L longitud horizontal del tramo de cauce, en m

La definición anterior se aproxima más a la pendiente real del cauce conforme disminuye la longitud del tramo por analizar. Una manera más real de valuar la pendiente de un cauce es compensándola, al aceptarla como la pendiente de una línea que se apoya en el extremo final del tramo por estudiar y cuya propiedad es contener la misma área abajo de ella como en su parte superior, respecto al perfil del cauce, ver Figura 2.9, línea bc.

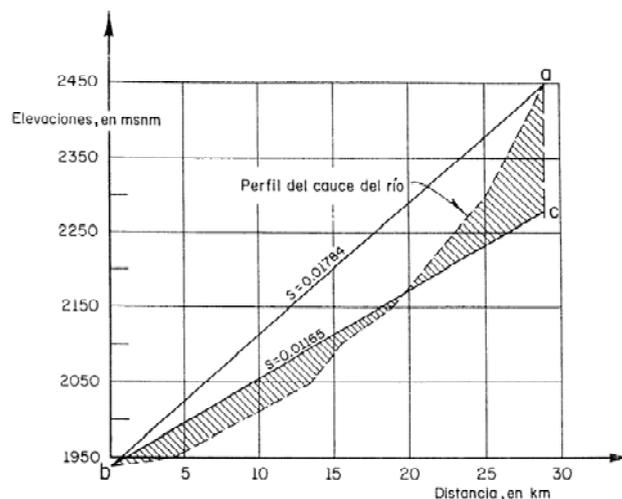


Figura 2.9 Ejemplo de obtención de la pendiente de una cuenca (tomado de Springall 1970)

Otra forma de valorar la pendiente, y que trata de ajustarse a la pendiente real, es usando la ecuación que proponen Taylor y Schwarz la cual se basa en considerar que el río está formado por una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de recorrido es igual a la del río.

Si se subdivide el río en estudio en m tramos iguales de longitud Δx , se tiene que el tiempo de recorrido t_i por tramo i es

$$t_i = \frac{\Delta x}{V_i}$$

donde

V_i velocidad media del tramo, la cual, de acuerdo con Chezy, se puede expresar como

$$V_i = C_i \sqrt{R_i S_i} = k \sqrt{S_i}$$

donde

k constante formada por $C_i \sqrt{R_i}$ siendo C_i el coeficiente de Chezy y R_i el radio hidráulico del tramo.

S_i pendiente del tramo i . De acuerdo con esto, el tiempo de recorrido será

$$t_i = \frac{\Delta x}{k \sqrt{S_i}} \quad (2.7)$$

Por otra parte, el tiempo total de recorrido es la suma de los tiempos parciales t_i además, se puede calcular de acuerdo con la ecuación 2.7 como:

$$T = \frac{L}{k \sqrt{S}} \quad (2.8)$$

donde

T tiempo total de recorrido, en s

k constante, en m/s

L longitud total del tramo de río en estudio, en m

S pendiente media del tramo de río estudio, con unidad adimensional

De las ecuaciones 2.7 y 2.8 al igualar el tiempo se tiene que

$$\frac{L}{k\sqrt{S}} = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta x}{k\sqrt{S_i}}$$

como $L = m \Delta x$, sustituyendo, simplificando y ordenando la expresión anterior, se encuentra que

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (2.9)$$

donde

S pendiente media del tramo en estudio

m número de segmentos iguales, en los cuales se subdivide el tramo en estudio

S_1, S_2, \dots, S_m pendiente de cada segmento, según la ecuación 2.6

La ecuación (2.9) tiende a una mayor aproximación cuanto más grande sea el número de segmentos en los cuales se subdivide el tramo de río por analizar.

Capítulo 3

MODELACIÓN FISIAGRÁFICA DE LA CUENCA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SONORA

En este capítulo se explicarán los pasos para obtener un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de una zona de interés, donde se requiera obtener sus características fisiográficas, así como las hidráulicas, hay que destacar que el modelo obtenido con los SIG deberá de compararse con los datos existentes, para una correcta identificación de errores que pueda generar el sistema.

3.1 Modelación fisiográfica de la cuenca con el Sistema de Información Geográfica Arc View GIS 3.2

Para la generación del modelo fisiográfico se utilizó el sistema de información geográfica Arc View GIS 3.2, siendo este sistema de gran ayuda para calcular las propiedades fisiográficas de una cuenca, teniendo al relieve, el área y la longitud de su cauce como las más importantes.

La influencia del relieve sobre la de respuesta de la cuenca es importante, dado que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades del agua en las corrientes y menor tiempo de concentración, es decir el tiempo en que una gota de agua tarda en llegar de las partes más alejadas de la cuenca al sitio de descarga.

El área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, y determina la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como son, por ejemplo, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc. El área de la cuenca se define como la proyección horizontal de la superficie de la misma y se puede medir directamente del mapa topográfico.

La longitud del cauce principal, se define como la distancia entre el nacimiento y la desembocadura del río de mayor orden.

Construcción del MDE

Para construir el MDE se utilizan mapas digitales topográficos vectoriales, escala 1:250.000 integrados en el sistema de información geográfica, ver Figura 3.1, y se construye a través de una interpolación tipo triangulación de Delaunay, ver Figura 3.2.

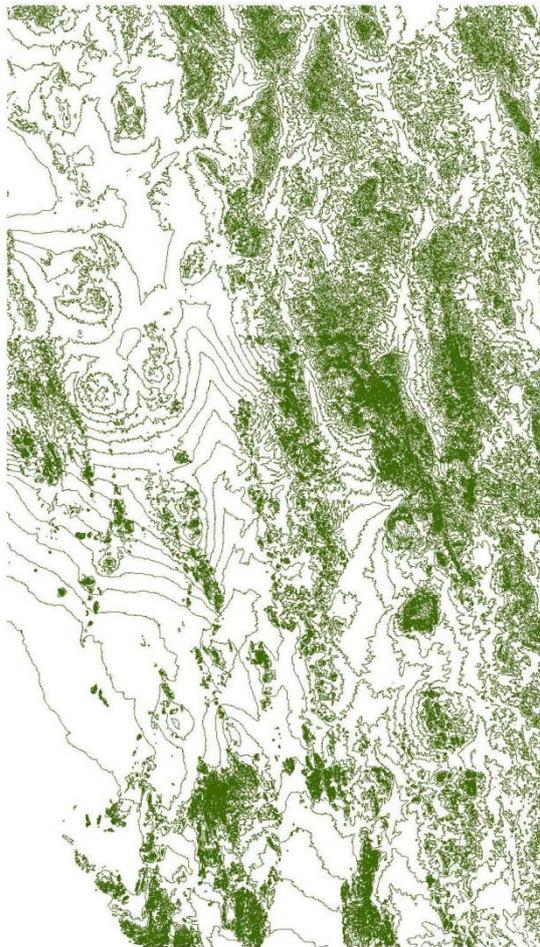


Fig 3.1 Mapa topográfico vectorial Esc 1:250 000

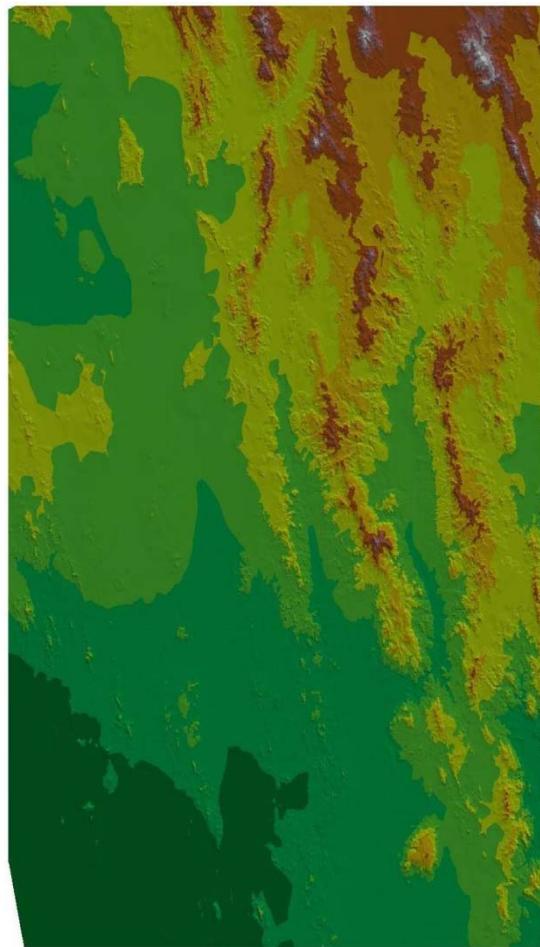


Fig. 3.2 TIN Triangulated irregular network modelo interpolado tipo vectorial

Para construir el MDE se utilizan mapas digitales topográficos vectoriales, escala 1:250 000 integrados en el sistema de información geográfica, ver Figura 3.1, y se inicia su construcción a través de una interpolación tipo triangulación de Delaunay, ver Figura 3.2.

El modelo resultante de esta interpolación se le llama TIN (triangulated irregular network), de este modelo vectorial obtendremos el modelo matricial o ráster a través de Arc View Gis 3.2, desde el menú Theme con el TIN seleccionado o resaltado, se seleccionará *Convert to Grid*, inmediatamente apareciendo la ventana de dialogo '*Conversion Extend: nombre del TIN*' en *Output Grid Extend* seleccionando el nombre *Same As nombre del TIN*, y en la misma ventana de dialogo *cell size**, el número o tamaño de celda, después dar clic en el botón *OK*.

Para la construcción del MDE del presente trabajo se determino el tamaño de celda de 100 m, teniendo en cuenta que los datos topográficos vectoriales están a cada 100 m, ver Figura 3.3.

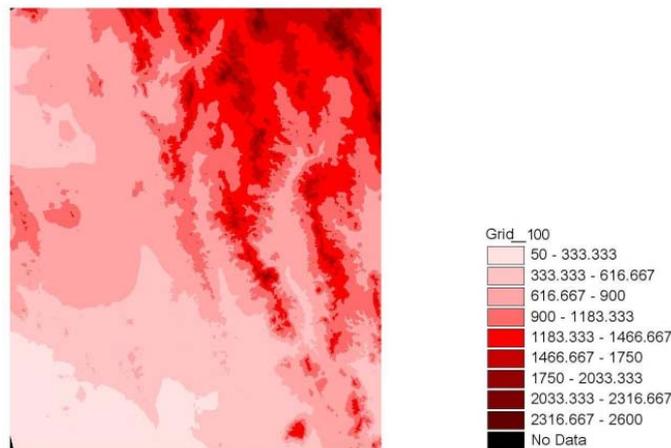


Fig. 3.3 Matriz regular con tamaño de celda de 100 m X 100 m

Una vez procesado el MDE, se procede a la generación del reacondicionamiento del terreno, llenado de las depresiones, dirección y acumulación de flujo, la red de drenaje y su umbral, el trazado de la cuenca y el orden de la corriente. Se explicarán de manera breve los procesos más importantes en la modelación de las cuencas de estudio, además de contar con Arc View GIS 3.2, también con las siguientes extensiones (scripts):

* Después de dar un valor a *cell size*, se le debe presionar la tecla *ENTER*, para que cambie los valores de *Number of Rows* y *Numer of Columns*, ya que si se le da inmediatamente clic al botón *OK*, lo hará con los valores dados por el programa.

Basin 1	Identificación de la red de drenaje y obtención de la subcuenca de aportación de la corriente seleccionada
Hydrologic Modeling v1.1(sample)	Llenado de las depresiones del terreno e identificación de subcuencas en toda la zona de estudio
Line Slope analyst Extension	Cálculo de la pendiente de la red de drenaje, por tramos
Hec-GeoHMSv1.1(simple)	Reacondicionado del MDE
Spatial Analyst,	Conversión de archivos a formato matricial “*.grd”
Xtools Extensión	Cálculo de áreas y perímetros, además de herramientas para manipular los archivos en formato “*.shp” en edición

Estas extensiones se pueden ver en la Figuras 3.4(a), 3.4(b), 3.4 (c) y 3.4(d).



Figura 3.4(a) Extensiones *Basin 1*, y *LineSlope analyst Extension*

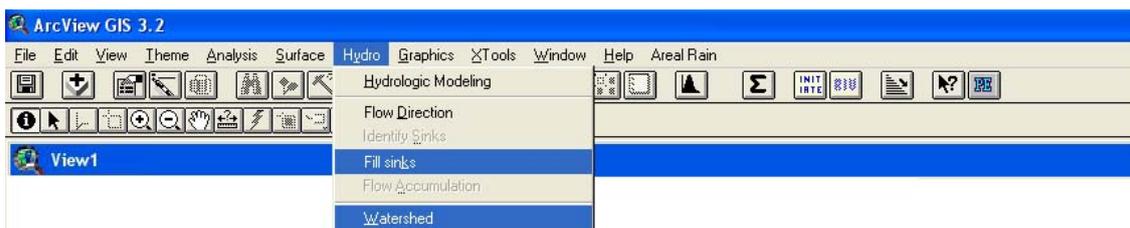


Figura 3.4(b) Extensión *Hydrologic Modeling v1.1(sample)* con las opciones *Fill Sinks* y *Watershed*.

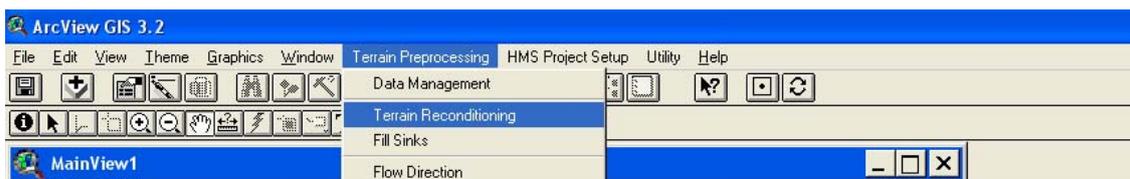


Figura 3.4(c) Extensión *Hec- GeoHMSv1.1(simple)* con la opción *Terrain Reconditioning*



Figura 3.4(d) Extensión *XTools Extension* para modificación de polígonos.

Las extensiones anteriores se pueden obtener de internet. Página de Environmental Systems Research Institute (www.arcscripts.esri.com).

Reacondicionamiento del terreno

El proceso Terrain Reconditioning es el reacondicionado del MDE, en otra palabras, es la modificación del MDE sobre poniéndole un mapa vectorial de ríos, este proceso realiza la elevación de las celdas del MDE que estén fuera de las corrientes. Como resultado se tendrá un nuevo MDE reacondicionando al mapa vectorial de ríos.

Previo al reacondicionamiento del terreno, se deben trabajar los valores del MDE en números enteros (integer), los pasos en Arc View 3.2 para hacer esta transformación serán los siguientes:

- Desde el View donde se creó el MDE con el número de 100 celdas, en el menú File, con el grid prendido, se seleccionará *Export Data Source*, apareciendo la ventana de dialogo '**Export File Type**' en *Select export file type*: se seleccionará *ASCII RASTER*, después dar *OK*
- Con la ventana de dialogo '**Export Grid**', se busca el archivo tipo Grid que exportaremos con el código ASCII, después con la ventana de dialogo '**Export File: Nombre del archivo**' en *File Name* se le asignará un nuevo nombre al grid con terminación **asc*, así como la ubicación donde se le exportará
- De nuevo desde el View, en el menú File con el grid prendido, se seleccionará *Import Data Source*, apareciendo la ventana de dialogo '**Import File Type**' en *Select import file type*: se seleccionará *ASCII RASTER*, después dar *OK*
- Con la ventana de dialogo '**Import ASCII Raster Files**', se busca el archivo tipo Grid que importaremos con el código ASCII, es decir con la terminación **asc*, después con la ventana de dialogo '**Output Grid: Nombre del archivo**' en *Grid Name* se le asignará un nuevo nombre al grid, así como la ubicación donde se le importará, Luego en la ventana de dialogo '**Import grids: Nombre del archivo**' en *Cell values as integers?* dar clic en el botón *Yes*

- Del menú de proyecto, se abrirá un MainView donde se pegará el MDE procesado, así como el mapa vectorial de ríos de la zona de interés
- Con el menú **Terrain Preprocessing** se seleccionará *Terrain Reconditioning*, ver Figura 3.4 c
- Con la ventana de dialogo '*DEM reconditioning (Agree)*', se definirán los campos de '*Vector buffer (cells)*', '*Smoth drop/raise*' y '*Sharpdrop/raise*', después dar clic en *OK*
- Con la ventana de dialogo '*DEM reconditioning (agree)*', en el campo *Raw DEM* se definirá el MDE y en el campo *AgreeStream* se definirá el mapa vectorial, dar clic en *OK*
- Después de procesado el nuevo MDE, se pegará en el View donde generamos nuestro MDE para continuar con el llenado de depresiones

Llenado de las depresiones del terreno

Después de la obtención del MDE se continua con el proceso Fill Sinks que es el llenado de huecos (pits). La creación de un MDE genera errores debido a la interpolación realizada, estos errores son los huecos en el terreno.

Un hueco es un conjunto de una o más celdas que no tiene celdas contiguas aguas abajo. Si este proceso no se llevara a cabo los huecos se convertirían en pozos que darán origen a áreas aisladas dentro de la cuenca, ver Figura 3.5.

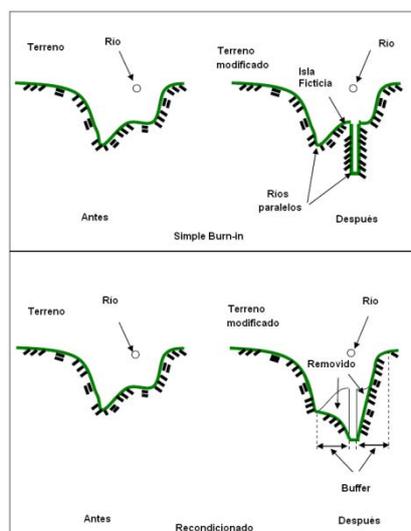


Fig. 3.5 Esquema de reacondicionamiento del terreno

Cuando existen zonas muy planas, el algoritmo del programa para identificar la dirección del flujo tiene problemas para encontrar por dónde fluye el escurrimiento.

Para esos casos es necesario ejecutar una subrutina, incluida en el mismo programa, que trata de identificar aquellas celdas que no cuentan con drenaje (por encontrarse a una menor elevación que las de su alrededor). En Arc View GIS 3.2 se emplearon los pasos siguientes:

- Del menú **Hydro** seleccionar *Fill sinks*, (ver Figura 3.4 b) asegurándose que el tema que contiene los datos topográficos esté activado. Como resultado se obtiene un tema (MEDbis), que es un MED pero modificado al haberse realizado la depresión de algunas celdas para definir la dirección del flujo
- Para observar las celdas deprimidas del menú **Hydro** seleccionar *Identify sinks*. Ver Figura 3.5

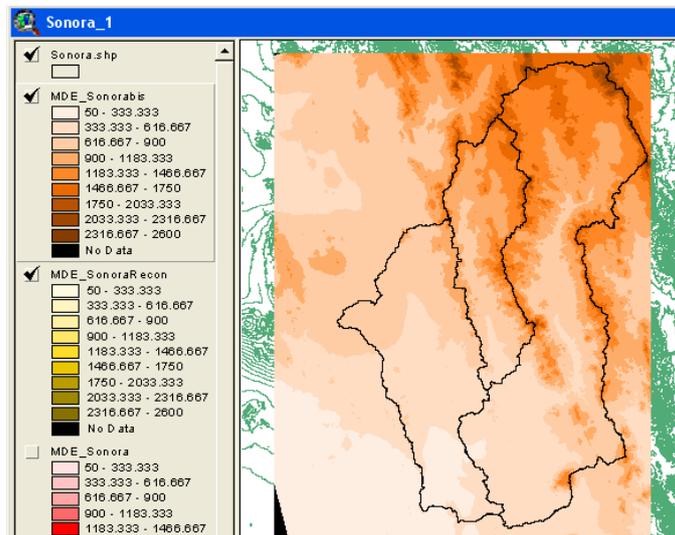


Figura 3.5 MDE después del proceso Fill sinks.

Dirección y acumulación de flujo

El proceso **Flow Direction** identifica la dirección aguas abajo desde cada celda, considerando en el entorno de la celda en ocho direcciones posibles (Figura 3.6), asignará aquella que tenga la mayor pendiente:

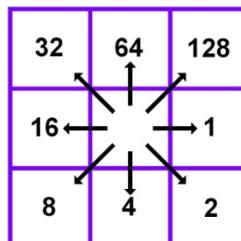
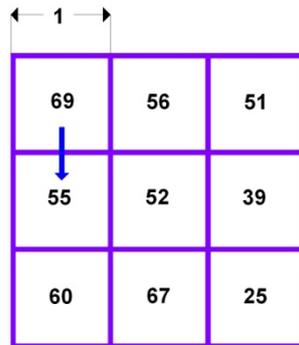


Figura 3.6 Direcciones de flujo

Dando un valor unitario a cada celda se presentan los ejemplos siguientes en donde se puede observar la dirección del flujo en los casos siguientes:

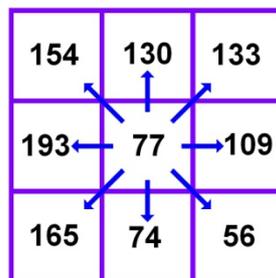
Caso 1



Pendiente entre celda 69 a celda 56: $(69-56)/1 = 13$
 Pendiente entre celda 69 a celda 52: $(69-52)/1.4141 = 12.0208$
 Pendiente entre celda 69 a celda 44: $(69-55)/1 = \underline{14}$

Aunque la celda con el ascenso más bajo es la celda con un valor de 52, la dirección de circulación de celda 69 es hacia la celda 55, porque tiene la mayor pendiente.

Caso 2



Pendiente entre celda 77 a celda 109: $(77-109)/1 = -32$
 Pendiente entre celda 77 a celda 56: $(77-56)/1.4141 = \underline{14.85}$
 Pendiente entre celda 77 a celda 74: $(77-74)/1 = \underline{3}$
 Pendiente entre celda 77 a celda 165: $(77-165)/1.4141 = -62.23$
 Pendiente entre celda 77 a celda 193: $(77-193)/1 = -116$
 Pendiente entre celda 77 a celda 154: $(77-154)/1.4141 = -54.44$
 Pendiente entre celda 77 a celda 130: $(77-130)/1 = -53$
 Pendiente entre celda 77 a celda 133: $(77-133)/1.4141 = -39.60$

Realizando estas operaciones para cada elemento de la malla se tiene como resultado la dirección de todas las componentes de la malla, ver Figura 3.7.

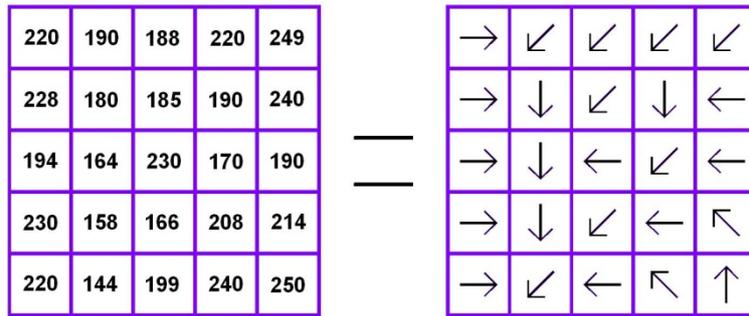


Figura 3.7 Dirección de cada celda o nodo de la malla

Dichas celdas al conectarse conforme a la dirección del flujo, permiten obtener de la malla la acumulación del flujo.

La red de drenaje y los límites de las subcuencas se determinan usando un valor de umbral de acumulación definido por el usuario (Flow Accumulation); ya sea en unidades cuadradas o un número de celdas.

Esto significa el número de celdas que se aportan a un flujo en una dirección determinada formando la red de drenaje, como se muestra en la Figura 3.8.

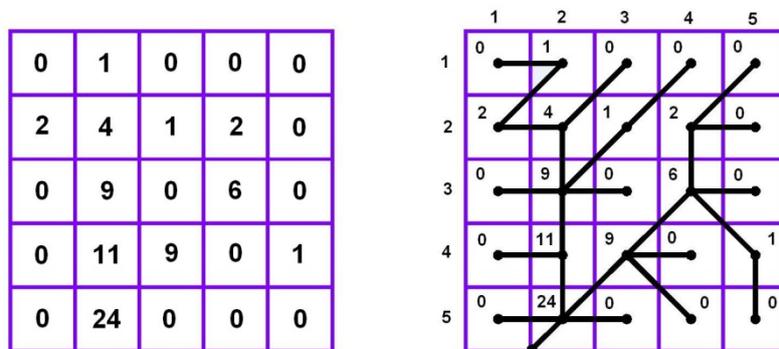


Figura 3.8 Definición de la red a partir de la dirección del flujo

En Arc View GIS 3.2 para obtener la dirección y acumulación del flujo se propusieron los pasos siguientes:

- Con el MED bis activado, seleccionar el icono *initiate*
- Con la ventana de dialogo '**Flow Direction Grid**', en *Make a Choice*: seleccionar *Create from the Elevation Grid*, luego dar click en el botón OK

- Con la ventana de dialogo '**Load a GRID**', en *Shall we add the Flow Direction Grid into the View*, dar clic en el botón *Yes*
- Con la ventana de dialogo '**Flow Accumulation Grid**', en *Make a Choice: seleccionar Create from the Flow Direction Grid*, luego dar clic en el botón *OK*
- Con la ventana de dialogo '**Load a GRID**', en *Shall we add the Flow Accumulation Grid into the View*, dar clic en el botón *Yes*, ver Figuras 3.9 y 3.10

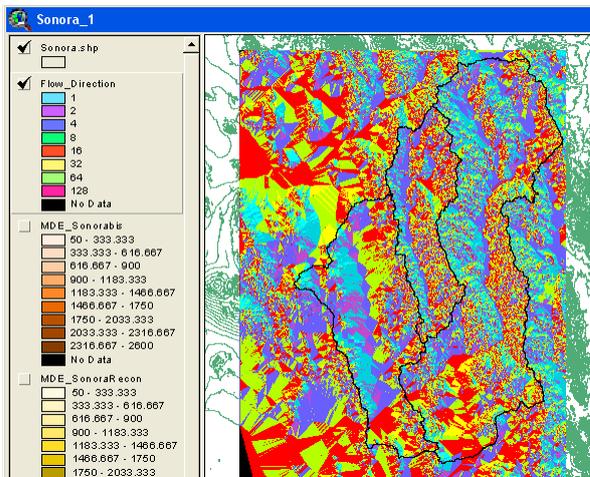


Figura 3.9 Dirección del flujo

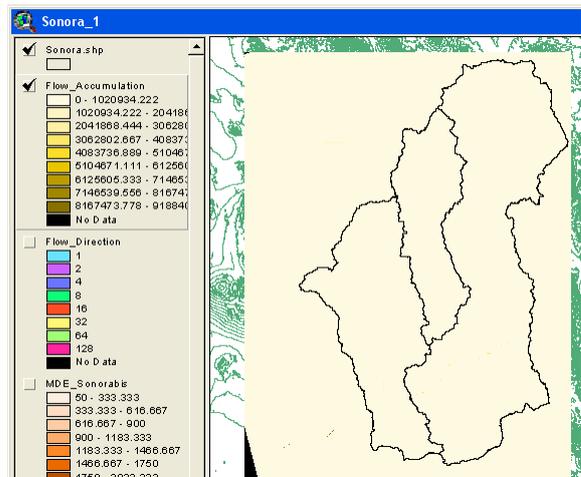


Figura 3.10 Acumulación del flujo

Red de drenaje del río y su umbral de celdas

Como se mencionó anteriormente, el umbral auxiliará para obtener la red de drenaje y límites de subcuencas como las que se requiere, cabe aclarar que se puede asignar diferentes valores de umbral para la red de estudio, umbrales pequeños resultan redes de flujo densas y un gran número de subcuencas delineadas.

En Arc View GIS 3.2 para obtener la red de drenaje del río, se propusieron los pasos siguientes:

- Seleccionar el icono *RIV (StreamNetwork)*.
- Con la ventana de dialogo '*Stream Network*', en *Specify the cellflow accumulation threould to create stream Network*: escribir el valor para el umbral, luego dar clic en el botón *OK*.

- Con la ventana de dialogo '*Choose the Stream Ordering method:*', dar clic en el botón *Yes* para seleccionar el ordenamiento de la red de drenaje de Horthon-Strahler
- Con la ventana de dialogo '*Stream Network-Save As*', en *Directories:* buscar la carpeta de trabajo. En *File name:* dar un nombre al tema de la red de drenaje (*.shp)
- Seleccionar el icono *LineSlope*, para obtener las pendientes de la red de drenaje
- De la ventana de diálogo '*Select*', en *Select the line theme for which you want to calculate slope*, seleccionar el tema correspondiente a la red de drenaje, luego dar clic en el botón *OK*
- De la ventana de diálogo '*Select*', en *Select the surface theme*, seleccionar el tema correspondiente al MEDbis. Dar clic en el botón *OK*, ver Figura 3.11

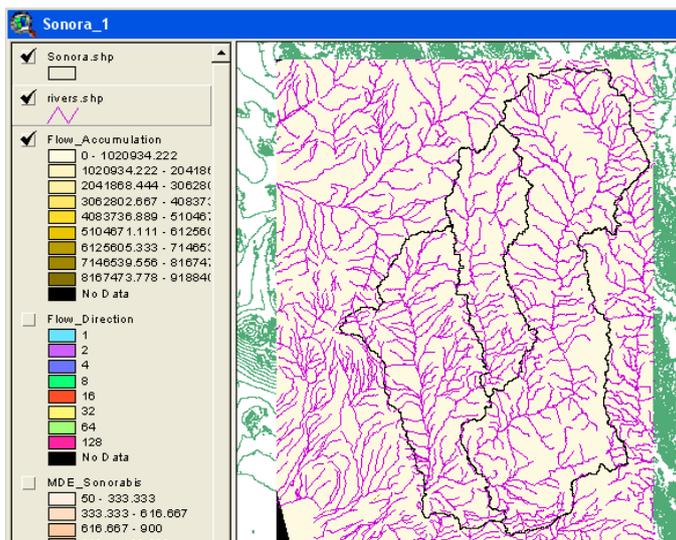


Figura 3.11 Obtención de la red de drenaje.

Recorte de la red de drenaje

Este procedimiento es para definir la zona de interés de la red de drenaje del río, a partir de un área de interés. En Arc View GIS 3.2 para obtener el recorte de la red de drenaje del río, se utilizaron los pasos siguientes:

- Del menú **Xtools** seleccionar la opción *Clip With Polygon(s)*
- Aparecerá una caja de dialogo llamada: '*Clip! SELECT INPUT THEME*' y, para la opción *Select the theme that contains features that you wish to clip*, seleccionar el archivo shape (*.shp) que contiene a la red de drenaje, luego dar clic en el botón *OK*.

- Nuevamente aparece la caja de dialogo '**Clip! SELECT INPUT THEME**', esta vez con la opción *Select the polygon theme that will be used to clip features from the previous theme*, deberá seleccionar el archivo *shape (*.shp)* que contiene los polígonos que delimitan la zona de interés, luego dar clic en el botón *OK*.
- En la ventana '**Name output theme**', ubicar el directorio de trabajo y asignar el nombre al archivo de resultado que contendrá la red de drenaje modificada
- Del lado izquierdo de la pantalla, aparecerá un nuevo tema con el nombre asignado previamente, ver Figura 3.12

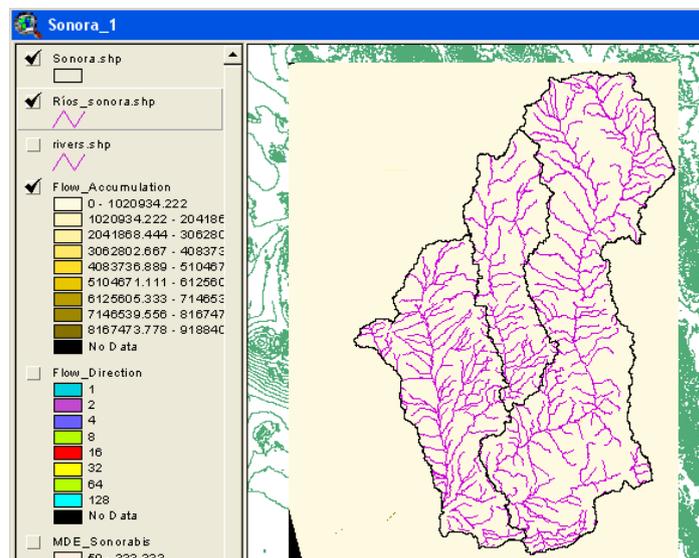


Figura 3.12 Red de drenaje recortada.

Nota: Para hacer el recorte de la red de drenaje o cualquier objeto es necesario que esté en formato shape (.shp.)

Definición del orden de las corrientes

La ventaja del SIG Arc View GIS 3.2 es que al obtener la red de drenaje con el ícono *RIV* y haber seleccionado el ordenamiento *Horton-Strahler*, la tabla asociada con este tema *Attributes of red de drenaje.shp*, incluye una columna donde está definido el orden de cada corriente, por lo que sólo deberá indicársele al programa cómo debe presentar los resultados.

- Doble clic sobre el tema que contiene la red de drenaje (Red de drenaje.shp)
- A continuación aparece una ventana de dialogo llamada '*Legend Editor*'. Sobre la opción *Legend Type*, seleccionar *Unique Value*

- A continuación aparece otra ventana de dialogo llamada '*Values Field*'. En esta deberá seleccionarse la opción *Order*
- Acto seguido aparecerán todos los órdenes de corriente existentes en el tema

Para una mejor visualización, cambiar el grosor de cada orden de modo que a mayor orden mayor grosor. Esto se consigue haciendo doble clic sobre el símbolo de la corriente y seleccionando en *size* 1, 2, 3, etc., ver Figura 3.13.

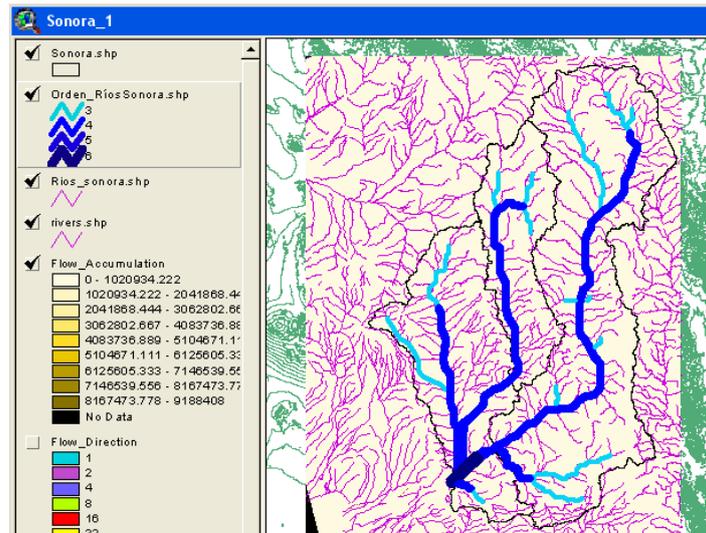


Figura 3.13 Orden de la Red de drenaje

Parteaguas

A partir de realizar todos los pasos del procesamiento del terreno, podremos obtener las líneas divisorias de la cuenca y las subcuencas, así como el punto de salida de esta. En Arc View GIS 3.2 los pasos para obtener el parte agua fueron los siguientes

- Seleccionar el icono *BAS (BasinDelineate)*, y con el puntero del *mouse* (círculo con un punto en el centro) dar clic sobre la red de drenaje en la salida de la cuenca. A partir de este punto hacia aguas arriba se delinearán el parteaguas de la cuenca
- De la ventana de dialogo '*Analysis extent*', en *Shall we analice*: dar clic en *Yes*
- De la ventana de dialogo '*Drainaje Basin-Save As*', en *Directories*: buscar la carpeta de trabajo. En *File name* poner nombre al tema de parteaguas (*.shp)
- De la ventana de dialogo '*Drainage Basin Characteristics*', en *Shall we derive Basin characteristics from the Grid?*, dar clic en el botón *Yes*, ver Figura 3.14

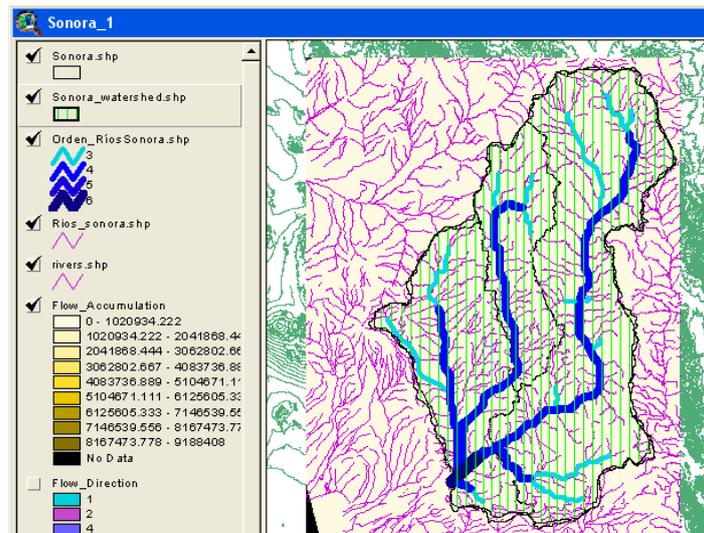


Figura 3.14 Obtención del parteaguas

Subcuencas

En ocasiones una cuenca cuenta con un orden elevado de corriente, por lo que es conveniente separar a la cuenca en diferentes áreas llamadas subcuencas con orden menor, esto facilitará su estudio. En Arc View GIS 3.2, los pasos para obtener las subcuencas fueron los siguientes:

- Con el tema Acumulación de flujo seleccionado , del menú **Hydro**, seleccionar *Watershed*
- Con la ventana de dialogo '*Watershed*', en la casilla *Enter the minimum number of cells for a watershed*: escribir el valor del umbral (es **importante** que el umbral especificado aquí sea el mismo que el indicado para generar la red de drenaje, debido a que así las subcuencas obtenidas corresponderán a la red de drenaje previamente definida), dar clic en el botón *OK*
- Con la ventana de dialogo '*Hydro.Watershed*', en *Select the flow direction grid theme*, seleccionar el tema correspondiente a la dirección de flujo, dar clic en el botón *OK*
- Con el tema watershed seleccionado, del menú Theme, seleccionar *Convert to Shapefile...*
- De la ventana de dialogo '*Convert watersheds*', en *Directories*: buscar la carpeta de trabajo. En *File name*, poner nombre al tema de subcuencas(*.shp)
- En la ventana de dialogo '*Convert to Shapefile*', en *Add shapefile as theme to the view*:, dar clic en *Yes*

- Del menú Xtools, seleccionar Update Area, Perimeter, Acres, and Length
- De la tabla '*CALCULATE FEATURE SIZE*', en *Select Themes to Calculate Feature Size*, seleccionar el tema correspondiente a las subcuencas calculadas, dar clic en el botón *OK*, ver Figura 3.15

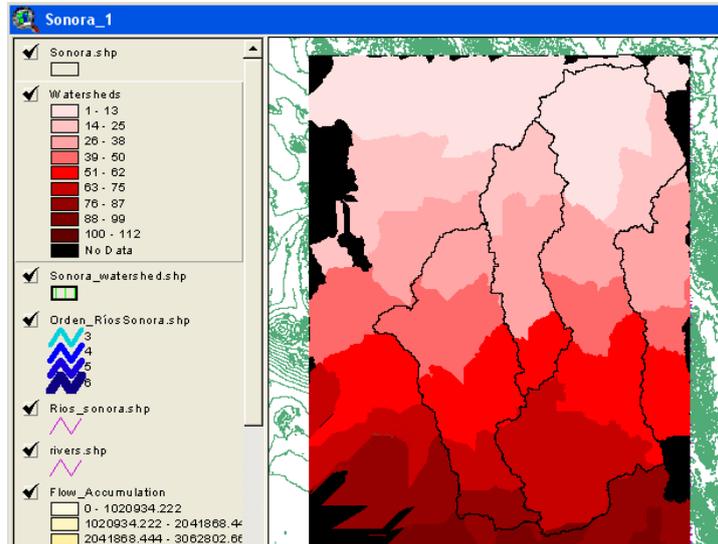


Figura 3.15 Obtención de parteaguas

El resultado es un proyecto en el que se integra solo la cuenca de interés y subcuencas, es decir su parteaguas y junto a él sus datos fisiográficos, ver figura 3.16

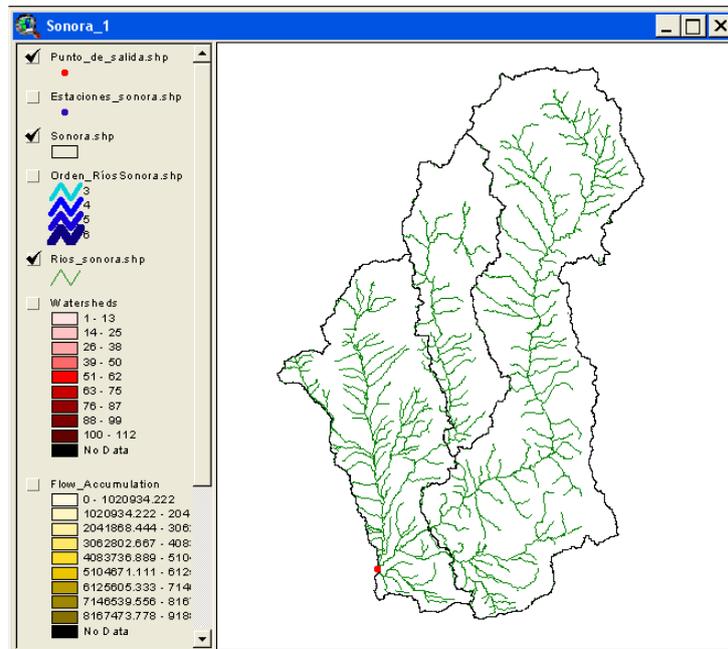


Figura 3.16 Generación del proyecto para la cuenca de interés

3.2 Recopilación de la información espacial

Para la generación de la fisiografía de la cuenca se utilizaron los siguientes datos:

1. Datos en formato digital:

Escala de los mapas 1:250,000

2. Datos en formato analógicos (papel)

Escala de los mapas: 1:1000,000

3. Cartas topográficas y de Hidrología Superficial.

Tabla 3.1 Datos fisiográficos disponibles (INEGI)

TEMA	Cartas INEGI					
	H1205	H1206	H1208	H1209	H1211	H1212
Escala 1 : 250 000						
Topográfica	1997	1997	1997	1997	1997	1997
Hidrología superficial	1997	1997	1997	1997	1997	1997

3.3 Ubicación de la zona de estudio

El río Sonora se localiza en la zona septentrional del estado de Sonora en la región hidrológica Sonora Sur (RH-9) siendo esta región la que abarca mayor superficie en Sonora, Su cuadrante de ubicación es 28° 10' a 31°20' Latitud Norte y 109° 45' a 111°42' Longitud Oeste.

La topografía es accidentada exceptuando la zona costera, que es la parte baja de la cuenca, así como la del afluente del río Zanjón.

El río Sonora, inicia su recorrido cerca del municipio de Cananea, con rumbo general al sur hasta la capital estatal con un recorrido de 276.95 Km y una pendiente de 0.34% hasta la presa Abelardo L. Rodríguez. Aguas abajo de ésta, el río se torna indefinido tendiendo a desembocar en el estero Tastiota del golfo de California, en su mayor parte lo que escurre en la costa de Sonora se infiltra en las zonas arenosas.

La regulación y aprovechamiento de los escurrimientos superficiales en la cuenca del río Sonora se realizan mediante la operación de cuatro presas: General Ignacio Pesqueira (El Yeso), situada sobre el arroyo El Yeso afluente del río San Miguel, que a su vez es tributario del río Sonora; Teopari, sobre el arroyo La Junta, afluente del río Sonora; Rodolfo Félix Valdés (El Molinito), sobre el río Sonora; y Abelardo Rodríguez Luján (Hermosillo), en la confluencia del río San Miguel y el río Sonora.

La modelación fisiográfica de la cuenca del río Sonora se realizó con ArcView 3.2 y con ayuda de la extensión HEC-GeoHMS v.1.1

Se contaron con datos vectoriales, escala 1: 250,000 de la carta topográfica del INEGI, de los cuales se realizó una interpolación tipo triangulación de Delaunay, el modelo resultante es un triangulated irregular network (TIN), a través de este se generó un MDE con un mallado de 100 m de celda.

Se utilizó la carta topográfica para corregir aquellos ríos ubicados en zonas de planicie (Tabla 3.2), que el modelo no puede representar, debido a que la escala es grande y requiere de más curvas de nivel. Lo que se hizo es elevar las celdas del MDE que estén fuera de las corrientes, este proceso recibió el nombre de Terrain Reconditioning

Las cartas topográficas son datos vectoriales escala 1:250,000, con intervalos entre curvas de nivel de 100 m, proporcionados por el INEGI.

Tabla 3.2 Metadatos de la Información cartográfica

ESCALA:	1:250,000
DIMENSIONES:	DOS DIMENSIONES
PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA:	UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR (UTM).
SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA:	NAD27
UNIDADES:	METROS
TIPO DE DATOS:	VECTORIAL

Se determinó como punto de salida de la cuenca, en el caso particular de la cuenca del río Sonora se indicó como la salida la presa Abelardo L. Rodríguez, ubicada en las coordenadas geográficas 21° 03'30'' Latitud Norte y 103° 23'50'' Longitud Oeste, teniendo un área de la cuenca del río Sonora de 21204.92 km².

Las características fisiográficas de la cuenca y del cauce principal se realizaron tomando en cuenta al río San Miguel de Horcacitas que es tributario al río Sonora:

Tabla 3.3 Características fisiográficas de la cuenca y del cauce principal

Características fisiográficas de la cuenca y del cauce principal			
Cuenca	Área (Km ²)	Longitud (km)	Pendiente (decimales)
Río San Miguel	9523.37	213.856	0.00366
Río Sonora	11680.58	276.708	0.00342

Capítulo 4

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA

4.1 Precipitación

La definición de precipitación “es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico proveniente de la atmósfera” (Springall), siendo un fenómeno discontinuo, por tanto no se puede hablar de su variación diaria.

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense, y con esta condición se provoca la precipitación.

Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la *elevación convectiva*, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica; la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la *elevación frontal* donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal.

4.1.1 Tipos de precipitaciones

En general, las nubes se forman por el enfriamiento del aire por debajo de su punto de saturación. Este enfriamiento puede tener lugar por varios procesos que conducen al ascenso adiabático con el consiguiente descenso de presión y descenso de temperatura. La intensidad y cantidad de precipitación dependerán del contenido de humedad del aire y de la velocidad vertical del mismo. De estos procesos se derivan los diferentes tipos de precipitación.

Precipitación convectiva

Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, se enfría, se condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, origen de las precipitaciones en forma de chubascos o tormentas. El ascenso de la masa de aire se debe, generalmente, a un mayor calentamiento en superficie. Las zonas afectadas son principalmente áreas pequeñas del orden de 25 a 50 kilómetros cuadrados, su intensidad varía entre lloviznas ligeras y aguaceros, dependiendo de la temperatura y humedad. Estas tormentas se originan en tiempo cálido y pueden estar acompañadas de relámpagos, truenos y vientos locales.

Precipitación orográfica

Es aquella que tiene su origen en el ascenso de una masa de aire, forzado por una barrera montañosa. Este tipo de lluvia es originada por el enfriamiento y condensación del vapor de agua en las masas de aire que al enfrentarse a un ladera ascienden, el efecto orográfico no supone más que el mecanismo de disparo de la inestabilidad convectiva.

La precipitación es mayor a barlovento, disminuyendo rápidamente a sotavento esto produce que se enfríe y origina en forma de líquida o nieve. En las cadenas montañosas importantes, el máximo de precipitación se produce antes de la divisoria o parteaguas. A veces, con menores altitudes, el máximo se produce pasada ésta, debido a que el aire continúa en ascenso. Estas lluvias son muy irregulares en importancia y localización.

Precipitación ciclónica

La precipitación ciclónica está asociada al paso de ciclones tropicales. Es producida por el levantamiento del aire por convergencia de la masa de aire en una zona de baja presión, se divide en dos tipos: frontal y por convergencia.

La precipitación frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión, asociándose a un frente frío o a un frente cálido.

En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío, dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos

que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo. Generalmente la precipitación del frente frío es de tipo tormentoso, extendiéndose poco hacia delante del frente.

En los frentes cálidos el aire caliente asciende con relativa suavidad sobre la cuña fría, en general de escasa pendiente, dando lugar a una nubosidad más estratiforme que en el frente frío y, por lo tanto, a lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad instantánea.

La precipitación por convergencia puede ocurrir donde exista una depresión barométrica y se produce cuando la tendencia del aire húmedo converge al centro del ciclón.

4.1.2 Medición de la precipitación

La precipitación se mide en términos de una altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, registrando su altura. Los aparatos de medición se clasifican de acuerdo con los tipos de registro de la precipitación en pluviómetros y pluviógrafos.

La medición de los pluviómetros consiste en que la medición de la lluvia se medirá por la cantidad de milímetros que alcanzaría el agua en el suelo perfectamente horizontal que no tuviera ningún tipo de infiltración o pérdida.

La medición de los pluviógrafos consiste del registro de manera continua de cantidades de precipitación, los registros definen la cantidad de precipitación y el tiempo en el que transcurrió, con estos valores es posible analizar la distribución de la lluvia en el tiempo y calcular su intensidad.

4.1.3 Cálculo de la precipitación media

Para conocer la precipitación media de una tormenta en toda la cuenca, se requiere de mediciones en varias estaciones localizadas tanto dentro de ella como en su vecindad. Una estación se considera vecina siempre y cuando su distancia al parteaguas sea pequeña.

Existen tres procedimientos para determinar esta precipitación, los cuales se mencionan a continuación.

Promedio aritmético

Es igual a la media aritmética de las alturas de precipitación, es decir, consiste en sumar la altura de precipitación registrada en cada una de las estaciones y dividirla entre el número total de éstas

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{4.1}$$

donde

- \bar{P} precipitación media, en mm
- P_i precipitación registrada en la estación i , en mm
- n número de estaciones

Este método no considera la distribución de las estaciones en la cuenca por lo que resulta limitado su uso, sobre todo cuando no se dispone de muchas estaciones.

Método de Thiessen

Para la aplicación de este criterio se requiere señalar la ubicación de las estaciones en la cuenca y delimitar el área de influencia de cada una de ellas por medio de polígonos. Para dibujar los polígonos, primero se trazan triángulos, los cuales se forman al ligar con rectas las estaciones más próximas entre sí y después se marcan las medianas de los lados de los triángulos que son las que van a formar los polígonos; las áreas limitadas por los polígonos que rodean a cada estación o por éstos y el parteaguas de la cuenca corresponden al área de influencia de la estación, ver Figura 4.1.

Para obtener la precipitación media se utiliza la ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (P_i a_i) \tag{4.2}$$

donde

- P_i precipitación en la estación i , en mm
- a_i área del polígono de la estación i , en km^2
- A área total de la cuenca, en km^2

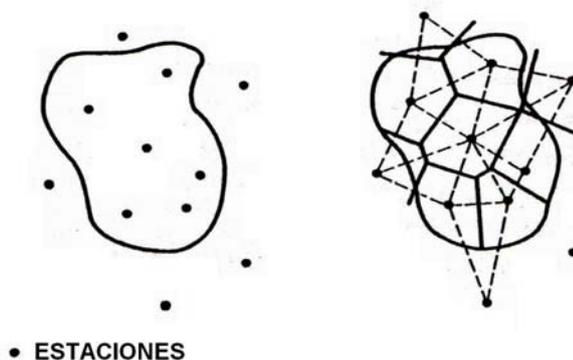


Figura 4.1 Polígonos de Thiessen (tomado de Fuentes y Franco 1999)

En este criterio se intenta toma en cuenta la distribución de la lluvia en la cuenca, pero puede tener limitaciones si las estaciones no están bien repartidas en toda la cuenca o existen algunas con áreas de influencia mucho más grandes a las del resto. Otra desventaja es que al usar líneas rectas para unir a las estaciones se obliga a que la variación de la lluvia entre ellas sea lineal.

Método de isoyetas

Para aplicarlo se requiere un plano con la localización de las estaciones, en cada una de ellas se anota el valor de la precipitación y se trazan las curvas de igual precipitación, denominadas isoyetas, ver Figura 4.2. El dibujo de las isoyetas es semejante al que se realiza en topografía para definir las curvas de nivel del terreno.

La ecuación que se emplea en este método es:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (\bar{P}_i a_i) \tag{4.3}$$

donde

- \bar{P}_i precipitación promedio entre dos isoyetas consecutivas, mm
- a_i área limitada entre dos isoyetas consecutivas o entre una isoyeta y el parteaguas de la cuenca, en km²
- A área total de la cuenca en km²

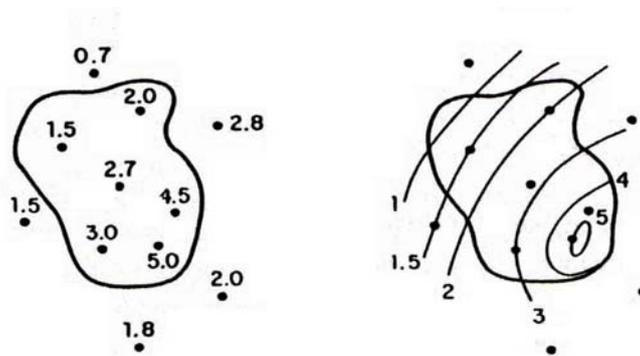


Figura 4.2 Plano de isoyetas (tomado de Fuentes y Franco 1999)

4.2 Factor de reducción por área (FRA)

El factor de reducción por área es un coeficiente que sirve para transformar precipitaciones puntuales que se presentan en una zona determinada en precipitaciones medias en un área (Precipitación de área).

La necesidad de utilizar factores de reducción por área se deriva por el ajuste de funciones de distribución de probabilidad a los datos de precipitación máxima anual por separado de cada estación que influye en el área de estudio y los periodos de retorno seleccionados extrapolados.

Tomando en cuenta que existirán precipitaciones que no se presentan con regularidad y no se toman en cuenta para la precipitación máxima anual, entonces la falta de regularidad de estas precipitaciones se acentúa conforme el área considerada para la tormenta es mayor.

Dicho problema puede evitarse utilizando factores de reducción por área.

Este factor define la magnitud de la altura de lluvia como una función del área donde ocurre y se utiliza cuando se desea conocer la precipitación media de la cuenca.

Para calcular las precipitaciones en un área determinada se tiene la ecuación siguiente:

$$P_a = FRA \times P_p \quad (4.4)$$

donde

- P_a precipitación areal en la zona de duración en estudio, en mm
- FRA factor de reducción que se encuentra en función de la duración de la lluvia, área de interés y período de retorno
- P_p precipitación media de los valores puntuales para el área y duración en interés, en mm

El concepto del FRA surge en los Estados Unidos por Hersfield en 1962 (US Weather Bureau 1958), este investigador determinó dos tipos de factor de reducción, el de centro de tormenta, y el de área geográfica fija, teniendo a continuación se hace una breve descripción de cada uno:

Centro de tormenta. Si el área de estudio se ubica de modo tal que el valor máximo de lluvia puntual registrado quede en medio de ella, el factor de ajuste se calcula mediante la expresión

$$FRA = \frac{P'}{P} \quad (4.5)$$

donde

- P' precipitación medía máxima en la cuenca para una determinada duración, en mm
- P precipitación máxima puntual para la misma tormenta y duración para la que se calculó P' , en mm

Por otra parte, los estadísticos o de área geográfica fija (fixed – área) se obtienen al utilizar registros de lluvias máximas y generar tormentas de diseño a partir de ellos. La ecuación propuesta es

$$FRA = \frac{P_2}{P_3} \quad (4.6)$$

donde

- P_2 precipitación máxima para una duración y área dadas, en mm
 P_3 precipitación puntual máxima anual sobre toda el área para la misma duración para la cual se obtuvo P_2 , en mm

4.3 Criterios de cálculo

A partir de la década de los sesentas se desarrollaron varios criterios para calcular el factor de reducción por área, utilizando datos puntuales para un área y duración determinada.

Existen los datos de tipo empírico y teórico- práctico. Los empíricos relacionan precipitaciones areales con puntuales, los teóricos siguen una ley de probabilidad y se establecen a partir de fundamentos teóricos y finalmente los teóricos – prácticos son una combinación de los dos anteriores, ver Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Métodos para calcular el FRA

Métodos para determinar el factor de reducción por área (FRA)	Empíricos	U.S. Weather Bureau (1958)
		Nerc (1975)
		Bell (1976)
		Desbordes- Raous-Trévosl(1984)
	Teóricos	Roche (1963)
		Rodríguez Iturbe y Mejía (1974)
		Nguyen-Rousselle-McPherson (1980)
		Asquith_famiglietti (2000)
	Teórico-prácticos	Myers-Zehr (1980)

4.3.1 Métodos empíricos

Estos métodos son muy sencillos y carecen de fundamentos teóricos. Algunos de los métodos que pertenecen a esta clasificación son: US Weather Bureau, Nerc, Beli y Desbordes.

a) Método del United States Weather Bureau (1958)

Al aplicar este método se proponen los pasos siguientes:

- Se calcula la precipitación máxima de la tormenta para toda el área y duración de interés utilizando polígonos de Thiessen, de estos valores se selecciona la lluvia máxima para cada año de registro.
- De los resultados de lluvia máxima por año se obtiene el valor promedio, que será el numerador de la ecuación.

- De cada estación analizada se selecciona el día en que ocurrió la precipitación máxima de todo el año P'_{ij} , y se calcula la media de toda la zona para cada año registrado.
- Con el valor medio por año j , se calcula la media para toda la zona, que representa el denominador de la ecuación siguiente:

$$FRA_{US} = \frac{\sum_j \sum_i w_i P'_{ij}}{\sum_j \sum_i P_{ij}} \quad (4.7)$$

donde

- P_{ij} precipitación máxima anual ocurrida en la estación i el año j
- P'_{ij} precipitación puntual en la estación i el día que ocurrió la máxima precipitación media en la cuenca el año j
- w_j factor de peso de Thiessen asociado a cada estación
- i número de estaciones
- j número de años

b) Método de UK (Nerc, 1975)

Al aplicar este método se utilizan los pasos siguientes:

- Se obtienen las precipitaciones de toda la región para cada año, con el fin de identificar el día en que ocurrió el valor máximo, de dichos valores se eligen las precipitaciones puntuales para cada día (P_{ij}).
- Se eligen las lluvias máximas de cada estación para cada año (P'_{ij}).
- Para cada año se calcula la relación P'_{ij} / P_{ij} .

El FRA será el promedio para todos los años y estaciones, como lo indica la ecuación siguiente

$$FRA_{UK} = \frac{1}{ij} \sum_j \sum_i \frac{P'_{ij}}{P_{ij}} \quad (4.8)$$

c) Método de Bell (1976)

Los pasos a seguir según Bell son los siguientes:

- Obtener la precipitación máxima de la zona en estudio con los polígonos de Thiessen para cada año P'
- Para cada estación i se elige el valor máximo correspondiente para cada año, de estos valores se calcula la media de los valores de toda el área P .

- Por cada año se calcula el FRA al dividir la precipitación máxima anual en la estación i del año j entre la precipitación media.
- El FRA de toda la cuenca es la media de los factores calculados para todos los años.

La expresión que se utiliza es la siguiente:

$$FRA_{BELL} = \frac{\sum(w_i P_{ij})}{\sum(w_i P_{ij})} \quad (4.9)$$

d) Método de Desbordes-Raous-Trévisiol (1984)

De acuerdo con los autores, existen 2 maneras diferentes para calcular los factores de reducción por área (α y αd).

La primera relaciona el valor de la intensidad media en toda la cuenca con la intensidad máxima para una misma duración localizada en el centro de tormenta mediante la expresión:

$$\alpha d(A, dt, iM) = \frac{iA(d, dt)}{iM(dt)} \quad (4.10)$$

donde

$iA(dt)$ intensidad media en la cuenca
 $iM(dt)$ intensidad máxima en algún punto de la cuenca
 dt duración

Otra forma de calcularlo es relacionado la intensidad local con la intensidad máxima a una distancia d del centro de tormenta, como se observa en la ecuación:

$$\alpha d(d, dt, iM) = \frac{i(d, dt)}{iM(dt)} \quad (4.11)$$

donde

$i(d, dt)$ intensidad local
 $iM(dt)$ intensidad máxima

ambas expresiones se relacionan de la siguiente manera

$$(\alpha, dt, iM) = \frac{1}{A} \int_A \alpha d(x, y, dt, iM) dA \quad (4.12)$$

Estos métodos son muy sencillos, y permiten conocer el FRA para la zona de interés, utilizando la información disponible de los registros de lluvia de los años y estaciones correspondientes.

4.3.2 Métodos teóricos

Estos métodos se han encontrado en la literatura con fundamentos teóricos, donde la mayoría de ellos siguen una ley de probabilidad.

A este grupo pertenecen los métodos de Roche (1963), Nyguyen Rousselle (1980) y Asquith Famiglietti (2000).

a) Método de Roche (1963)

Este es el primer método que se reporta en la literatura con bases teóricas. Roche supone que las precipitaciones puntuales siguen una misma ley de probabilidades, considerando un proceso isótropo, es decir considerando una misma magnitud de todas las precipitaciones.

Si se tiene una superficie S, la cual tiene una serie de puntos 1, 2...n, repartidos de manera homogénea y se encuentran asociados a una altura de precipitación $h_1, h_2... h_n$ donde las alturas son variables aleatorias que siguen la función de probabilidad $h_1, h_2... h_n$ se tiene:

$$\int_1 \int_2 \dots \int_n \rho(h_1, h_2, \dots, h_n) dh_1, \dots, dh_n = P \quad (4.13)$$

donde P es la probabilidad

La integral se debe calcular en toda la región, con la condición siguiente:

$$\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} \geq h \quad (4.14)$$

El valor exacto de la probabilidad se obtiene cuando $n \rightarrow \infty$

Roche inició su análisis considerando dos puntos en la superficie, de donde construyó una gráfica, como la que se muestra en la Figura 4.3 en la que dos curvas representan las líneas de igual densidad de probabilidad. Repitiendo este procedimiento para muchos valores y variando la distancia entre los puntos, se puede construir la curva de la Figura 4.4. Este método lo aplicó para la cuenca Flakoho, ubicada en la costa occidental de África, de donde encontró que los factores de reducción son independientes del período de retorno.

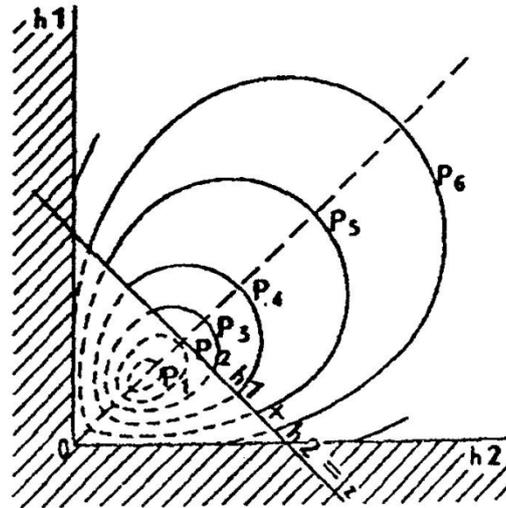


Fig 4.3 Curvas de igual densidad de probabilidad (Guichard R. “Recopilación de método y obtención de factores empíricos”)

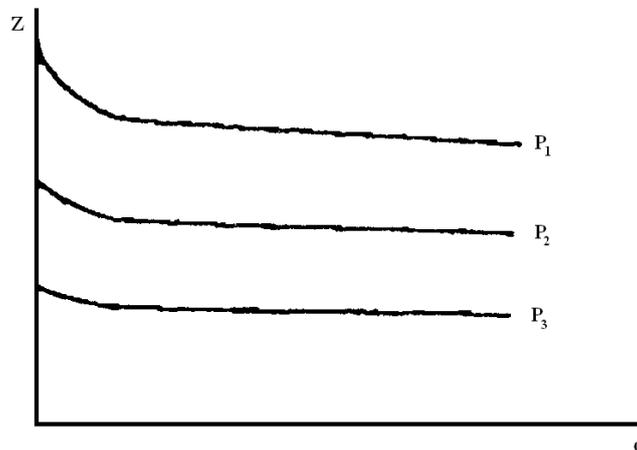


Figura 4.4 Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y del nivel de probabilidad. (Guichard R. “Recopilación de método y obtención de factores empíricos”)

Del método propuesto se puede decir que es correcto, pero muy laborioso ya que en cada caso es necesario construir gráficas y hacer integraciones gráficas.

b) Método de Rodríguez Iturbe y Mejía (1974)

Los autores suponen que el proceso es estacionario es isótropo y que la función de correlación puede separarse en dos partes, una temporal y otra espacial.

El proceso puntual de lluvia es distribuido con media cero y varianza σ_p^2 , mientras que el proceso total de lluvia tiene media cero y varianza $A^2 \sigma_p^2 \bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 | A)$. Para un periodo de retorno, la lluvia puntual puede transformarse en lluvia total, al multiplicarlo por la desviación estándar.

El factor de corrección de área fija depende únicamente de las características del área en cuestión.

$$K = A^2(\bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2|A))^2 \quad (4.15)$$

donde

K factor que relaciona alturas de lluvia para el área de interés

En toda el área, existen 2 tipos de correlación, una exponencial decreciente y otra del tipo Bessel. En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestra la variación del factor de corrección K para estas funciones, de donde se encontró que para el factor K no importa la forma geométrica del área de interés, excepto cuando se tienen formas muy alargadas.

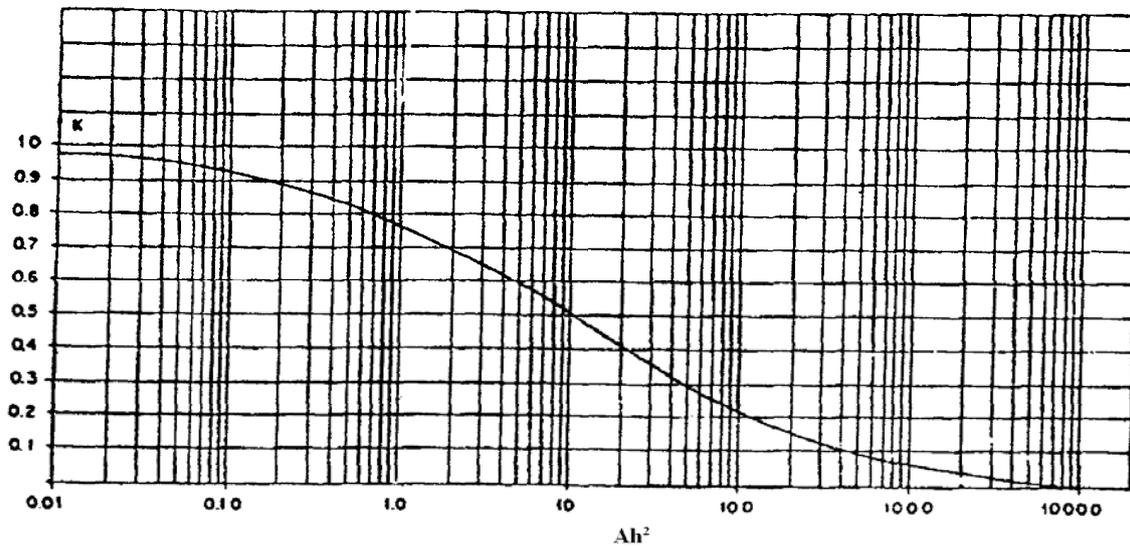


Figura 4.5 Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación tipo exponencial, Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"

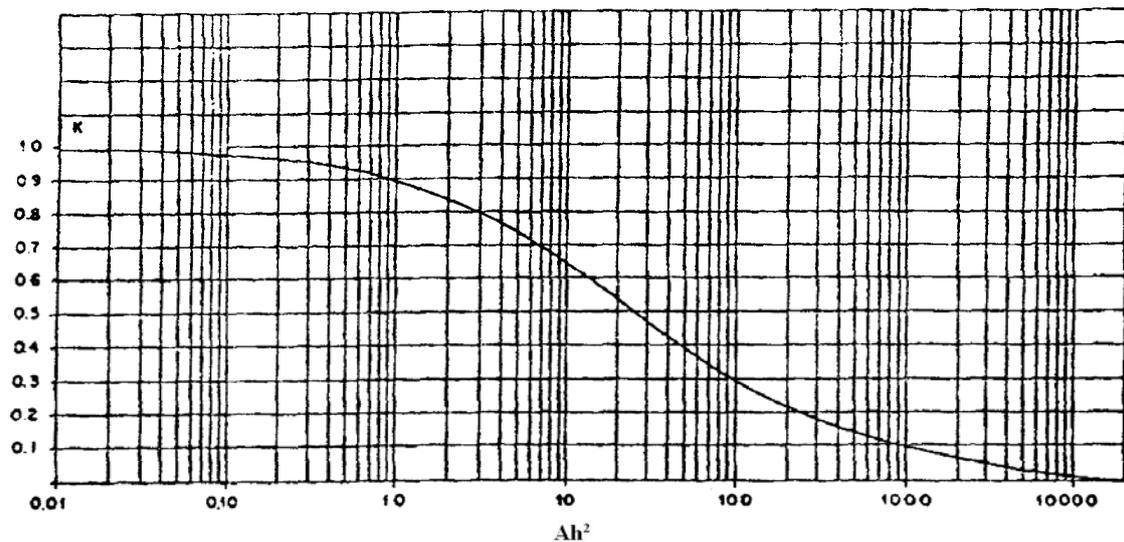


Figura 4.6 Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación tipo Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"

c) Método de Nguyen - Rousselle -McPherson (1980)

Los argumentos hipotéticos del método son las siguientes:

- La lluvia es un proceso estocástico, intermitente y positivo
- La distribución de frecuencias de las lluvias puntuales y areales es de tipo exponencial

Teóricamente los autores consideran que las lluvias en toda la región son variables aleatorias, entonces pueden tomar cualquier valor, incluyendo el cero, por lo tanto, hay una probabilidad finita para la que la altura de lluvia X sea cero, y para valores mayores que cero se puede usar la función de probabilidad $\phi(x)$.

Entonces la probabilidad de que la precipitación sea mayor a cero, se puede expresar por medio de la ecuación siguiente.

$$F(x) = P\{X \leq x\} = F_0 + (1 - F_0)\phi(x) \quad (4.16)$$

donde

$$F_0 = P\{X = 0\} \quad \text{y} \quad \phi(x) = P\{X \leq x | X > 0\}$$

Ahora bien, suponiendo que las lluvias siguen una distribución exponencial, la función de probabilidad de excedencia $F_1(x)$ es:

$$F_1(x) = (1 - F_0)e^{-\lambda x} \quad \text{Para } x \geq 0 \quad (4.17)$$

Por otro lado, el área de influencia de cada estación se determina mediante los polígonos de Thiessen para las lluvias areales, considerando que las lluvias son aleatorias, independientes y exponencialmente distribuidas, de este proceso se determina la ecuación de excedencia en función de las lluvias media areales

$$G_1(x) = 1 - G(x) = (1 - G_0)[1 - F_n(x)] \quad (4.18)$$

donde

G_0 probabilidad de que la lluvia areal sea cero, y se puede estimar de los datos históricos de lluvia

G_r probabilidad de excedencia de que las lluvias medias de toda el área sean mayores que x .

El factor de corrección de toda el área se puede determinar para un mismo valor de las probabilidades de excedencia de las lluvias puntuales y areales.

d) Método de Asquith — Famiglietti (2000)

También llamado método de máximo anual centrado (anual máxima- centered), considera solamente la distribución de precipitaciones simultáneas alrededor de la lluvia máxima anual.

Esta metodología se recomienda mas para lugares en donde existe gran cantidad de información de estaciones pluviométricas, por lo que no se requiere inferencia estadística.

Se considera que la lluvia es homogénea, es decir uniforme en toda la región, y que el volumen potencial de la tormenta de diseño ocurre cuando el centro de tormenta coincide con el centroide de la cuenca.

Los pasos para utilizarlo son los siguientes:

- Con los valores máximos de la base de datos, se determinan las relaciones entre el máximo y el simultáneo que corresponda a las estaciones que se encuentran alrededor de dicho valor. Adicionalmente, se considera en cada relación de datos la distancia entre las estaciones correspondientes.
- Se eligen las relaciones que cumplan con un período de retorno específico, en donde se busca encontrar una relación preliminar entre los cocientes seleccionados y sus respectivas distancias.
- Se define un conjunto de funciones de ajuste entre los cocientes y las distancias seleccionadas en el punto anterior. Cuando la distancia es cero, las curvas que se obtienen deben de tener como valor uno.
- Se calculan los factores de reducción por área para la zona de interés y el criterio de diseño seleccionado integrando espacialmente la función estimada del punto anterior, para ello se propone utilizar áreas de forma circular.

4.3.3 Métodos teórico — prácticos

Myres — Zehr (1980)

El método propuesto por estos autores consiste en trabajar primero con cada estación por separado, después con dos, y hasta cinco estaciones. Se propone seguir la metodología siguiente.

- Para los pares de estaciones. En un plano distancia se representan los primeros y segundos momentos de todas las series de datos anuales, ajustándolas a una ecuación de tipo exponencial.

- Se determinan las ecuaciones de ajuste para cinco estadísticos diferentes: primero y segundo momentos para los máximos anuales, del promedio de dos estaciones; primero y segundo momentos de la lluvia que se presentó en la segunda estación de manera simultánea al máximo de la primera; la covarianza entre los máximos de la estación cuando se presentó la lluvia simultánea.
- Los estadísticos se utilizan en distintas combinaciones para estimar los límites inferior y en superior del primer y segundo momentos de las precipitaciones máximas de toda la región.
- Por último, se obtienen las relaciones precipitación - área mediante el procedimiento del primer y segundo momento de la zona, a través de la ecuación de frecuencia generalizada de Chow

$$h = \bar{h} + K\sigma \quad (4.19)$$

donde

h precipitación máxima buscada para una frecuencia determinada, en mm

\bar{h} precipitación media, mm

K factor de frecuencias, tabulado para diferentes valores de la longitud de serie y el periodo de retorno T_r

σ desviación estándar de la serie

Los estadísticos se utilizan, obteniendo el cociente entre el valor para un área o distancia determinada y su correspondiente para área o distancia cero.

Este método se aplicó en Estados Unidos en áreas circulares, donde las muestras contaban con un valor medio de 20 años.

Capítulo 5

APLICACIONES

En los capítulos anteriores se pudo observar que los SIG son una herramienta muy importante para un cálculo más preciso de las propiedades fisiográficas de una cuenca que se encuentra en el área de estudio y también los SIG toman un papel importante en el cálculo del FRA para que éste sea de una forma precisa y sobre todo más rápida y eficiente.

5.1 Recopilación de la información de precipitación

Antes de indicar la forma en la que se recopiló la información, se mencionan brevemente los programas de cómputo auxiliares para el análisis de los registros de lluvias. Éstos son AX y Curve Expert.

El AX es un programa que permite hacer el ajuste de algunas funciones de distribución de probabilidad a muestras de datos calculando el error cuadrático de cada

una de ellas respecto de la muestra. Para hacer el ajuste el programa contiene las funciones Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel.

En el programa se puede usar cada uno de los ajustes por separado o bien seleccionar la opción de cálculo global, si se elige el cálculo de los ajustes por separado se pueden extrapolar valores para el periodo de retorno deseado. Este paquete de cómputo se elaboró en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

El programa Arc View Gis 3.2 es un paquete que, entre otras cosas, permite calcular los polígonos de Thiessen de una cuenca. Para la aplicación de este paquete se necesita conocer las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y estaciones pluviométricas de la zona a estudiar.

Curve Expert 1.3 es un programa sencillo el cual permite modelar ecuaciones utilizando modelos de regresión lineal, no lineal e interpolación. Las curvas se dividen en dos tipos, el primero contiene las curvas de regresión las cuales se dividen en lineales y no lineales. El segundo grupo interpola los valores de tal forma que la curva pasa exactamente a través de los puntos proporcionados.

Las familias de grupos que contiene pueden ser de tipo lineal, exponencial, potencia, densidad, interpolación, etc. Este paquete de programación proporciona el mejor ajuste a los datos incorporados, aunque también permite que este se realice manualmente.

El BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) es una base de datos creada para el almacenamiento de información sobre los ríos y presas del país por la CNA (Comisión Nacional del Agua). Consta de seis discos, cinco de los cuales guardan información sobre los ríos y el restante almacena información de las principales presas del país.

La información que se utilizó fue de lluvia con duración de 24 horas en 19 estaciones pluviométricas; El formato de los registros obtenidos se muestra en la Tabla 5.1(a) y 5.1(b).

Tabla 5.1(a) Formato de precipitaciones diarias en 24 horas, primeros 15 días

Longitud 110°42'0''
 Latitud 29°13'48''

		El Orégano (26032)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1983	Enero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	Febrero	0	14.2	10.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Marzo	0	6.6	16.4	3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abril	0	0	0	0	0	4.3	2.7	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Julio	0	0	0	0	0	0	6.4	7.5	1.2	0	2.7	0	4.3	0	0
	Agosto	0	0	15.4	0	8.7	0	0	0	0.6	3.8	0	0	2	63.9	0
	Septiembre	0	0	0	6.5	0	5.7	0	0	20	16.8	0	0	0	0	0
	Octubre	1.4	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Noviembre	0	0	1.4	0	0	0	0	5.3	0	0	0	0	0	0	0
	Diciembre	32.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.1(b) Formato de precipitaciones diarias en 24 horas, siguientes 15 días

Longitud 110°42'0''
 Latitud 29°13'48''

		El Orégano (26032)															
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1983	Enero	0	0	0	1	0.3	0	0	0	0	0	0	0	2.7	0	37.6	0
	Febrero	0	0	0	0	0	0	0	0	3.8	0	0	0	0	NO_D	NO_D	NO_D
	Marzo	0	0	1.9	1.3	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0
	Abril	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO_D
	Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO_D
	Julio	0	0	3	39.2	3.5	13	6.5	0	0	0	0	16	0	0	0	0
	Agosto	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.3	0	0	0	0
	Septiembre	12.2	0	0	0	0	0	21.8	0	0	0	0	0	19.4	22	0.1	NO_D
	Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.5	0	0	0	0	0
	Noviembre	0	0	0	0	0	14.7	0.1	0	0	2.9	0	0	0	0	0.3	NO_D
	Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2 Cálculo del FRA para la subcuencas del río Sonora

El factor de reducción por área (FRA) se calcula al dividir la precipitación media máxima anual asociada a un periodo de retorno entre la media de los máximos puntuales asociados al mismo periodo de retorno como se muestra en la expresión:

$$FRA(A, T_r) = \bar{P}(A, T_r) / \hat{P}(A, T_r) \tag{5.1}$$

donde

$\bar{P}(A, T_r)$ lluvia media anual asociada a un área y periodo de retorno, en mm

$\hat{P}(A, T_r)$ media areal de la lluvia máxima calculada para cada estación asociada a un área y periodo de retorno, en mm

El procedimiento para calcular el FRA en la cuenca del río Sonora se determinará al observar los datos de las estaciones pluviométricas que se encuentran dispersas dentro y fuera de la cuenca.

Como se puede observar en la Tabla 5.2 existen estaciones donde el número de registros disminuye en los últimos años, sin embargo no se pueden descartar los datos que se registraron en los primeros años, debido a que existen zonas de influencia importantes de estas estaciones en el área total de influencia. Por ello, se decidió dividir a la cuenca en tres áreas de influencia para obtener un mejor provecho de los datos existentes para el cálculo de los factores de reducción por área.

La división de las subcuencas se hizo en función de los ríos tributarios al río Sonora, así como los acuíferos que serán los puntos de salidas de las subcuencas.

Los tres ríos que serán tomados para definir las subcuencas son:

- Río San Miguel, que es un afluente del río Zanjón, el punto de salida a considerar será el acuífero de “Las Chivas”, el nombre de esta cuenca es conocido como “*El Cajón*” o “*Las Chivas*”, teniendo un área de 3589.90 km².
- Río Sonora, que es el río principal de la cuenca, en su cauce principal aguas-arriba contiene a varios acuíferos importantes, el punto de salida es la presa “El Molinito” siendo el nombre de esta subcuenca conocido como “El Orégano” teniendo un área de 11680.57 km².
- Río Zanjón, que es una afluente del río Sonora, el punto de salida a considerar será la presa Abelardo Rodríguez, el nombre de esta cuenca es conocido como “Zanjón”, cabe mencionar que esta subcuenca contiene el cauce aguas abajo del río Sonora, teniendo un área de 5934.44 km².

Las tres subcuencas pueden observarse en la Figura 5.1

Tabla 5.2 Estaciones de la cuenca del río Sonora considerados en este trabajo

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
26005	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									1	1		1	1	1	1	1
26007	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26008	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26013	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1																		
26016	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26025	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26032	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26035	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
26046	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																
26052	1	1	1	1					1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26064	1	1	1	1	1	1	1	1	1																					
26074	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26088	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
26090	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26121	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26139	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26180	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26199				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1														1	1	1	1
26232						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	17	17	18	17	16	18	18	18	19	17	16	17	16	14	12	11	11	12	12	13	13	12	13	12	11	14	14	14	11	

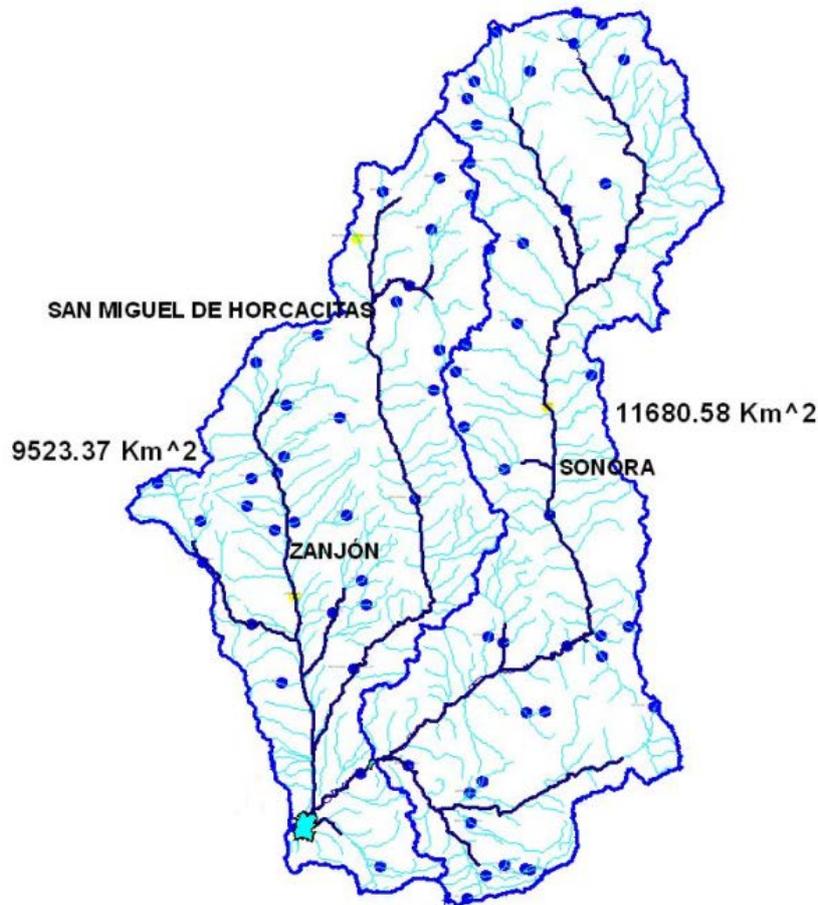


Figura 5.1 Cuenca Sonora con los tres ríos principales para delimitar sus cuencas

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el FRA en la cuenca del río Sonora, en donde los primeros seis puntos ayuda a calcular el numerador de la ecuación y los siguientes dos el denominador.

1. Consultar las estaciones con registros de lluvia simultáneos.
2. De la consulta realizada se eligieron las estaciones pluviométricas con años simultáneos, descartando las que presentaron mayor dispersión de datos. En este caso se seleccionaron 19 estaciones con 29 años simultáneos en total (1975- 2003).

La Figura 5.2 y la Tabla 5.2 contienen las estaciones y años considerados, en la Tabla 5.3 se incluyen el nombre, clave, coordenadas geográficas y elevación de ellas.

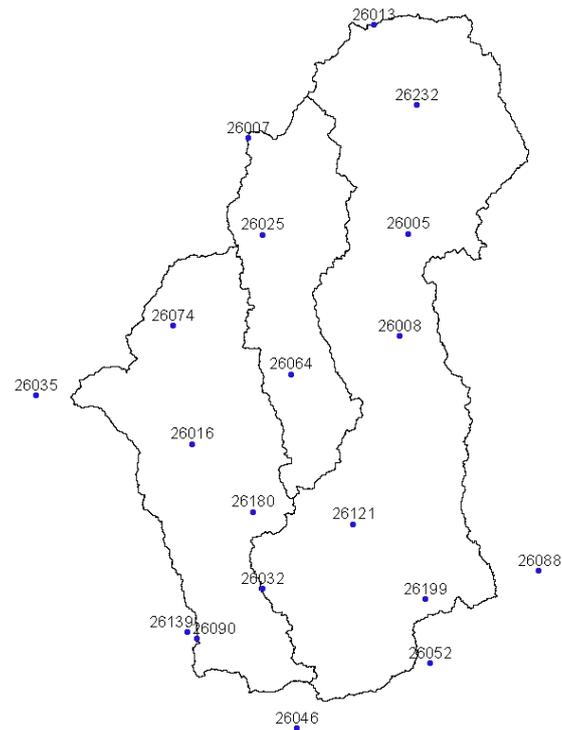


Figura 5.2 Localización de las estaciones pluviométricas lo largo de la cuenca del río Sonora

Tabla 5.3 Nombre, clave y coordenadas de las estaciones en estudio

CLAVE	NOMBRE	LATITUD N		LONGITUD W		ELEVACIÓN msnm.
		grados	minutos	grados	minutos	
26005	ARIZPE	30	19	110	10	870
26007	BACANUCHI	30	37	110	45	937
26008	BANAMICHI	30	1	110	12	700
26013	CANANEA	30	58	110	18	1575
26016	CARBO	29	40	110	57	464
26025	CUCURPE	29	15	110	42	718
26032	EL OREGANO	29	13	110	42	300
26035	FELIX GOMEZ	29	49	111	30	614
26046	LA COLORADA	28	48	110	34	500
26052	MAZATAN	29	0	110	7	1100
26064	OPEDEPE	29	0	110	36	596
26074	QUEROBABI	30	3	111	2	657
26088	SAN PEDRO DE LA CUEVA	29	16	109	43	319
26090	PRESA ABELARDO	29	4	110	55	211
26121	URES	29	25	110	22	432
26139	HERMOSILLO	29	6	110	58	211
26180	EL CAJON	29	28	110	44	400
26199	PUEBLO DE ALAMOS	29	12	110	7	580
26232	LA CEBOLLA	30	43	110	9	755

Para definir las estaciones de influencia de área para cada subcuenca, se trazaron los polígonos de Thiessen para las 19 estaciones seleccionadas, determinado el porcentaje de los polígonos y así seleccionar las estaciones a considerar.

En la Figura 5.4 se muestran los polígonos A_i calculados para el año de 1983, el cual involucra a todas las estaciones.

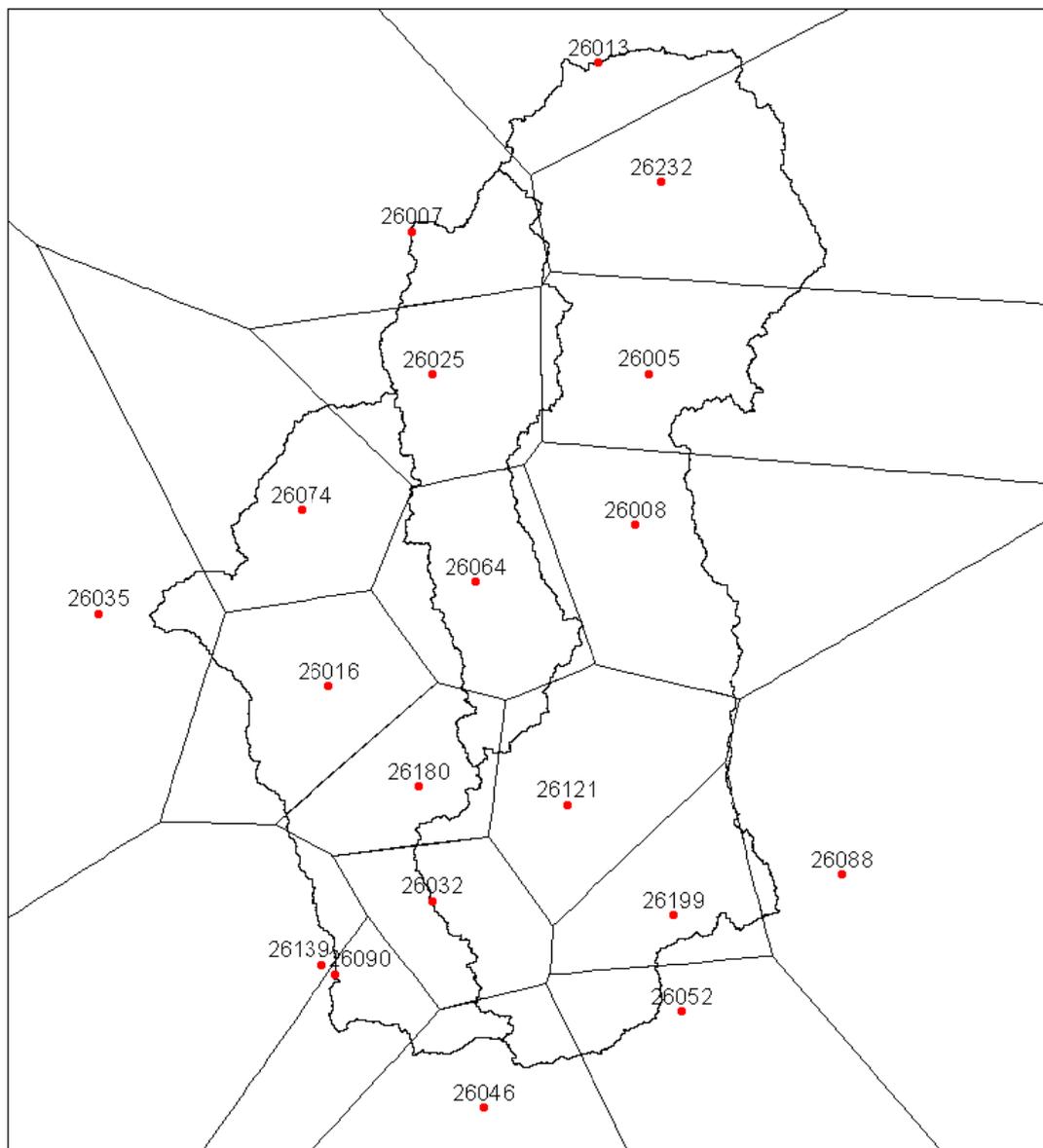
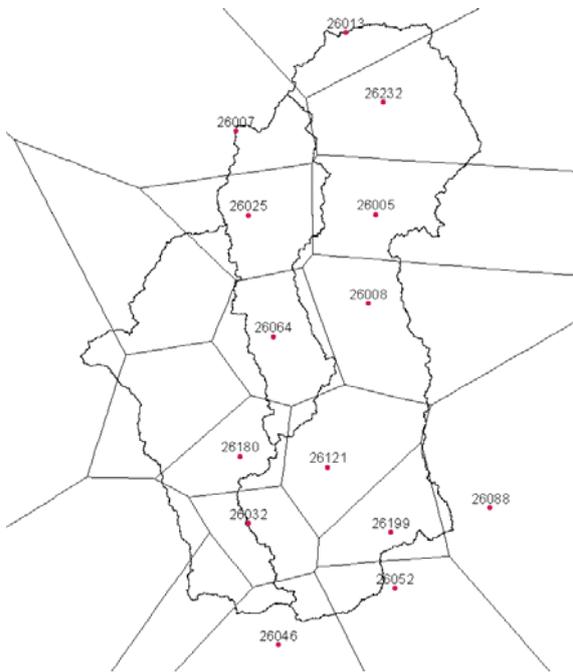


Figura 5.4 Polígonos de Thiessen para el año de 1983

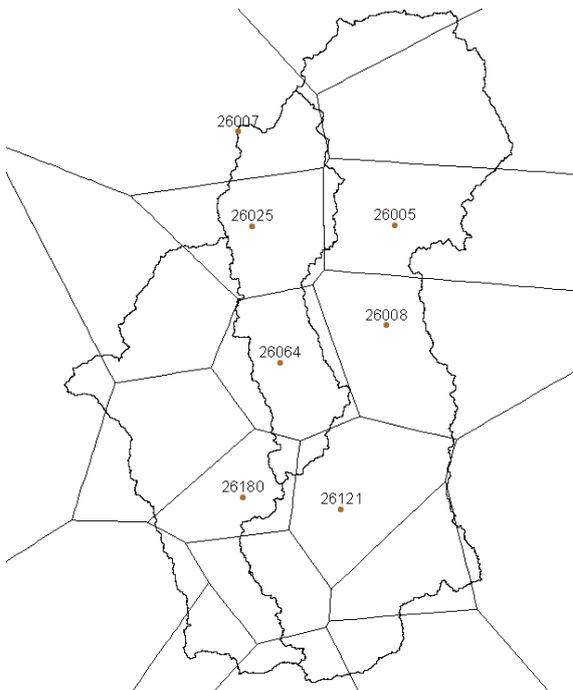
Para el caso de la subcuenca “El Orégano”, se seleccionaron las estaciones siguientes, ver Figura 5.5.



Clave	Área km ²	% Thiesen
26005	1683.913	0.144
26007	49.086	0.004
26008	1898.074	0.162
26013	698.351	0.060
26025	45.541	0.004
26032	721.720	0.062
26046	246.970	0.021
26052	377.115	0.032
26064	205.693	0.018
26088	69.586	0.006
26121	2034.075	0.174
26180	159.592	0.014
26199	1205.395	0.103
26232	2285.470	0.196
Área Total =	11680.579	100%

Figura 5.5 Estaciones para la subcuenca “El Orégano”

Para el caso de la subcuenca “El Cajón” se seleccionaron las estaciones siguientes, ver Figura 5.6.



Clave	Área km ²	% Thiesen
26005	121.184	0.034
26007	640.393	0.178
26008	0.024	0.000
26025	1326.328	0.369
26064	1282.167	0.357
26121	93.280	0.026
26180	126.529	0.035
Área Total =	3589.905	100%

Figura 5.6 Estaciones para la subcuenca “El Cajón”

Para el caso de la subcuenca “Zanjón” se seleccionaron las estaciones siguientes, ver Figura 5.7.

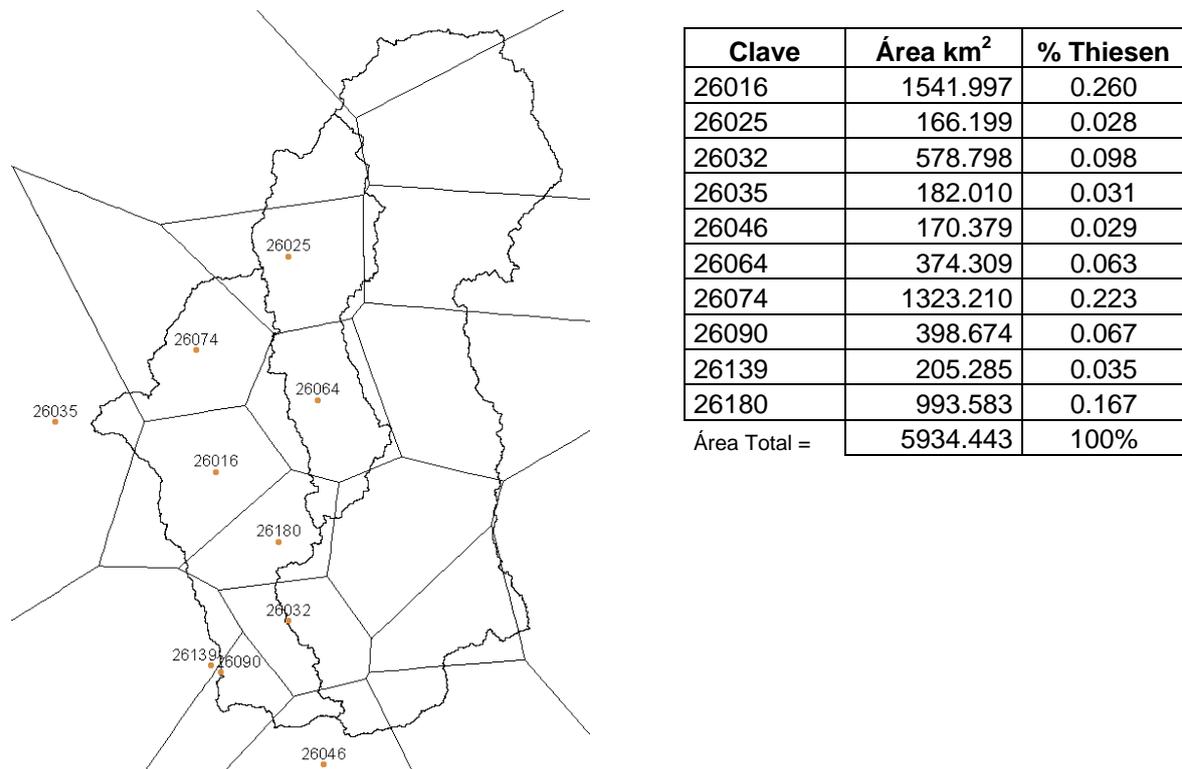


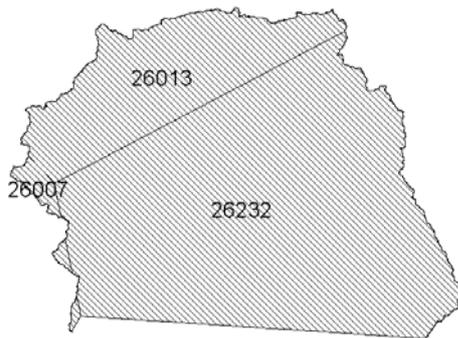
Figura 5.7 Estaciones para la subcuenca “Zanjón”

3. Tomando las subcuencas de los ríos San Miguel, Zanjón y Sonora, se trazaron los polígonos de Thiessen por año para el número de estaciones por cada subcuenca, que en el caso de “El Orégano” serán 14 estaciones, para “El Cajón” 7 estaciones y para “Zanjón” 10 estaciones. Para cada subcuenca se determinaron los porcentajes de los polígonos correspondientes a cada año, con sus respectivas estaciones.

4. Cada subcuenca se dividió en pequeñas áreas A_i asociando como mínimo a tres estaciones cercanas entre si hasta unir por completo cada subcuenca,

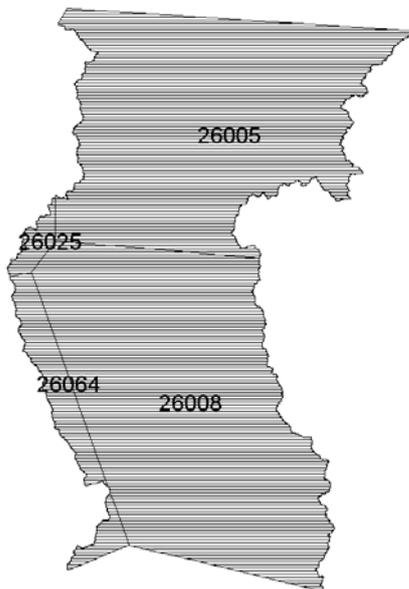
Cabe mencionar que para el caso particular de la subcuenca “El Cajón” no se siguió este criterio, debido a que contaba con pocas estaciones para su configuración por lo que se decidió que, para una mayor precisión, dividir en mas áreas A_i el estudio de esta subcuenca, ya que si se seguía el criterio anteriormente mencionado se contaría con un mínimo de áreas A_i , obteniendo un mayor error en el cálculo del factor de reducción por área.

Las Figuras 5.8(a), 5.8(b), 5.8(c), 5.8(d) y 5.8(e) muestran las áreas calculadas para la subcuenca “El Orégano”.



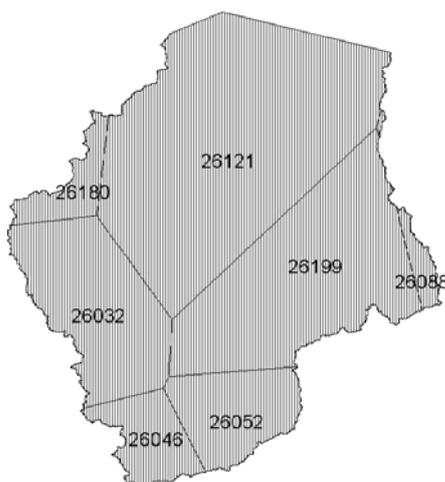
Zona 1		
Clave	Área km ²	% Thiesen
26007	49.308	1.63%
26013	698.563	23.03%
26232	2,285.025	75.34%
Área Total =	3,032.895	100.00%

Figura 5.8(a) Áreas calculadas para un área de 3032.895 km²



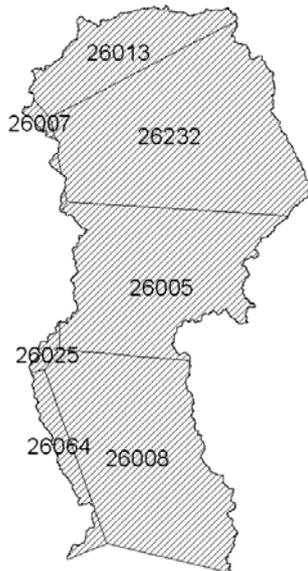
Zona 2		
Clave	Área km ²	% Thiesen
26005	1,683.821	43.93%
26008	1,897.515	49.50%
26025	45.676	1.19%
26064	206.183	5.38%
Área Total =	3,833.194	100.00%

Figura 5.8(b) Áreas calculadas para un área de 3833.194 km²



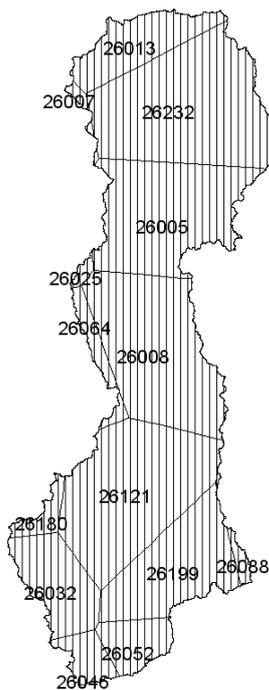
Zona 3		
Clave	Área km ²	% Thiesen
26032	719.388	14.94%
26046	247.434	5.14%
26052	377.103	7.83%
26088	70.777	1.47%
26121	2,035.227	42.27%
26180	160.076	3.32%
26199	1,204.485	25.02%
Área Total =	4,814.489	100%

Figura 5.8(c) Áreas calculadas para un área de 4814.489 km²



Zona 4		
Clave	Área km ²	% Thiessen
26005	1,683.913	24.53%
26007	49.085	0.71%
26008	1,897.993	27.64%
26013	698.349	10.17%
26025	45.540	0.66%
26064	205.736	3.00%
26232	2,285.473	33.29%
Área Total =	6,866.089	100.00%

Figura 5.8(d) Áreas calculadas para un área de 6866.089 km²



Zona 5		
Clave	Área km ²	% Thiessen
26005	1,683.913	14.42%
26007	49.086	0.42%
26008	1,898.074	16.25%
26013	698.351	5.98%
26025	45.541	0.39%
26032	721.720	6.18%
26046	246.970	2.11%
26052	377.115	3.23%
26064	205.693	1.76%
26088	69.586	0.60%
26121	2,034.075	17.41%
26180	159.592	1.37%
26199	1,205.395	10.32%
26232	2,285.470	19.57%
Área Total =	11,680.579	100.00%

Figura 5.8 (e) Áreas calculadas para un área de 11680.579 km²

5. Para cada año y área seleccionada se obtuvo la lluvia media diaria, este paso se determinó multiplicando la lluvia de cada día del año para cada una de las estaciones por su correspondiente porcentaje de Thiessen.

Por lo que cada una de las estaciones por su correspondiente porcentaje de Thiessen por lluvia diaria, todo esto entre cien y por el número de estaciones, el resultado representa la lluvia media diaria de cada día del año asociado a un área.

6. Del inciso anterior se obtiene el máximo anual, así como el día y mes en que se presentó. Los datos de lluvia máxima por año se ajustaron a una función de distribución mediante el programa AX. El mejor ajuste para cada grupo de valores analizados para cuenca fue utilizando la función tipo Gumbel para la subcuenca “El Orégano, de tipo Lognormal para las subcuencas “El Cajón” y “Zanjón”.

En las Figuras 5.9 y 5.10 se muestran algunos de los valores calculados. En resumen, en este punto se obtiene la lluvia media en un área asociada a un periodo de retorno para cada estación que representa el numerador de la ecuación 5.1.

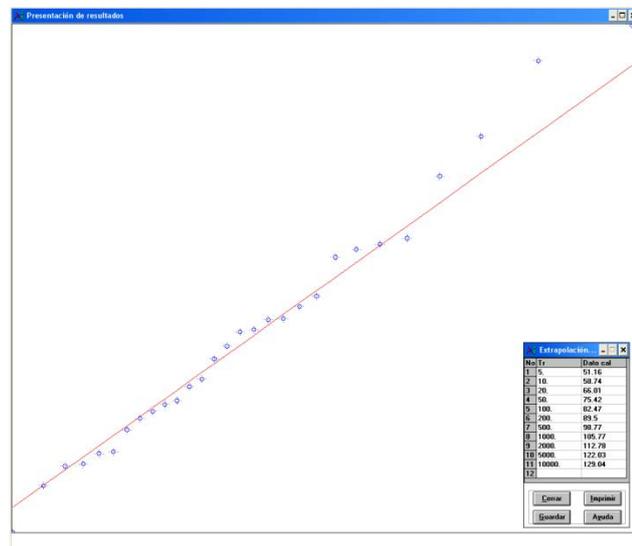
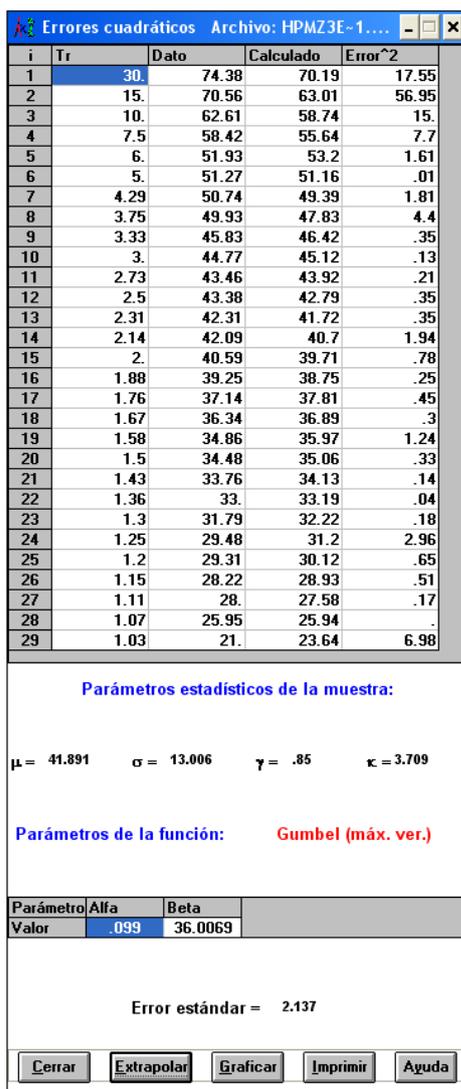


Figura 5.9 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área de 4814.489 km².

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	30	70.02	56.05	195.09
2	15	49.73	50.05	.1
3	10	48.93	46.47	6.04
4	7.5	44.28	43.89	.16
5	6	43.75	41.84	3.65
6	5	42.7	40.13	6.59
7	4.29	41.38	38.66	7.41
8	3.75	39.61	37.35	5.1
9	3.33	37.2	36.17	1.06
10	3	35.73	35.09	.41
11	2.73	35.18	34.08	1.21
12	2.5	34.89	33.14	3.08
13	2.31	31.87	32.24	.14
14	2.14	30.33	31.38	1.11
15	2	30.26	30.56	.09
16	1.88	29.51	29.76	.06
17	1.76	27.46	28.97	2.29
18	1.67	26.71	28.2	2.22
19	1.58	25.81	27.43	2.63
20	1.5	24.46	26.67	4.87
21	1.43	24.44	25.89	2.11
22	1.36	23.59	25.1	2.29
23	1.3	22.87	24.29	2.02
24	1.25	22.21	23.44	1.51
25	1.2	21.91	22.53	.39
26	1.15	21.43	21.54	.01
27	1.11	21.38	20.41	.93
28	1.07	21.18	19.04	4.56
29	1.03	15.43	17.12	2.85

Parámetros estadísticos de la muestra:

$\mu = 32.56$ $\sigma = 11.691$ $\gamma = 1.255$ $\kappa = 5.424$

Parámetros de la función: **Gumbel (máx. ver.)**

Parámetro	Alfa	Beta
Valor	.1184	27.461

Error estándar = 3.103

Cerrar Extrapolar Graficar Imprimir Ayuda

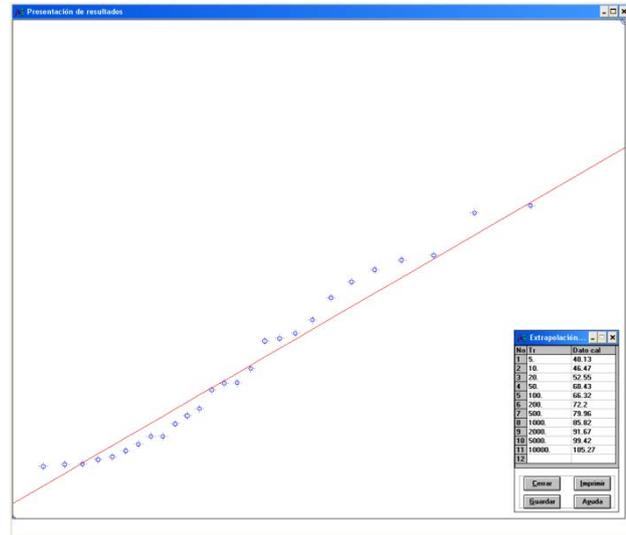


Figura 5.10 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área 11680.579 km².

7. Para el denominador se eligió la lluvia máxima por estación (Tabla 5.4). Estos valores se introducen al programa AX donde se obtiene para cada estación una lluvia asociada a un periodo de retorno, los datos se ajustaron a funciones, ver Tablas 5.5(a), 5.5(b) y 5.5(c).

8. Con las áreas A_i previamente definidas para cada subcuenca, se multiplicó el porcentaje de polígonos de Thiessen de las estaciones involucradas por la lluvia asociada a los periodos de retorno calculados en el paso anterior; de éste paso se obtuvo para cada área la lluvia máxima asociada a un periodo de retorno para cada subcuenca; estos resultados se muestran en la Tablas 5.6(a), 5.6(b) y 5.6 (c).

9. Finalmente, se determinó un valor de lluvias medias máximas anuales (numerador) y uno de lluvias medias por estación (denominador) asociados a un área y periodo de retorno. El Factor de Reducción por Área (FRA) se obtuvo al dividir dichos valores (los cálculos realizados para determinar el FRA se encuentran en el Anexo 1).

Al aplicar el procedimiento a varias áreas comprendidas en la misma región se pueden construir gráficas y tablas para cada periodo de retorno analizado. En algunos casos las diferencias no son significativas pero cuando el área disminuye este factor tiende a aumentar, cabe mencionar que también influyen las características de la región estudiada.

Los factores de reducción por área calculados se muestran en la Tabla 5.7(a) para la subcuenca “El Orégano”, la Tabla 5.7(b) para la subcuenca “El Cajón” y la Tabla 5.7(c) para la subcuenca “Zanjón”.

Tabla 5.4 Precipitaciones máximas anuales para cada estación en mm.

26005	26007	26008	26013	26016	26025	26032	26035	26046	26052
2.2	29.3	25	13.5	24	33.5	29.0	2.9	18.5	8
3.35	29.5	27	28.3	25	35	32.0	7	33	26.6
5	30.8	31	31	34.5	35	32.5	10	34	29.5
7	32.5	33	35	35	39	33.6	25	35.6	35
23	33.4	36	38	37.6	40	34.5	26	36	41
24	35	38	40	38.5	40	37.3	29	38.5	43
26.5	35	38	41	40	40	40.0	29	39	45
29	35	41	53	40	42	41.2	32.5	40	49.2
29	39.3	44	60	41	43	42.0	33	45	52
30	40	44.5	60	42	43	45.0	35	56	54
37	41	45.5	64.9	42	45	46.0	37	59	60
37.5	42.4	47		48	47	46.0	40	63.9	67.6
40	44	47.5		49	48	48.0	41	74	68
43	44.5	52		50	48	48.5	42	90	68
47.5	44.6	53		51.5	49	50.0	42		74
55	48.8	59.5		53	50	50.3	49		75
67	49	62		53	51	53.0	58		78
67.5	49	64		60	58	53.5	60		85
77	49	64		62	60	57.0	61		87.6
87.5	50.4	65		64	60	62.9	65		120
	52	67		65	60	63.9	65		144
	52	68		70	66	64.7	70		
	52.2	69		74	75	66.0	80		
	59.5	71		80	80	90.8	91		
	60	75		82	80	95.7			
	82.5	77		83	90	97.2			
	91	83.5		90	95	112.0			
	115	87		108	111	200.0			
	127.1	112		150	139				

Tabla 5.4 (continuación)

26064	26074	26088	26090	26121	26139	26180	26199	26232
28.8	2	31	25.1	3	38.5	30.4	20	1.5
32.8	3.3	31.5	33.9	4	39.5	34.8	40	31
35.5	4.6	35	34	17	40	39	40.8	32.4
42	5.9	35	34.8	18.5	40.8	42.8	42.2	35
42	6.5	38	36.2	19.5	42	42.9	44.5	35
65	8.5	39	37.7	31	44	44.2	45.5	36
65.8	15	40	42	32	48.5	44.7	48	38
85	24	43	45.5	35	48.8	46.5	50	39
140.8	31	45.5	51	35.5	50.5	46.7	63	45.2
	34	48	56.5	40	53	47.1	68	46
	41	50	65	41	58	50.4	68.2	48
	45	56	68.7	41.5	58.3	52.3	70	48
	46	57	80	47.5	61	53.2	80.2	51
	46	58		48	61.1	61.5	117	54.5
	48	60		51	62.5	62		54.5
	50	60		51	62.9	62.3		57
	50	62.7		55	64.6	62.4		60
	53	64		56	67.6	64		60.6
	58	72		60	72	65.6		64
	65	72		68	75.5	67.5		64.5
	65.5	75		71.2	78	67.5		64.5
	68.5			80	79.2	70		87.3
	70			81.5	104	73.8		92.3
	76			85.5	112.5	83.7		94.5
	119			98	119.5	83.9		
					125.5	85.8		
					142	106.2		
					152.6	108.5		
						146.2		

Tabla 5.5(a) Periodos de retorno por estación para la subcuenca “El Orégano”

Clave	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
26005	52.62	66.95	98.48	111.81	155.86	199.83
26007	62.51	72.63	94.9	104.32	135.43	166.48
26008	72.05	84.66	112.39	124.12	162.87	201.55
26013	56.48	67.4	91.43	101.59	135.16	168.66
26025	71.55	83.08	108.47	119.2	154.65	190.04
26032	74.47	88.14	118.23	130.95	172.98	214.93
26046	60.44	71.25	95.06	105.12	138.37	171.56
26052	86.14	105.18	147.09	164.8	223.34	281.77
26064	77.17	93.03	127.94	142.7	191.47	240.15
26088	62.05	70.87	90.3	98.51	125.64	152.73
26121	70.05	87.08	124.56	140.41	192.76	245.02
26180	78.49	91.34	119.63	131.59	171.11	210.55
26199	73.77	87.3	117.06	129.64	171.22	212.72
26232	72.44	87.88	121.86	136.23	183.69	231.08

Tabla 5.5 (b) Periodos de retorno por estación para la subcuenca “El Cajón”

Clave	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
26005	53.34	65.36	88.87	97.97	126.03	151.85
26007	66.13	81.17	118.33	135.75	201.57	280.29
26008	72.65	83.39	104.63	119.92	138.76	162.87
26025	75.14	90.54	126.81	143.18	202.54	269.93
26064	83.09	105.11	157.2	180.78	266.53	364.26
26121	68.66	79.84	99.84	107.01	127.51	144.57
26180	80.5	95.78	131.24	147.04	203.54	266.57

Tabla 5.5(c) Periodos de retorno por estación para la subcuenca “Zanjón”

Clave	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
26016	74.69	89.03	121.28	135.29	184.04	236.55
26025	80.43	117.38	264.7	363.89	934.35	2071.99
26032	78	107.54	207.03	266.22	559.5	1049.34
26035	70.89	99.43	131.02	218.67	386.89	614.25
26046	61.06	72.34	97.28	107.96	144.66	183.5
26064	76.05	109.9	235.29	315.34	746.83	1543.88
26074	71.59	112.98	249.61	329.72	719.76	1357.7
26090	64.16	85.56	153.26	191.71	372.03	653.91
26139	95.45	139.03	309.05	421.74	1057.44	2296.71
26180	79.14	91.89	119.57	131.26	170.76	211.72

Tabla 5.6(a) Periodo de retorno por área para la subcuenca “El Orégano”

Área km ²	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
3032.895	64.63	74.68	96.8	105.15	137.04	167.89
3833.194	62.17	73.77	99.31	110.11	145.78	181.39
4814.489	51.25	58.86	75.61	82.69	106.09	129.44
6866.089	51.47	61.11	82.32	91.28	120.91	150.49
11680.579	40.97	47.81	62.87	69.23	90.26	111.26

Tabla 5.6(b) Periodo de retorno por área para la subcuenca “El Cajón”

Área km ²	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
220.482	64.15	72.83	91.92	100	126.67	153.3
640.096	61.49	71.41	93.24	102.47	132.97	163.42
1281.867	75.1	89.06	119.8	132.79	175.73	218.59
1447.461	69.86	81.27	106.39	117.01	152.1	187.12
2087.557	58.16	67.17	87.01	95.4	123.1	150.76
3369.424	56.4	65.68	86.12	94.76	123.3	151.8
3589.905	51.81	60.65	80.1	88.33	115.5	142.63

Tabla 5.6(c) Periodo de retorno por área para la subcuenca “Zanjón”

Área km ²	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
1352.98	69.21	86.31	128.75	148.71	224.43	315.43
1671.75	67.93	90.82	150.31	179.32	293.85	438.57
2909.71	66.95	78.55	104.04	114.9	151.96	190.86
4581.46	54.38	65.65	91.45	102.82	143.01	187.16
5934.44	52.68	63.26	87.34	97.9	135.08	175.68

Tabla 5.7(a) Factores de reducción por área calculados para la subcuenca “El Orégano”

Área (km ²)	Periodo de Retorno (Tr)						Promedio
	5	10	50	100	1000	10000	
3032.895	0.901	0.880	0.853	0.844	0.829	0.819	0.854
3833.194	0.869	0.847	0.818	0.809	0.793	0.782	0.820
4814.489	0.831	0.808	0.777	0.768	0.750	0.739	0.779
6866.089	0.757	0.732	0.699	0.688	0.669	0.657	0.700
11680.579	0.609	0.581	0.544	0.533	0.511	0.498	0.546

Tabla 5.7(a) Factores de reducción por área calculados para la subcuenca “El Cajón”

Área (km ²)	Periodo de Retorno (Tr)						Promedio
	5	10	50	100	1000	10000	
220.482	0.963	0.946	0.918	0.909	0.883	0.864	0.914
640.096	0.930	0.908	0.871	0.858	0.822	0.791	0.863
1281.867	0.881	0.852	0.803	0.786	0.735	0.693	0.792
1447.461	0.869	0.838	0.786	0.768	0.715	0.669	0.774
2087.557	0.824	0.787	0.725	0.703	0.640	0.586	0.711
3369.424	0.740	0.694	0.617	0.590	0.513	0.449	0.600
3589.905	0.727	0.679	0.600	0.572	0.494	0.429	0.583

Tabla 5.7(a) Factores de reducción por área calculados para la subcuenca “Zanjón”

Área (km ²)	Periodo de Retorno (Tr)						Promedio
	5	10	50	100	1000	10000	
1352.984	0.936	0.887	0.796	0.757	0.665	0.595	0.773
1671.752	0.920	0.865	0.765	0.721	0.616	0.535	0.737
2909.707	0.854	0.801	0.703	0.653	0.534	0.429	0.662
4581.459	0.773	0.718	0.619	0.561	0.428	0.305	0.567
5934.443	0.713	0.658	0.559	0.496	0.358	0.233	0.503

En la Figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran las gráficas para los diferentes periodos de retorno calculadas de acuerdo a las ecuaciones de ajuste que son función de las áreas de estudio para cada subcuenca; por otro lado, las Tablas 5.8(a), 5.8(b) y 5.8(c) contienen un resumen de las expresiones para los periodos de retorno utilizados en áreas pequeñas y grandes.

Figura 5.12 Factores de reducción por área para Tr de 5, 10 y 50 años Subcuenca "El Orégano"

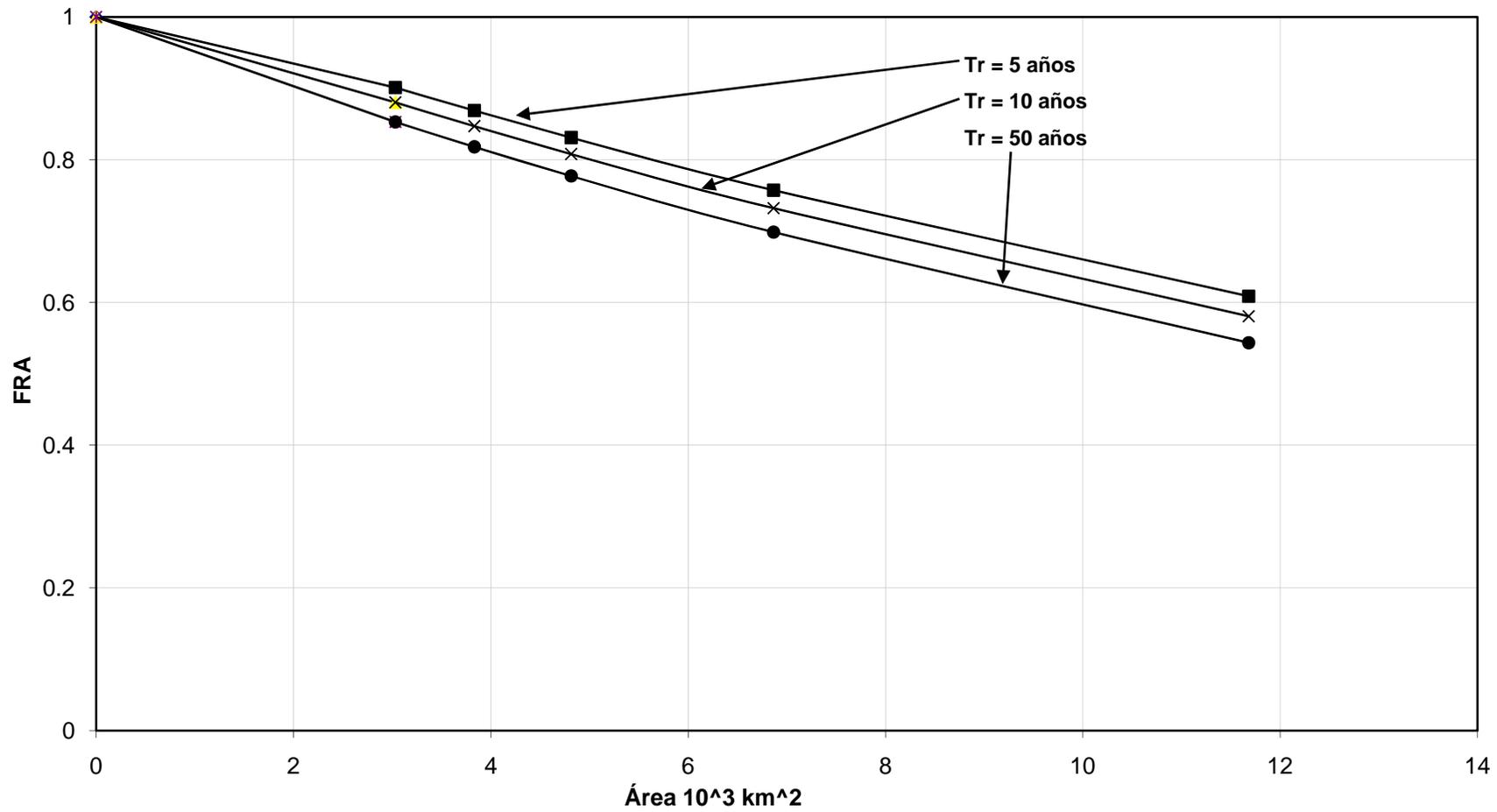


Figura 5.13 Factores de reducción por área para Tr de 100, 1000 y 10000 años Subcuenca "El Orégano"

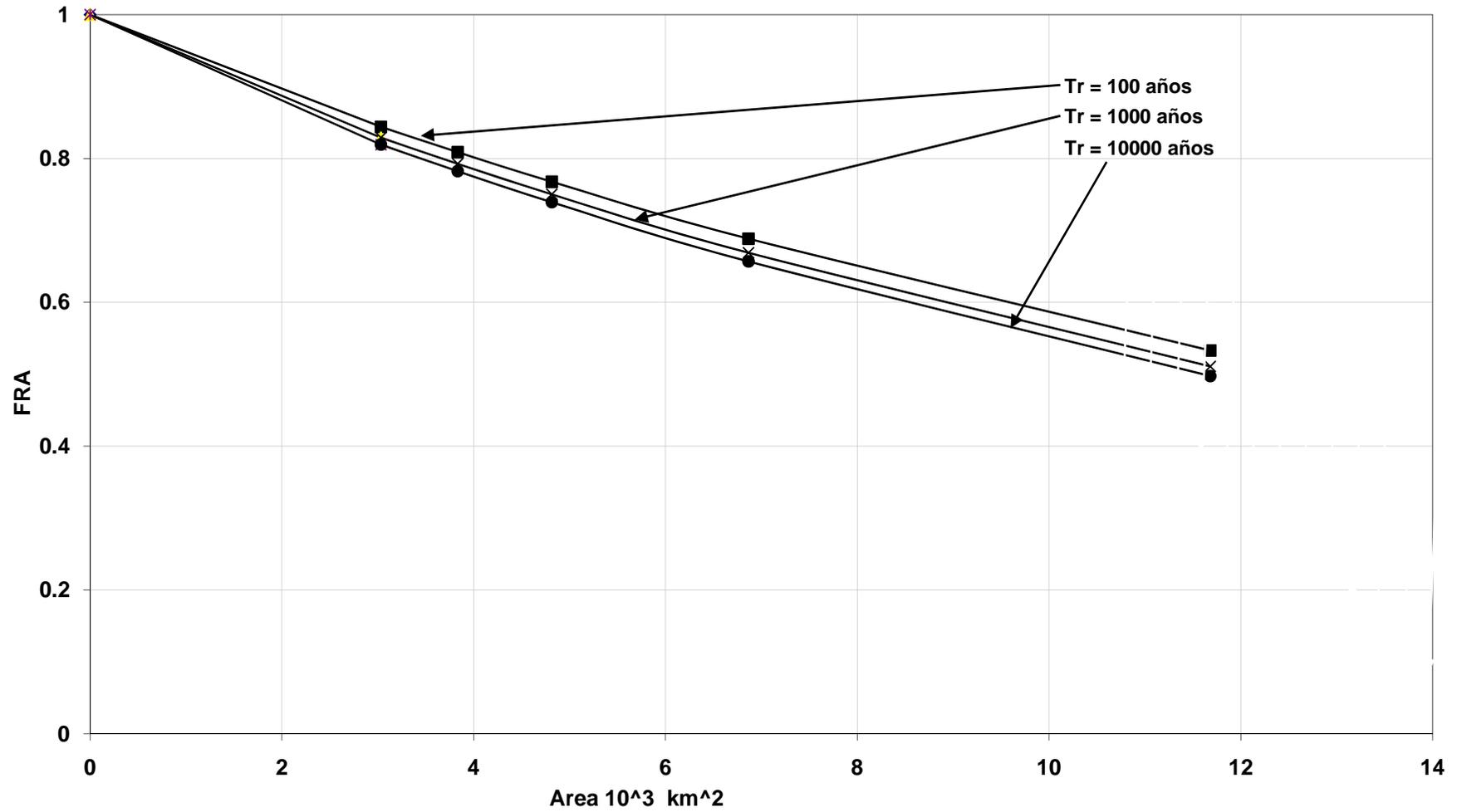


Figura 5.14 Factores de reducción por área para Tr de 5, 10 y 50 años Subcuenca "El Cajón"

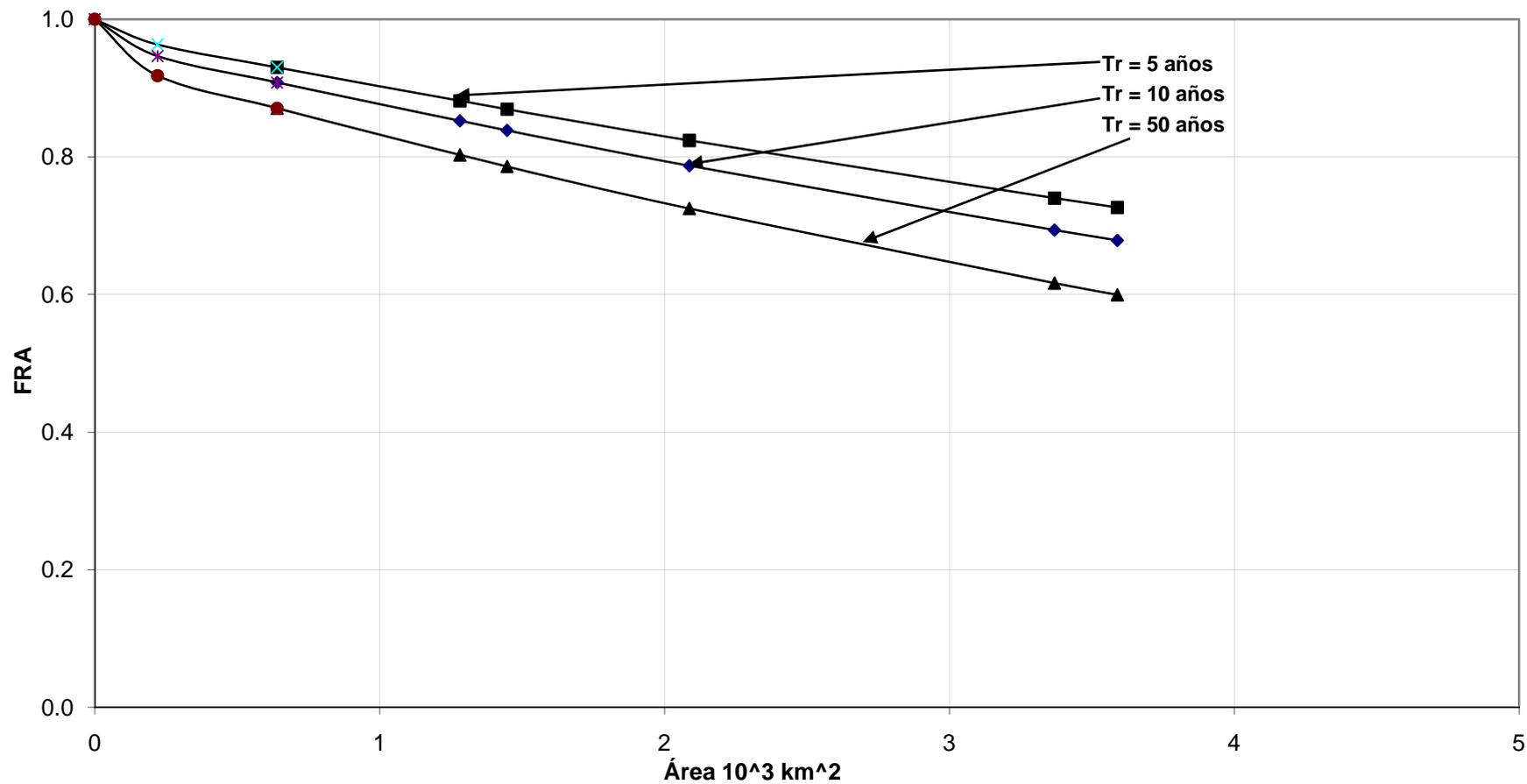


Figura 5.15 Factores de reducción por área para Tr de 100, 1000 y 10000 años Subcuenca "El Cajón"

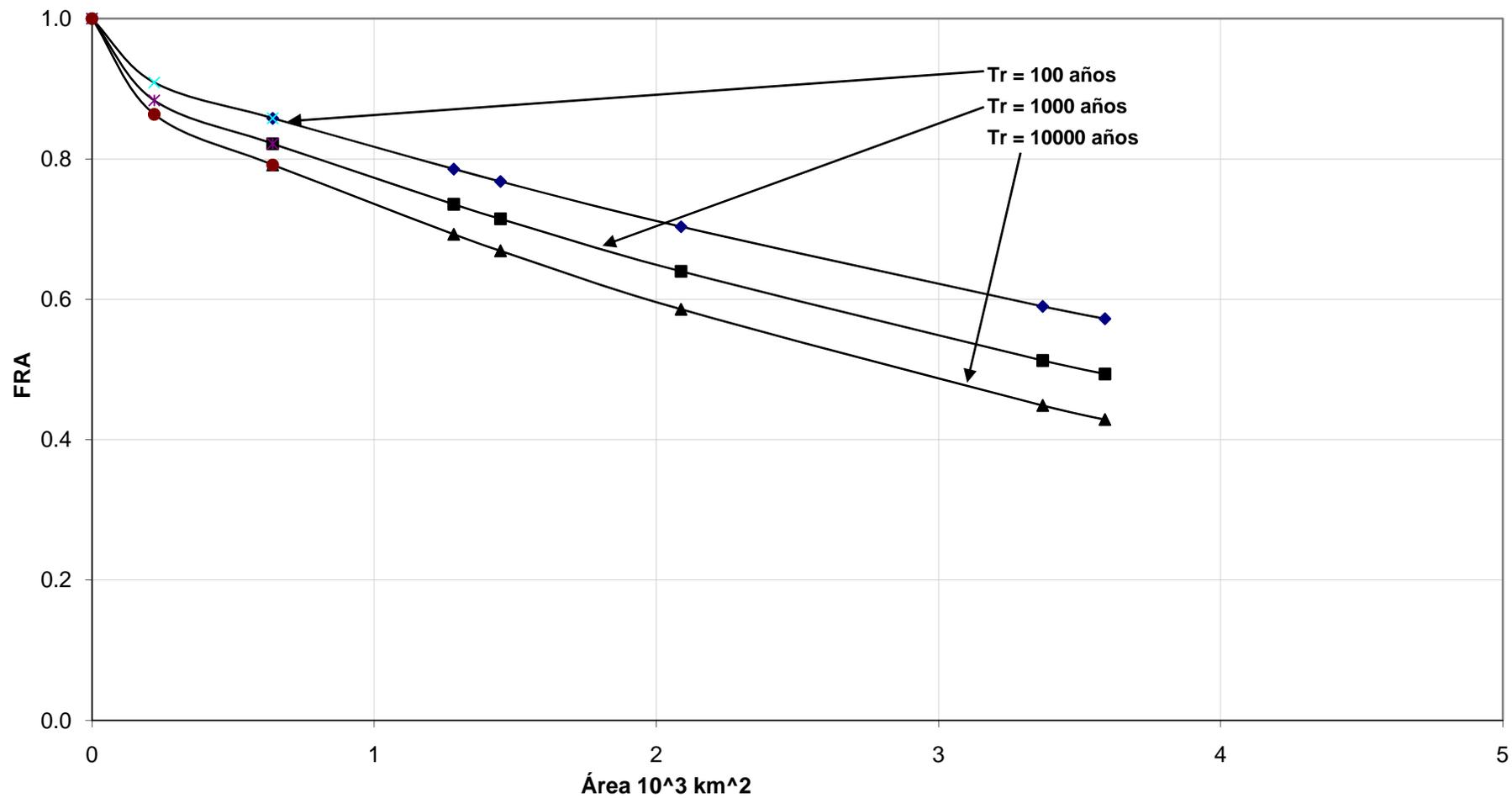


Figura 5.17 Factores de reducción por área para Tr de 5, 10 y 50 años Subcuenca "Zanjón"

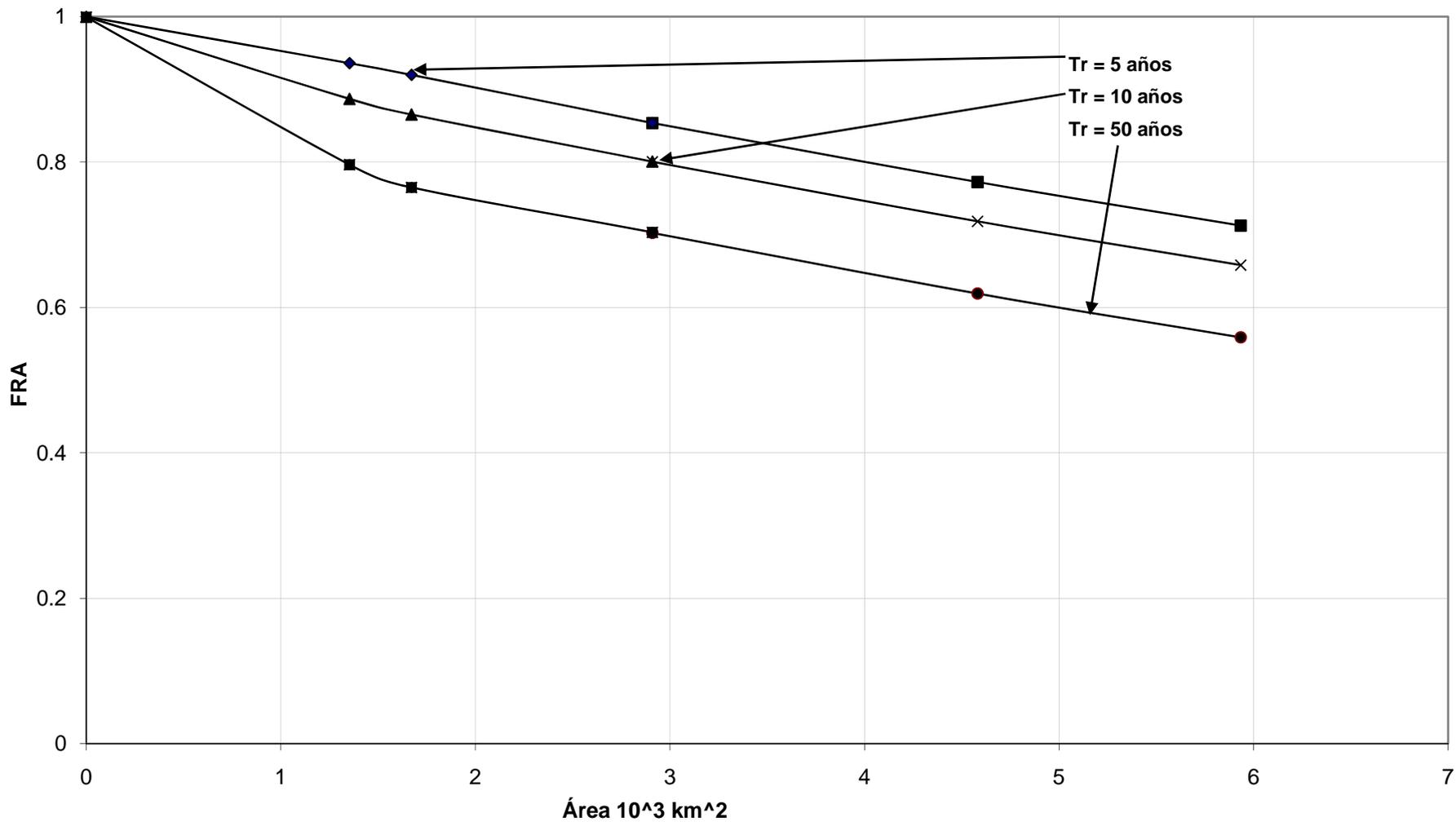


Figura 5.18 Factores de reducción por área para Tr de 100, 1000, 10000 Subcuenca "Zanjón"

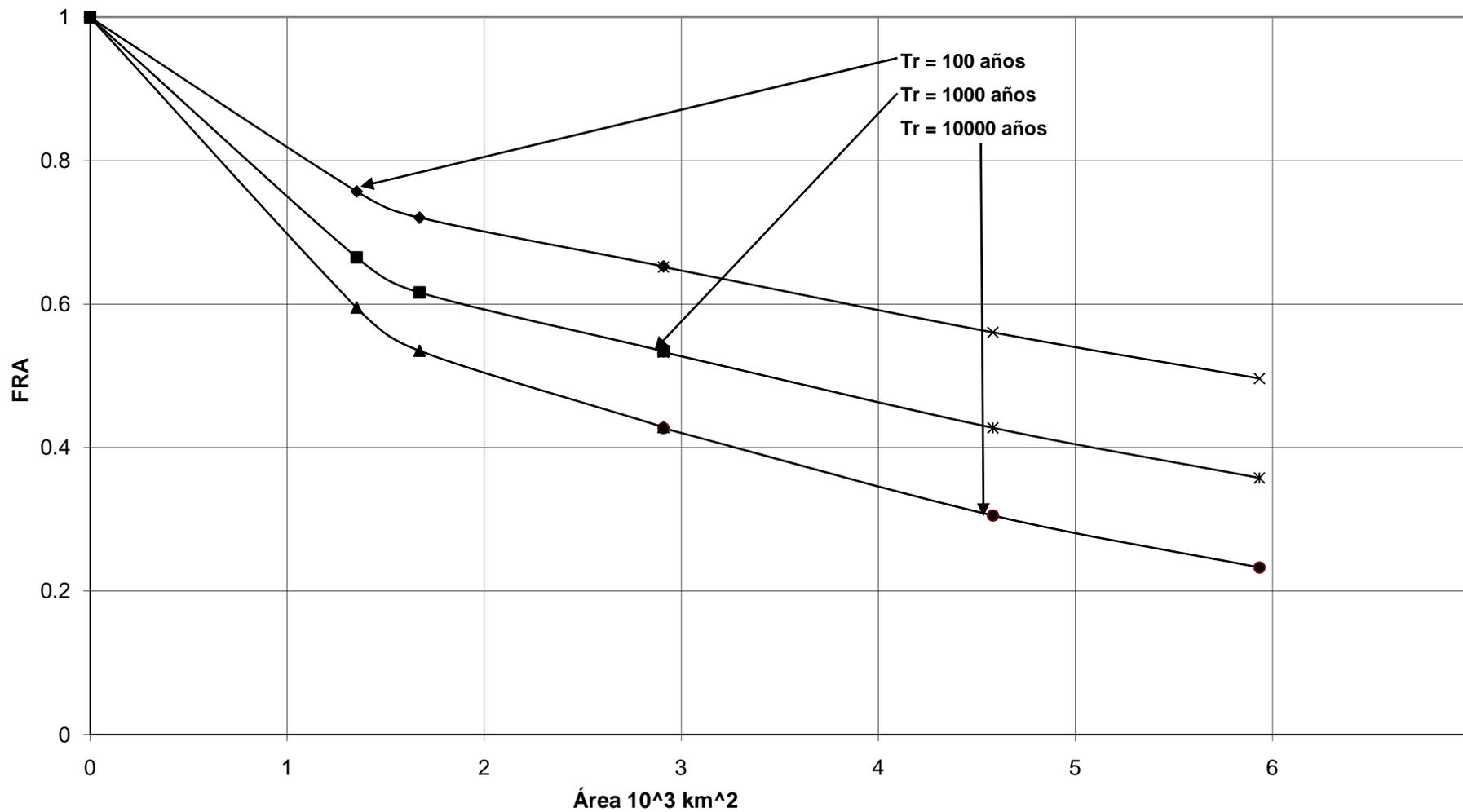


Tabla 5.8(a) Ecuaciones de Ajuste para cada curva en la subcuenca “El Orégano”

Ecuaciones		
	$A \leq 3.033$	$A > 3.033$
Tr = 5 años	$F = 1 - 0.0325840A$	$F = 1.0341e^{-0.04535A}$
Tr = 10 años	$F = 1 - 0.0394482A$	$F = 1.0184e^{-0.04811A}$
Tr = 50 años	$F = 1 - 0.4846757A$	$F = 0.9989e^{-0.05208A}$
Tr = 100 años	$F = 1 - 0.0514739A$	$F = 0.9914e^{-0.05312A}$
Tr = 1000 años	$F = 1 - 0.0563902A$	$F = 0.9823e^{-0.05597A}$
Tr = 10000 años	$F = 1 - .05960383A$	$F = 0.9758e^{-0.05767A}$

Tabla 5.8(b) Ecuaciones de Ajuste para cada curva en la subcuenca “El Cajón”

Ecuaciones		
	$A \leq 0.64$	$A > 0.64$
Tr = 5	$F = 0.01362A^2 - 0.19648A + 1$	$F = 0.9812e^{-0.08371A}$
Tr = 10	$F = 0.23625A^2 - 0.29484A + 1$	$F = 0.0967e^{-0.09872A}$
Tr = 50	$F = 0.40425A^2 - 0.46092A + 1$	$F = 0.9439e^{-0.12642A}$
Tr = 100	$F = 0.45693A^2 - 0.51443A + 1$	$F = 0.9367e^{-0.13724A}$
Tr = 1000	$F = 0.59641A^2 - 0.66038A + 1$	$F = 0.9176e^{-0.17265A}$
Tr = 10000	$F = 0.69807A^2 - 0.77266A + 1$	$F = 0.9041e^{-0.20788A}$

Tabla 5.8(c) Ecuaciones de Ajuste para cada curva en la subcuenca “Zanjón”

Ecuaciones		
	$A \leq 2.91$	$A > 2.91$
Tr = 5	$F = 0.00188A^2 - 0.04482A + 1$	$F = 1.0156e^{-0.05971A}$
Tr = 10	$F = 0.00972A^2 - 0.09671A + 1$	$F = 0.9660e^{-0.00646A}$
Tr = 50	$F = 0.03102A^2 - 0.19198A + 1$	$F = 0.8754e^{-0.07562A}$
Tr = 100	$F = 0.03844A^2 - 0.23098A + 1$	$F = 0.8466e^{-0.08999A}$
Tr = 1000	$F = 0.05594A^2 - 0.32238A + 1$	$F = 0.7822e^{-0.13185A}$
Tr = 10000	$F = 0.06580A^2 - 0.38742A + 1$	$F = 0.7652e^{-0.20047A}$

Como los factores calculados son para áreas específicas con las ecuaciones de ajuste se elaboró una tabla en donde se puede obtener de manera rápida el Factor de Reducción por Área (FRA) para diferentes periodos de retorno; estos valores se muestran en las Tablas 5.9(a), 5.9(b) y 5.9(c) y de manera gráfica en las Figuras 5.19(a), 5.19(b) y 5.19(c).

Tabla 5.9(a) Factores de reducción para la subcuenca “El Orégano”

Área (1000km ²)	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
1	0.967	0.961	0.952	0.949	0.944	0.940
2	0.935	0.921	0.903	0.897	0.887	0.881
3	0.902	0.882	0.855	0.846	0.831	0.821
4	0.862	0.840	0.811	0.802	0.785	0.775
5	0.824	0.801	0.770	0.760	0.743	0.731
6	0.788	0.763	0.731	0.721	0.702	0.690
7	0.753	0.727	0.694	0.684	0.664	0.652
8	0.719	0.693	0.659	0.648	0.628	0.615
9	0.687	0.661	0.625	0.615	0.594	0.581
10	0.657	0.630	0.593	0.583	0.561	0.548
11	0.628	0.600	0.563	0.553	0.531	0.517
12	0.600	0.572	0.535	0.524	0.502	0.488

Tabla 5.9(b) Factores de reducción para la subcuenca “El Cajón”

Área (1000 km ²)	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
0.25	0.959	0.941	0.910	0.900	0.872	0.850
0.50	0.936	0.912	0.871	0.857	0.819	0.788
0.75	0.922	0.898	0.859	0.845	0.806	0.774
1.00	0.902	0.876	0.832	0.817	0.772	0.734
1.50	0.865	0.834	0.781	0.762	0.708	0.662
2.00	0.830	0.794	0.733	0.712	0.650	0.597
2.50	0.796	0.756	0.688	0.665	0.596	0.538
3.00	0.763	0.719	0.646	0.621	0.547	0.485
3.50	0.732	0.685	0.606	0.579	0.501	0.437
4.00	0.702	0.652	0.569	0.541	0.460	0.394

Tabla 5.9(c) Factores de reducción para la subcuenca “Zanjón”

Área (1000 km ²)	Periodo de Retorno (Tr)					
	5	10	50	100	1000	10000
0.50	0.9772	0.9539	0.9111	0.8933	0.8517	0.8215
1.00	0.9534	0.9128	0.8384	0.8067	0.7324	0.6771
2.00	0.9029	0.8453	0.7395	0.6910	0.5778	0.4871
2.50	0.8762	0.8188	0.7133	0.6621	0.5425	0.4414
3.00	0.8490	0.7958	0.6978	0.6464	0.5267	0.4194
3.50	0.8241	0.7705	0.6719	0.6179	0.4931	0.3794
4.00	0.7998	0.7460	0.6470	0.5907	0.4616	0.3432
4.50	0.7763	0.7223	0.6230	0.5647	0.4322	0.3105
5.00	0.7535	0.6993	0.5999	0.5399	0.4046	0.2809
5.50	0.7313	0.6770	0.5776	0.5161	0.3788	0.2541
6.00	0.7098	0.6555	0.5562	0.4934	0.3546	0.2298

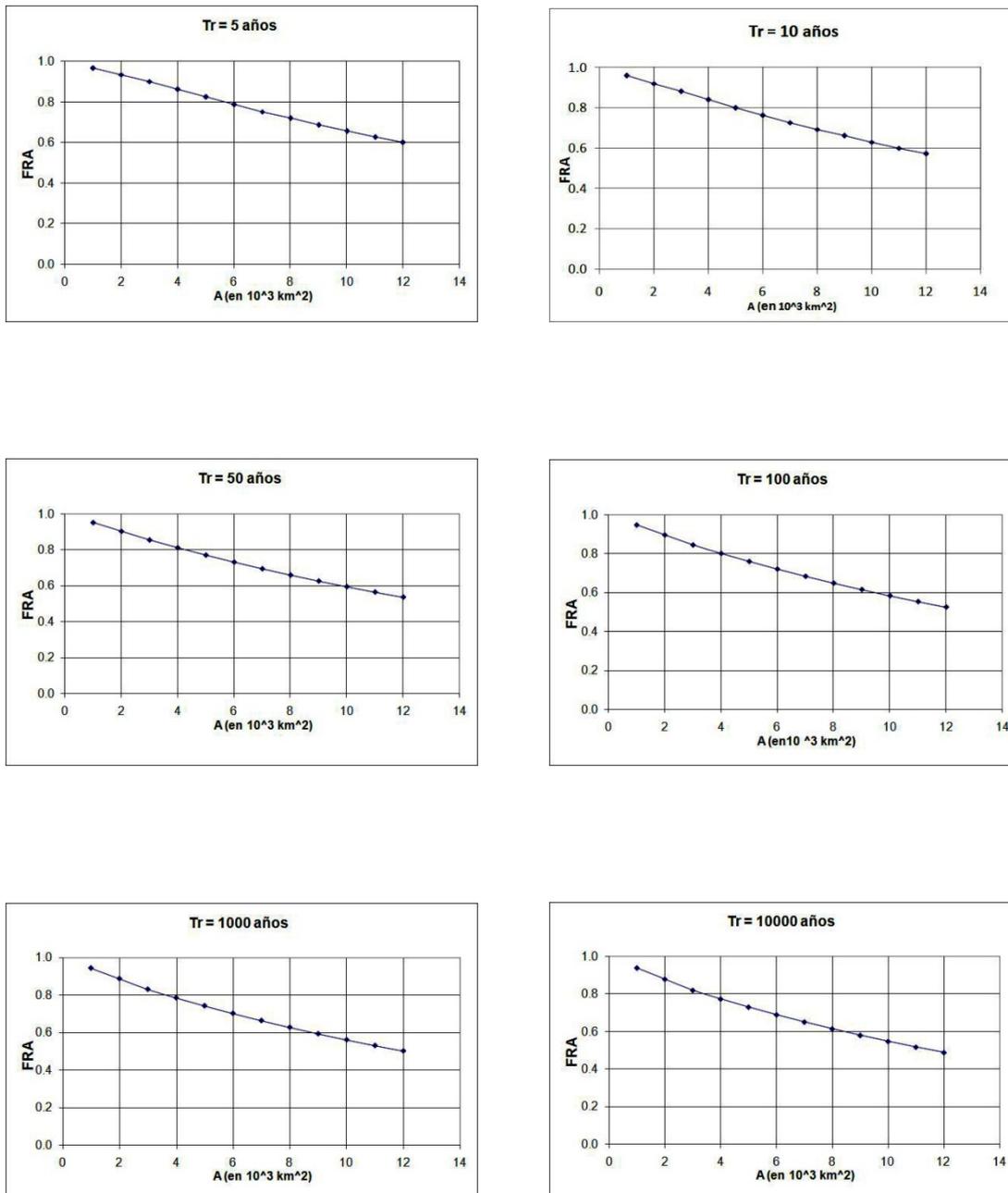


Figura 5.19(a) Gráficos del factor de reducción por área para la subcuenca “El Orégano”

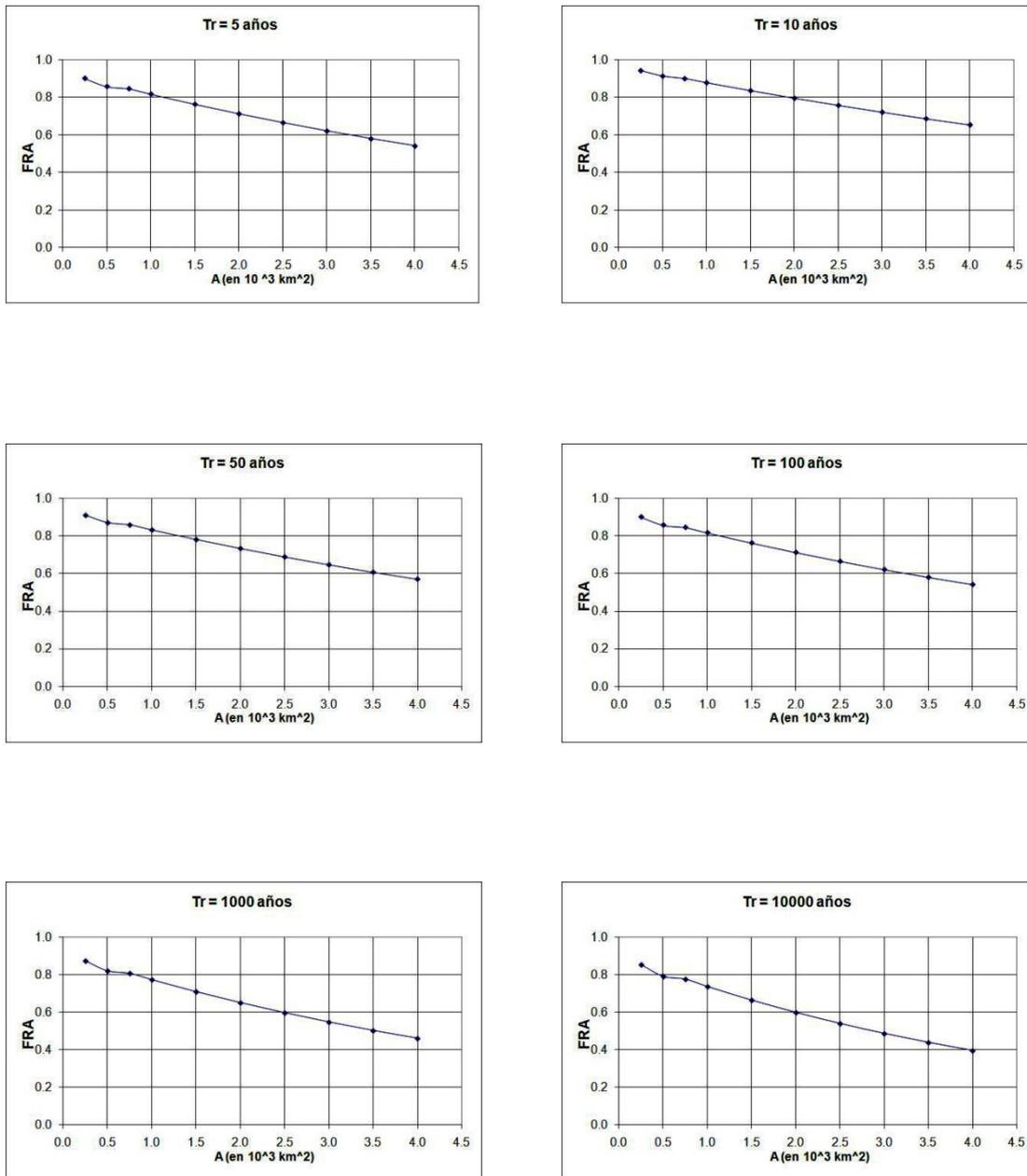


Figura 5.19(b) Gráficos del factor de reducción por área para la subcuenca “El Cajón”

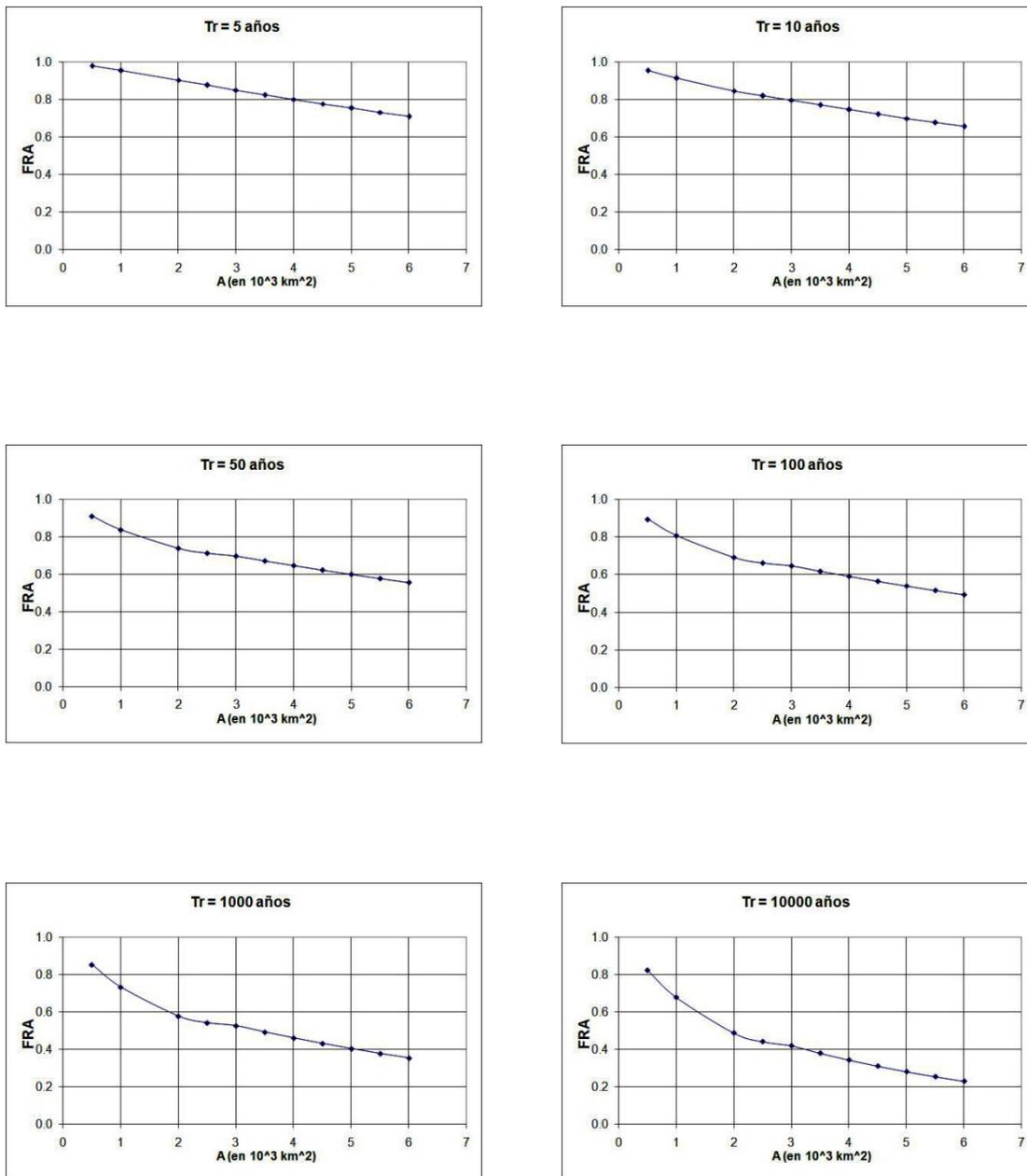


Figura 5.19(c) Gráficos del factor de reducción por área para la subcuenca “Zanjón”

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Sistemas de Información Geográfica, toman una mayor importancia en la actualidad ya que de ellos se pueden tomar las características fisiográficas de un lugar de interés, pero se debe comparar la información generada a través de los SIG, con la ya existente, todo esto debido a que un SIG puede obtener información errónea que calcule un área o un parteaguas defectuoso debido a no tomar en cuenta el cauce correcto que solo se puede observar en la información existente.

Los Sistemas de Información Geográfica, pueden auxiliar para el cálculo de elementos hidrológicos, pero no pueden sustituir el conocimiento previo del usuario de ellos, ya que como se menciona se pueden obtener información errónea, que solo puede corregir el usuario con conocimiento previo.

El factor de reducción por área puede calcularse de dos formas de acuerdo con la literatura técnica; la primera se estima con base en el centro de tormenta de cada evento de lluvia y la segunda a partir de un área geográfica fija y de diferentes eventos, éstos factores son importantes porque consideran el efecto de no simultaneidad de lluvias máximas en el espacio.

En este trabajo se utilizó el área geográfica fija de tipo empírico, ya que solo son validas para la zona de estudio debido a que las precipitaciones en un área no son uniformes, es decir, se puede considerar una precipitación en cierta zona, pero también se pueden tener errores en los estudios y resultados realizados al no considerar precipitaciones en zonas vecinas, que pueden influir de manera directa en estos estudios.

El área geográfica fija tiene como finalidad encontrar la relación de las lluvias medias máximas anuales contra las lluvias máximas ambas asociadas a un periodo de retorno, en donde se busca involucrar cada uno de los elementos en estudio.

El método que se utilizó para medir la precipitación media fue el de polígonos de Thiessen, debido a la facilidad y rapidez con la que se puede calcular las áreas involucradas de cada una de las estaciones del estudio con el Sistema de Información Geográfica utilizado, debido a que este contó con una herramienta para calcular dichas áreas, expresadas en la ecuación 4.2 del presente trabajo.

De los resultados que se obtuvieron del cálculo de FRA para la cuenca del río Sonora se destaca lo siguiente:

El factor de reducción por área disminuye cuando el área de la cuenca aumenta, señalando falta de proporcionalidad al hacerlo, siendo que esta diferencia puede deberse a la características de la zona de estudio, así como falta de información de los últimos años de los datos hidrométricos, ya que los periodos de retorno calculados en función de estos, no son tan precisos como sería al contar con ellos.

Para las tres subcuencas y para periodos de retorno de 5, 10 y 50 años se observan comportamientos similares de manera general, por otro lado se observa que los factores son ligeramente más grandes en periodos de retorno de 100, 1000 y 10000 años, por lo que para estos períodos se observa un comportamiento favorable de las lluvias en la zona de estudio.

Para aplicar este factor en otras zonas se debe de revisar condiciones geográficas, climatológicas del sitio y considerar dichas características como un parámetro de comparación para la determinación de la lluvia de diseño.

El cálculo del factor de reducción por área es variable en cada región geográfica o zona de estudio, y siendo este dependiente de la estimación de la precipitación media y el área de influencia, su cálculo se torna laborioso debido a las múltiples combinaciones y configuraciones de áreas de polígonos (Thiessen) de las estaciones que se presentan en el estudio, debido a la falta de datos hidrométricos en las estaciones involucradas para ciertos periodos de meses o años, provocando cambios en el cálculo y consideración de datos en las áreas de influencia de dicha región, para ciertos periodos de tiempo.

Al tener una herramienta como los Sistemas de Información Geográfica, aparte de facilitar la obtención de los datos hidrológicos, también tiene la ventaja de reducir el tiempo de obtención de las múltiples combinaciones y configuraciones de áreas de polígonos de las estaciones, reduciendo el tiempo en el cálculo del factor de reducción por área.

El conocimiento de los Sistemas de Información Geográfica, ya son necesarios para la Hidrología, porque reducen significativamente nuestros tiempos de cálculo de los estudios hidrológicos, que son necesarios para mejorar los rendimientos de estudio, planeación, proyección y construcción de una obra civil, teniendo mejores beneficios para la sociedad.

REFERENCIAS

- Aparicio M. F. J (1992) “Fundamentos de hidrología de superficie”, Ed. Limusa.
- Aragón H. (2003), “Curso de Arc View GIS 3.2 con aplicación en hidrología superficial” CENAPRED, México D.F.
- Camargo H., Franco V. (1998) “Adquisición de datos”, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM
- Campos A. (1998), “Procesos del Ciclo Hidrológico”, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, tercera reimpresión, San Luis Potosí, S.L.P. México.
- Chow Ven Te, (1994) “Hidrología aplicada”, ed. Mc Graw Hill
- ESRI, (1997) ArcView GIS 3.2 User’s manual Redlands, Ca
- Durand M. R. (2005), “Modelación hidrológica y de erosión hídrica utilizando Sistemas de Información Geográfica y HEC- HMS”, Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM
- Felicísimo A. M (1994), Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Publicación electrónica.
<http://www.etsimi.uniovi.es>
- Fuentes M., Franco V. (1999) “Estudio hidrológico para obras de protección”, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM

Guichard D. (1998) “Regionalización de lluvias y escurrimientos en la cuenca del alto río Grijalva” Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Guichard D. (2002) “Factores de reducción Areal: Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos para episodios convectivos en la comunidad de Valencia”.

Jiménez E. (1992) “Manual de operación del programa Ax.EXE”; CENAPRED, México D.F.

Maderey R. (2005) “Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico” Instituto de Geografía, UNAM, Serie de Textos Universitarios, No. 1

Mena R. (2004), “Factores de reducción por área para el cálculo de lluvias de diseño. Aplicación al estado de Sinaloa”, Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM.

Quintas R., Rodríguez C, Ferrer M. (2005) “Curso sobre los Sistemas de Información Geográfica en el manejo de cuencas, CEDEX, España

Springall R: (1970) “Hidrología primera parte”, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM

ANEXO 1.

En la tablas 1, 2 y 3 se muestran los cálculos del Factor de Reducción por Área para las distintas áreas seleccionadas dentro de la cuenca del Río Sonora.

La tabla 1 es con respecto a los datos de la subcuenca “El Orégano”

La tabla 2 es con respecto a los datos de la subcuenca “El Cajón”

La tabla 3 es con respecto a los datos de la subcuenca “Zanjón”

Tabla 1 Subcuenca El Orégano

Zona 1

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Bacanuchi	26007	1.626	101.626	118.079	154.284	169.599	220.176	270.656
Cananea	26013	23.033	1300.897	1552.416	2105.895	2339.909	3113.123	3884.724
La Cebolla	26232	75.341	5457.729	6621.000	9181.099	10263.755	13839.456	17409.884
S=		100.00	68.603	82.915	114.413	127.733	171.728	215.653
Distrib. Gumbel (mom.) 3p			64.630	74.680	96.800	105.150	137.040	167.890
FRA A= 3032.895 km2			0.942	0.901	0.846	0.823	0.798	0.779

Zona 2

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	43.927	2311.458	2940.937	4325.967	4911.519	6846.520	8778.006
Banamichi	26008	49.502	3566.632	4190.855	5563.550	6144.211	8062.420	9977.164
Cucurpe	26025	1.192	85.258	98.997	129.251	142.037	184.278	226.448
Opedepe	26064	5.379	415.087	500.396	688.173	767.565	1029.892	1291.736
S=		100	63.784	77.312	107.069	119.653	161.231	202.734
Distrib. Gumbel (mom.) 3p			62.170	73.770	99.310	110.110	145.780	181.390
FRA A= 3833.193 km2			0.975	0.954	0.928	0.920	0.904	0.895

Zona 3

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
El Orégano	26032	14.942	1112.742	1317.001	1766.611	1956.675	2584.694	3211.517
La Colorada	26046	5.139	310.622	366.179	488.547	540.249	711.132	881.707
Mazatán	26052	7.833	674.706	823.840	1152.107	1290.824	1749.349	2207.011
S. P. de la Cueva	26088	1.470	91.218	104.184	132.748	144.817	184.700	224.524
Ures	26121	42.273	2961.220	3681.129	5265.519	5935.545	8148.534	10357.718
El Cajón	26180	3.325	260.969	303.694	397.754	437.520	568.919	700.052
Pueblo Álamos	26199	25.018	1845.573	2184.065	2928.599	3243.324	4283.570	5321.814
S=		100	72.571	87.801	121.319	135.490	182.309	229.043
Distrib. Gumbel (mom.) 3p			51.250	58.860	75.610	82.690	106.090	129.440
FRA A= 4814.489 km2			0.706	0.670	0.623	0.610	0.582	0.565

Zona 4

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	24.525	1290.509	1641.953	2415.229	2742.148	3822.477	4900.845
Bacanuchi	26007	0.715	44.688	51.922	67.843	74.577	96.817	119.015
Banamichi	26008	27.643	1991.678	2340.256	3106.797	3431.049	4502.215	5571.447
Cananea	26013	10.171	574.457	685.525	929.934	1033.271	1374.711	1715.439
Cucurpe	26025	0.663	47.456	55.103	71.943	79.060	102.573	126.045
Opedepe	26064	2.996	231.233	278.756	383.361	427.588	573.723	719.589
La Cebolla	26232	33.286	2411.266	2925.207	4056.278	4534.604	6114.375	7691.817
S=		100.00	65.913	79.787	110.314	123.223	165.869	208.442
Distrib. Gumbel (mom.) 3p			51.470	61.110	82.320	91.280	120.910	150.490
FRA A= 6866.089 km2			0.781	0.766	0.746	0.741	0.729	0.722

Tabla 1 Subcuenca El Orégano (continuación)

Zona 5								
Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	14.416	758.588	965.174	1419.722	1611.892	2246.932	2880.818
Bacanuchi	26007	0.420	26.269	30.522	39.881	43.839	56.913	69.961
Banamichi	26008	16.250	1170.800	1375.710	1826.318	2016.928	2646.609	3275.152
Cananea	26013	5.979	337.679	402.967	546.636	607.379	808.086	1008.373
Cucurpe	26025	0.390	27.896	32.392	42.291	46.474	60.296	74.094
El Orégano	26032	6.179	460.136	544.600	730.520	809.115	1068.810	1328.011
La Colorada	26046	2.114	127.792	150.649	200.992	222.262	292.565	362.741
Mazatán	26052	3.229	278.108	339.580	474.889	532.067	721.067	909.712
Opedepe	26064	1.761	135.895	163.824	225.300	251.292	337.175	422.900
S. P. de la Cueva	26088	0.596	36.965	42.220	53.795	58.686	74.848	90.987
Ures	26121	17.414	1219.862	1516.425	2169.108	2445.122	3356.754	4266.818
El Cajón	26180	1.366	107.241	124.798	163.451	179.792	233.788	287.675
Pueblo Álamos	26199	10.320	761.280	900.905	1208.018	1337.839	1766.930	2195.195
La Cebolla	26232	19.566	1417.391	1719.496	2384.363	2665.532	3594.154	4521.406
	S=	100.00	68.659	83.093	114.853	128.282	172.649	216.938
	Distrib. Gumbel (mom.) 3p		40.970	47.810	62.870	69.230	90.260	111.260
	FRA A= 11680.578 km2		0.597	0.575	0.547	0.540	0.523	0.513

Tabla 2 Subcuenca El cajón

Zona 4

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Ures (DGE)	26121	42.686	2930.818	3408.047	4261.766	4567.825	5442.887	6171.110
El Cajón	26180	57.314	4613.780	5489.539	7521.894	8427.456	11665.699	15278.203
	S=	100.00	75.446	88.976	117.837	129.953	171.086	214.493
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	64.150	72.830	91.920	100.000	126.670	153.300
		FRA A= 220.481 km2	0.850	0.819	0.780	0.770	0.740	0.715

Zona 1

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Bacanuchi	26005	100.000	6613.000	8117.000	11833.000	13575.000	20157.000	28029.000
	S=	100	66.130	81.170	118.330	135.750	201.570	280.290
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	61.490	71.410	93.240	102.470	132.970	163.420
		FRA A= 640.096 km2	0.930	0.880	0.788	0.755	0.660	0.583

Zona 3

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Banamichi	26008	0.004	0.278	0.319	0.400	0.459	0.531	0.623
Opedepe	26064	99.996	8308.682	10510.598	15719.398	18077.308	26651.980	36424.606
	S=	100	83.090	105.109	157.198	180.778	266.525	364.252
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	75.100	89.060	119.800	132.790	175.730	218.590
		FRA A= 1281.866 km2	0.904	0.847	0.762	0.735	0.659	0.600

Zona 2

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	8.411	448.658	549.761	747.510	824.053	1060.073	1277.253
Cucurpe	26025	91.589	6881.977	8292.443	11614.366	13113.673	18550.380	24722.544
	S=	100	73.306	88.422	123.619	139.377	196.105	259.998
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	69.860	81.270	106.390	117.010	152.100	187.120
		FRA A= 1446.165 km2	0.953	0.919	0.861	0.840	0.776	0.720

Zona 5

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	5.800	309.353	379.065	515.415	568.191	730.929	880.676
Bacanuchi	26007	30.678	2028.716	2490.108	3630.091	4164.497	6183.702	8598.650
Cucurpe	26025	63.523	4773.093	5751.342	8055.309	9095.175	12865.880	17146.672
	S=	100.00	71.112	86.205	122.008	138.279	197.805	266.260
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	58.160	67.170	87.010	95.400	123.100	150.760
		FRA A= 2087.756 km2	0.818	0.779	0.713	0.690	0.622	0.566

Zona 6

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	3.625	193.363	236.937	322.163	355.152	456.872	550.472
Bacanuchi	26007	19.001	1256.512	1542.281	2248.345	2579.336	3829.957	5325.687
Banamichi	26008	0.001	0.106	0.122	0.153	0.175	0.203	0.238
Cucurpe	26025	39.336	2955.714	3561.490	4988.210	5632.142	7967.133	10617.992
Opedepe	26064	38.037	3160.470	3998.038	5979.371	6876.276	10137.924	13855.252
	S=	100.00	75.662	93.389	135.382	154.431	223.921	303.496
		Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p	56.400	65.680	86.120	94.760	123.300	151.800
		FRA A= 3369.423 km2	0.745	0.703	0.636	0.614	0.551	0.500

Tabla 2 Subcuenca El cajón (continuación)

Zona 7

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Arizpe	26005	3.376	180.059	220.635	299.998	330.716	425.438	512.598
Bacanuchi	26007	17.839	1179.674	1447.968	2110.855	2421.605	3595.749	5000.013
Banamichi	26008	0.001	0.049	0.056	0.070	0.080	0.093	0.109
Cucurpe	26025	36.946	2776.126	3345.095	4685.128	5289.935	7483.052	9972.846
Opedepe	26064	35.716	2967.634	3754.098	5614.539	6456.720	9519.358	13009.872
Ures (DGE)	26121	2.598	178.406	207.457	259.425	278.055	331.323	375.651
El Cajón	26180	3.525	283.729	337.585	462.566	518.255	717.394	939.548
S=		100.00	75.657	93.129	134.326	152.954	220.724	298.106
Distrib. Gumbel (mx. ver.) 3p			51.810	60.650	80.100	88.330	115.500	142.630
FRA A= 3805.534 km2			0.685	0.651	0.596	0.577	0.523	0.478

Tabla 3. Subcuenca Zanjón

Zona 3

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
El Oregano	26032	42.832	3340.934	4606.205	8867.609	11402.863	23964.773	44945.836
La Colorada	26046	12.586	768.524	910.498	1224.402	1358.824	1820.744	2309.599
Psa Abelardo	26090	29.625	1900.718	2534.686	4540.275	5679.343	11021.262	19371.861
Hermosillo	26139	14.956	1427.597	2079.401	4622.304	6307.751	15815.592	34350.723
S=		100	74.378	101.308	192.546	247.488	526.224	1009.780
Distrib. Lognormal mx ver. 3p			69.210	86.310	128.750	148.710	224.430	315.430
FRA A= 135298.41 km2			0.931	0.852	0.669	0.601	0.426	0.312

Zona 1

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Cucurpe	26025	9.949	800.188	1167.800	2633.469	3620.298	9295.736	20613.981
Felix Gomez	26035	10.870	770.553	1080.775	1424.149	2376.879	4205.380	6676.717
Querobabi	26074	79.181	5668.597	8945.916	19764.473	26107.696	56991.615	107504.606
S=		100.00	72.393	111.945	238.221	321.049	704.927	1347.953
Distrib. Lognormal mx ver. 3p			67.930	90.820	150.310	179.320	293.850	438.570
FRA A= 167175.19 km2			0.938	0.811	0.631	0.559	0.417	0.325

Zona 2

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Carbo	26016	53.001	3958.6143	4718.6428	6427.9119	7170.4502	9754.2291	12537.29
Opedepe	26064	12.885	979.887	1416.036	3031.657	4063.083	9622.732	19892.537
El Cajón	26180	34.115	2699.832	3134.794	4079.087	4477.887	5825.416	7222.751
S=		100	76.383	92.695	135.387	157.114	252.024	396.526
Distrib. Lognormal mx ver. 3p			66.950	78.550	104.040	114.900	151.960	190.860
FRA A= 290970.69 km2			0.877	0.847	0.768	0.731	0.603	0.481

Zona 4

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Carbo	26016	33.700	2517.040	3000.295	4087.115	4559.249	6202.116	7971.693
Cucurpe	26025	3.639	292.654	427.101	963.143	1324.058	3399.746	7539.186
Felix Gomez	26035	3.968	281.257	394.489	519.823	867.575	1534.989	2437.042
Opedepe	26064	8.179	579.801	813.226	1071.597	1788.475	3164.326	5023.876
Querobabi	26074	28.851	1761.670	2087.114	2806.669	3114.803	4173.651	5294.242
El Cajón	26180	21.664	1714.466	1990.679	2590.330	2843.579	3699.296	4586.642
S=		100.00	71.469	87.129	120.387	144.977	221.741	328.527
Distrib. Lognormal mx ver. 3p			54.380	65.650	91.450	102.820	143.010	187.160
FRA A= 458145.88 km2			0.761	0.753	0.760	0.709	0.645	0.570

Zona 5

Nombre	Clave	% Thiessen	Periodo de Retorno (Tr)					
			5	10	50	100	1000	10000
Carbo	26016	25.984	1940.734	2313.343	3151.322	3515.356	4782.069	6146.481
Cucurpe	26025	2.801	225.251	328.733	741.315	1019.105	2616.728	5802.787
El Oregano	26032	9.753	760.749	1048.859	2019.204	2596.496	5456.914	10234.420
Felix Gomez	26035	3.067	217.420	304.953	401.840	670.663	1186.596	1883.911
La Colorada	26046	2.871	175.304	207.689	279.292	309.955	415.321	526.831
Opedepe	26064	6.307	479.677	693.183	1484.067	1988.974	4710.551	9737.860
Querobabi	26074	22.297	1596.251	2519.129	5565.584	7351.807	16048.576	30272.801
Psa Abelardo	26090	6.718	431.025	574.789	1029.596	1287.902	2499.285	4392.946
Hermosillo	26139	3.459	330.181	480.934	1069.068	1458.886	3657.904	7944.796
El Cajón	26180	16.743	1325.013	1538.482	2001.918	2197.639	2858.974	3544.752
S=		100.00	74.816	100.101	177.432	223.968	442.329	804.876
Distrib. Lognormal mx ver. 3p			52.680	63.260	87.340	97.900	135.080	175.680
FRA A= 593444.29 km2			0.704	0.632	0.492	0.437	0.305	0.218