

DESARROLLO DE UNA APLICACION INFORMÁTICA BASADA EN SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
OFERTA HIDRICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BUCARAMANGA
2004

DESARROLLO DE UNA APLICACION INFORMÁTICA BASADA EN SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
OFERTA HIDRICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ

Monografía para optar al Título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Director
GERMÁN EDUARDO GAVILÁN LEÓN
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BUCARAMANGA
2004

Al recordar una de las frases célebres de Albert Einstein, cuando afirmó que **el valor de lograr algo, reside en buscar lograrlo**, pienso en mi familia. Catherine, Jorge Andrés, Alejandro..., su paciencia y aliento junto a la de mis padres, Urbano y Ligia, mientras yo recorría en un sentido y en otro parte de mi país, cada fin de semana, durante casi año y medio, además del deseo de dar un paso más en mi búsqueda personal, fueron la fuente de mi persistencia. Siempre recordaré un momento especial durante dicho período, brindado por Jorge Andrés, en medio de uno de los pocos instantes que pasamos juntos:

- **En qué ibas pensando cuando te caíste en la carrera, hijo mío?**
- **Papi, en que iba a ganar ...**

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi gratitud a mis compañeros de la Corporación Autónoma Regional del Cesar, de quienes siempre se obtuvo palabras de estímulo, además del personal directivo que facilitó el que iniciara y culminara mis estudios estando al servicio de la entidad. Igualmente, quiero agradecer al ingeniero Hernán Porras Díaz, Director de la Especialización, a las ingenieras Vanessa Quiroga Arciniegas y Edilma Herrera Ortiz y al ingeniero Gonzalo Jaimes Muñoz, compañeros de estudio y camaradas a la vez, quienes con su actitud siempre receptiva, me hicieron sentir que no me había alejado de mi hogar.

Al ingeniero Germán Eduardo Gavilán León, excelente maestro y profesor como pocos, quien ratificó que la sencillez al difundir el conocimiento, es tal vez la virtud que más eleva el espíritu humano.

Al especialista en Hidrogeología, Hugo Cañas Cervantes, de la Subdirección de Hidrología del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales con sede en Bogotá, quien suministró la información básica sobre el régimen del clima en la zona bajo estudio y quien, además, brindó asesoría para el análisis de los resultados.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	6
3. OBJETIVOS	7
3.1 OBJETIVO GENERAL	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3.2.1 Desarrollar una aplicación basada en SIG, para la valoración de la oferta hídrica superficial.	7
3.2.2 Estimar, mediante el uso de la geoestadística, la variación espacial de las variables que intervienen en el balance hídrico.	7
3.2.3 Generar un Modelo Digital de Elevación que permita definir la red de drenaje.	7
3.2.4 Determinar la oferta o disponibilidad hídrica superficial por medio del balance hídrico.	7
4. MARCO TEORICO	8
4.1 ANALISIS HIDROLÓGICO	8
4.1.1 Sistemas hidrológicos	8

4.1.2. Modelos hidrológicos	9
4.1.3 Balance hídrico	11
4.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA HIDROLOGÍA	13
5. METODOLOGÍA	14
5.1 CONSTRUCCION DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	14
5.1.1 La geoestadística en el análisis del balance hídrico.	14
5.1.2 Modelos digitales del terreno.	14
5.1.2.1 Generación de los modelos digitales del terreno.	17
5.1.2.2 Medición, interpolación y procedimientos de contorno.	17
5.1.2.3 Modelos del terreno basados en interpolaciones de redes regulares.	18
5.1.2.4 Redes regulares basadas en redes irregulares.	18
5.1.2.5 Modelos del terreno basados en triangulación.	20
5.1.2.6 Interpolación en la construcción de modelos digitales del terreno.	21
5.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA EXISTENTE	23
5.2.1 Construcción del modelo digital de elevación.	23
5.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EXISTENTE	23

5.3.1 Modelos digitales para el balance hídrico superficial.	23
5.3.2. Generación de la red de drenaje.	29
5.4 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS PARA EL PROCESAMIENTO.	31
5.5 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN O MÓDULO OPERATIVO SISTEMATIZADO, BASADO EN SIG.	34
6. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Ciclo hidrológico	9
Figura 2. Localización de las estaciones climatológicas	26
Figura 3. Modelo de flujo para los modelos digitales del terreno	30
Figura 4. Modelo de organización de los datos	33
Figura 5. Formato de levantamiento de los requerimientos 1 y 3	36
Figura 6. Formato de levantamiento del requerimiento 2	37
Figura 7. Formato de levantamiento del requerimiento 4	38
Figura 8. Interfase de la aplicación SIGPER	40
Figura 9. Flujo en ocho direcciones	47
Figura 10. Flujo de mayor pendiente	47
Figura 11. Acumulación de flujos	48
Figura 12. Red de drenaje	48
Figura 13. Links de la red de drenaje.	49
Figura 14. Subcuencas derivadas de la red de drenaje	49

Figura 15. Modelo digital de precipitación Spline Tension, peso 0.1	55
Figura 16. Modelo digital de evapotranspiración Ingeominas – Corpocesar 1994	56
Figura 17. Modelo digital del balance hídrico superficial	57
Figura 18. Subcuencas con mayor aporte de agua superficial	60
Figura 19. Sitio de embalse Los Besotes (arroyo Capitanejo)	61
Figura 20. Modelo digital del balance hídrico superficial (mayo número de intervalos de clase)	63

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Métodos de digitalización	16
Tabla 2. Polinomios para interpolación	19
Tabla 3. Estaciones climatológicas – Norte del departamento del Cesar – Precipitación Media Anual y Mensual Multianual	25
Tabla 4. Resultados del modelo digital del balance hídrico superficial	53
Tabla 5. Asignación de caudales, derivaciones principales del río Guatapurí	54
Tabla 6. Caudales por subcuenca derivados del modelo digital de balance Hídrico	59

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Modelos digitales de precipitación	65
Anexo B. Modelos Digitales de Evapotranspiración	75
Anexo C. Modelos digitales de balance hídrico superficial	78
Anexo D. Modelos digitales de la hidrografía (red de drenaje)	92
Anexo E. Modelos digitales de elevación	96
Anexo F. Scripts en lenguaje Avenue para la aplicación SIGPER	99

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UNA APLICACION INFORMÁTICA BASADA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HIDRICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA *

AUTOR: JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ **

PALABRAS CLAVES: balance, modelo digital, oferta hídrica, celdas, precipitación, evapotranspiración

DESCRIPCION O CONTENIDO: La determinación de la oferta hídrica del país es una de las disposiciones del Gobierno Nacional, dirigidas al manejo racional del recurso hídrico se enfocan al establecimiento de la línea base o diagnóstico del estado actual de dicho recurso. A través del Decreto 1729 (6 de agosto de 2002) se establece la necesidad de valorar dicha oferta, para la elaboración de Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas por parte de las autoridades ambientales, encargadas de administrar las corrientes superficiales.

Mediante el uso de los sistemas de información geográfica se desarrolló una aplicación informática encaminada a la evaluación de la oferta hídrica, partiendo de características geográficas, culturales y climatológicas de un territorio en particular. Se tomó en cuenta el relieve, hidrografía, precipitación y evapotranspiración para la obtención del balance hídrico superficial, y su comparación con la demanda de agua.

Se generaron modelos digitales del terreno, mediante técnicas estadísticas basadas en conceptos espaciales, utilizando como insumo el valor de las variables a que se ha hecho alusión, poniendo en práctica el concepto de hidrología espacial y obteniendo como resultado una representación en forma de imagen digital, del comportamiento espacial de las variables, con el propósito de facilitar la toma de decisiones por parte de las autoridades aludidas anteriormente en relación con la administración del agua superficial. Se encontró un ajuste entre el resultado final y las observaciones históricas de caudal medio multianual para la cuenca seleccionada (tres resultados son muy cercanos), sin embargo, se requiere de mayor cantidad de datos para análisis posteriores, aunque se resalta la utilidad de la herramienta desarrollada.

* Monografía

** Facultad, Ingenierías Físico Mecánicas; Programa, Especialización en Sistemas de Información Geográfica; Director, Germán Eduardo Gavilán León

INTRODUCCIÓN

La determinación de la oferta hídrica, es decir, la cantidad de agua disponible en un territorio dado, es de la mayor importancia para la estabilidad del mismo, habida cuenta que todos los elementos que allí habitan o permanecen, ya sean plantas, animales o seres humanos, dependen de dicho recurso para su sustento.

Históricamente, los estudios de diagnóstico, o de línea base ambiental, estimaban dicha disponibilidad basados en registros de los valores de variables climáticas, los cuales muchas veces no se extienden más allá de unos pocos kilómetros de la zona de interés. También, el devado número de cálculos numéricos que es necesario desarrollar para el adecuado procesamiento de la Información estadística sobre el clima, hace casi imposible el que se pueda evaluar diferentes alternativas, más aún cuando la principal característica de dichas variables (precipitación, evaporación, humedad, temperatura, dirección y velocidad de los vientos, brillo solar, entre otros) es su aleatoriedad.

Con el advenimiento de la tecnología de los sistemas de información geográfica, SIG, la hidrología, ciencia encargada del estudio del comportamiento del agua en el medio natural, cuenta con una poderosa herramienta puesto que al disponerse de medios automáticos, contemplan ahora sí la posibilidad de llevar a cabo análisis multitemporales y con el número de variables requerido en forma ideal, especialmente considerando un factor imprescindible: la distribución espacial de la información).

El Gobierno Nacional, a través del decreto 1729 del 06 de agosto de 2002 estipuló la necesidad de valorar la oferta actual y futura de agua, con el propósito de que dicha información sea de utilidad para la formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de las cuencas hidrográficas del país. Causa no menos que curiosidad que, tan sólo, después de 28 años, se haya reglamentado un aspecto a todas luces preponderante para la planificación y gestión ambientales. Hasta la fecha, han sido pocos los esfuerzos que han tenido como resultado una adecuada evaluación de la disponibilidad de agua para diversos usos. Lo anterior, tal vez por cuanto como se ha anotado, no se disponía de los medios tecnológicos que facilitarían esa tarea. Con base en la información espacial básica (topografía, precipitación, hidrografía) se ha generado un medio que, utilizado convenientemente, se encamina al logro del objetivo fijado por el Decreto en cuestión. Es así como se recurrió a métodos basados en la generación de los llamados modelos digitales del terreno, para el procesamiento rápido y variado de la información aludida, a través de programas y herramientas computacionales de última generación, logrando así la obtención de resultados en más corto tiempo que lo que alguna vez se hubiera deseado en el pasado.

No obstante lo anterior, queda aún un largo camino por recorrer. Colombia es un país tropical, localizado en una de las zonas con comportamiento climático más impredecible, lo cual hace que los diversos estudios, planes, proyectos y programas, ya sean de orden regional o nacional, se basen en pronósticos que tengan como sustento análisis más confiables de los datos históricos, en el contexto geográfico en que se han recolectado. El desarrollo de nuevas metodologías de cálculo de variables como la evapotranspiración, tendrá que dar paso a la tecnología de punta: se está comenzando a llevar a cabo una investigación para la evaluación, por medio de satélites, de dicha variable, no medida hasta el momento sino calculada a través de fórmulas empíricas que, en ocasiones, no producen los resultados deseados.

Lo propuesto en el presente escrito, pretende ser un aporte al desarrollo institucional del departamento del Cesar, en donde necesariamente tendrá que darse un proceso de inducción, cuya velocidad dependerá de factores culturales que tendrán que ser puestos de lado o modificados poco a poco. Con la monografía se quiere contribuir al mejoramiento del conocimiento acerca del tratamiento óptimo de la información geográfica y sus aplicaciones prácticas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El departamento del Cesar, se ubica al noreste de la República de Colombia, limitando con los departamentos de Guajira, Magdalena, Bolívar, Santander y Norte de Santander, así como con la República Bolivariana de Venezuela

En su territorio se encuentran cinco regiones naturales – Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de Los Motilones o Perijá, Valles de los ríos Cesar y Magdalena y complejo cenagoso de Zapatosa y humedales menores del río Magdalena. Cada una de estas zonas tiene características propias, determinantes de, y determinadas por, un régimen climático especial en el que inciden mayoritariamente los dos macizos montañosos aludidos, y que afecta decididamente la disponibilidad hídrica departamental. El aprovechamiento del agua superficial en las cuencas hidrográficas del departamento del Cesar ha sido influenciado históricamente tanto por las condiciones climáticas, como por el régimen de uso del suelo, el que a su vez es un factor que depende de circunstancias culturales, o del modelo de desarrollo, de la región.

De otra parte, la Corporación Autónoma Regional del Cesar, Corpocesar - cuya jurisdicción corresponde al departamento del Cesar -, como autoridad ambiental y en lo relacionado con el recurso hídrico, ha venido reglamentado su aprovechamiento a través de su ordenamiento y distribución, además de la aprobación o improbación de los derechos de uso (concesión) por parte de usuarios y/o propietarios de predios rurales. El régimen de aprovechamiento así regulado por la autoridad ambiental, no siempre se ha podido mantener estable, debido a circunstancias como los cambios la distribución temporal y espacial de las precipitaciones, con las consecuentes modificaciones en el comportamiento del régimen de las diversas corrientes superficiales. A lo anterior, se suma el hecho de que los usuarios, en su afán por obtener, en cada temporada semestral o anual, mayores resultados económicos derivados de la actividad socioeconómica agropecuaria o agroindustrial, no se detienen a reflexionar si es posible captar los mismos caudales de agua que originalmente se les asignó por parte de la autoridad competente (dichas asignaciones datan de por lo menos hace 16 años en el mejor de los casos y sólo la corriente río Ariguaní, se comenzó a reglamentar en el año 2.000, estando próximo a culminar este proceso).

El Decreto 1729 del 06 de agosto de 2002, expedido por el entonces Ministerio del Medio Ambiente, hoy Ministerio de Vivienda, Ambiente y Desarrollo Territorial, reglamenta el decreto Ley 2811 de 1974 (Código Nacional de los Recursos Naturales) en lo relacionado con la formulación de los Planes de Ordenamiento de Cuencas Hidrográficas según los que, entre otros variados aspectos, se debe prever la oferta actual y futura de los recursos naturales renovables, dando prioridad al inventario y uso del recurso hídrico, y dentro de este, el consumo humano, seguido

de los demás usos que hagan tanto la especie humana como las demás especies (ecosistemas).

La información - sobre el uso del agua superficial - disponible en Corpocesar no refleja la situación relacionada con la forma en que actualmente se hace uso del recurso por parte de los usuarios del mismo, asentados en las cuencas hidrográficas del departamento del Cesar. Sólo el 14% de las corrientes está reglamentado, para el que además, no se dispone en la entidad de registros históricos de caudal actualizados, o no se han llevado sistemáticamente por parte de la misma, para fines de hacer seguimiento a la efectividad de las reglamentaciones. También, el inventario de los usuarios y predios oficialmente registrados para cada corriente superficial no corresponde, en muchos casos, con las circunstancias actuales, por lo que no es posible el ejercer un adecuado manejo y administración del recurso hídrico.

Los usos asignados al agua, por los usuarios, han variado indiscriminadamente, pasando del agrícola al pecuario o al agroindustrial y aún al urbano, en forma cíclica, sin control efectivo por parte del Estado, y sin registrarse la cantidad de agua realmente captada por los usuarios, el área realmente beneficiada con la captación y el impacto sobre la cantidad de agua disponible en la corriente. A lo anterior se agrega la inexistencia de obras de control y regulación en los puntos de derivación de las corrientes principales, lo que resulta en que las reglamentaciones y/o concesiones pierdan efectividad durante cada una de las épocas estacionales. Asimismo, Corpocesar no tiene en forma integrada la información a que se ha hecho alusión (usuarios, caudales asignados), con la cartografía que representa la red hidrográfica superficial del departamento del Cesar, a pesar de que se cuenta con software del tipo Sistemas de Información Geográfica – como ArcView GIS 3.2, AutoCAD R12 – y aplicaciones de otro tipo que, en principio, pueden brindar apoyo decisivo a la labor de administración del recurso hídrico.

El panorama descrito, que ha sido una constante en la última década, resulta principalmente en el siguiente problema:

- Desconocimiento de la distribución (oferta) espacial y temporal del recurso hídrico superficial en las cuencas hidrográficas del departamento del Cesar.
- Dificultad para realizar consultas rápidas, referidas al contexto geográfico, acerca de la disponibilidad del recurso hídrico.
- Base de datos, organizada aunque no actualizada ni georeferenciada, en lo relacionado con cantidad y tipo de usuarios, por lo que hay dificultad para

especificar la real ubicación de los usuarios y predios objeto de las asignaciones de caudal.

El problema aludido se puede afrontar, para la cuenca hidrográfica que se esté analizando, mediante la consideración de:

- Determinación de la oferta hídrica superficial.
- Georeferenciación de puntos de captación (obras de toma) directa de la corriente principal de la cuenca de estudio.
- Integración sistemática de la información hidrológica (actualizada o reciente) relacionada con la oferta de agua superficial, la información relacionada con asignación de agua a los usuarios y la cartografía temática correspondiente para la cuenca.

Así, se tendrá una herramienta que sirva de soporte al diseño ágil de programas, políticas y estrategias para el manejo del recurso hídrico y conlleve a una mejora en el posterior proceso de toma de decisiones en torno a la gestión del agua.

Para el análisis que se desarrolla, se toma la cuenca del río Guatapurí, ubicada sobre el flanco suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el departamento del Cesar. Posee un área de 860 km², abarcando todos los climas, desde el nivel hasta el cálido seco, en razón a que su altura máxima se ubica en alrededores de los picos más altos del país (Bolívar y Colón) a cerca de 5400 metros de altura sobre el nivel mar y su desembocadura, en el río Cesar, está sobre los 100 metros de altura sobre la misma referencia. Esta cuenca es la surtidora del acueducto de la capital del departamento, Valledupar, así como de corregimientos importantes como Guatapurí, Chemesquemena y Sabana de Crespo. La mayor parte de su territorio está catalogado como Reserva Forestal Protectora, Resguardo Indígena y en una menor proporción geográfica, pero de mayor importancia ambiental y legal, Parque Nacional Natural (Sierra Nevada de Santa Marta). Corpocesar cuenta con información digitalizada para esta cuenca, a escala 1:25.000, y para las zonas aledañas a escalas diferentes, lo cual será tenido en cuenta para el análisis a llevar a cabo.

2. JUSTIFICACIÓN

La propuesta anteriormente reseñada, una vez esté implementada entrará a suplir una de las carencias, en materia de organización de la información espacial y temática, de que adolece Corpocezar, aumentando así el potencial de la institución para ejercer sus funciones de una mejor manera, más adecuada y acorde con las necesidades de respuesta de sus clientes externos e internos.

Esta aproximación facilita el conocer, tanto por parte de la autoridad ambiental como por parte de los usuarios que se asientan en una cuenca hidrográfica, la situación global de la misma en lo relacionado con la posibilidad de aprovechar el recurso hídrico superficial, con lo que puede contribuirse a la resolución de conflictos históricamente originados por el problema representado por el desconocimiento de la disponibilidad de agua, sobretudo en cuencas no instrumentadas.

3. OBJETIVOS

Tomando como referencia el área geográfica constituida por la cuenca hidrográfica bajo estudio:

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al desarrollo institucional mediante el uso de tecnología para la planificación y gestión del recurso hídrico

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.2.1 Desarrollar una aplicación basada en SIG, para la valoración de la oferta hídrica superficial.

3.2.2 Estimar, mediante el uso de la geoestadística, la variación espacial de las variables que intervienen en el balance hídrico.

3.2.3 Generar un Modelo Digital de Elevación que permita definir la red de drenaje.

3.2.4 Determinar la oferta o disponibilidad hídrica superficial por medio del balance hídrico.

4. MARCO TEÓRICO

Se entiende por hidrología espacial al procesamiento de la información estadística hidrológica de un área geográfica, conjuntamente con el análisis de la información espacial inherente de dicha área, a través de la utilización de modelos digitales del terreno (MDT). Los datos hidrológicos pueden ser desarrollados a partir de los MDT, mediante el uso de diversas técnicas, lo cual es un punto de partida para realizar posteriores análisis relacionados con el comportamiento hidrológico de la zona bajo estudio. Así, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han ganado utilidad para el procesamiento de datos hidrológicos, a pesar de lo cual dicha información, de manera general, aún debe servir de entrada a otros modelos (tales como HEC-HMS o el Gis Hydro 97 Watershed Modelling System) con el objetivo de completar estudios más complejos.

4.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

4.1.1 Sistemas hidrológicos. El conocimiento o entendimiento del balance hídrico tiene importancia de primer nivel para los habitantes de un país, puesto que de dicho entendimiento se debe desprender la formulación de políticas, programas, planes y proyectos de desarrollo que van desde el nivel nacional hasta el local, habida cuenta que es el agua la base de todo programa de desarrollo.

La determinación del balance hídrico, de manera general, contempla el análisis y procesamiento de información climática, compuesta por las siguientes variables: Evaporación, Precipitación, Infiltración y Escorrentía.

Este análisis puede ser realizado para un punto, un sector o un área geográfica, ya que las variables mencionadas presentan una variación continua en el espacio, es decir, su valor se encuentra distribuido sobre el área geográfica que se considere.

Las variables que intervienen en la determinación del balance hídrico pueden representarse mediante su ubicación en el llamado ciclo hidrológico, en la que se tienen tres componentes:

- Sistema de agua atmosférica: contiene los procesos de precipitación, evaporación, transpiración e intercepción.

- Sistema de agua superficial: contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea y escorrentía hacia ríos y océanos.
- Sistema de agua subsuperficial: contiene los procesos de infiltración, recarga de acuíferos, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea.

El anterior planteamiento se representa en la Figura 1.

Figura 1. Ciclo Hidrológico



Tomado de OPS: El Ciclo Hidrológico

No obstante lo anterior, para la mayor parte de los problemas prácticos, sólo se considera algunos procesos del ciclo hidrológico en un determinado momento, y únicamente se tiene en cuenta una pequeña porción de la superficie de la Tierra. Así, se llama sistema hidrológico, a una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas (precipitación), opera en ellas internamente (escorrentía) y las produce como salidas (evaporación e infiltración). Este sistema hidrológico es aleatorio, ya que su mayor entrada es la precipitación, un fenómeno altamente variable e impredecible, por lo que el análisis estadístico cumple un papel importante en el estudio de dicho sistema.

4.1.2 Modelos Hidrológicos. En el estudio de cuencas hidrográficas, el balance hídrico está dominado por el proceso lluvia – escorrentía como sistema hidrológico. La divisoria de aguas es una línea que separa la superficie de la tierra cuyo drenaje fluye hacia un río dado, de las superficies cuyos desagües corren hacia otros ríos. La frontera del sistema hidrológico se proyecta verticalmente desde la divisoria de aguas, siendo la lluvia la entrada, distribuida en el espacio sobre el plano superior;

el caudal del río es la salida, concentrado en el espacio de la salida de la cuenca, la evaporación y el flujo subsuperficial también pueden considerarse como salidas, pero son pequeños comparados con el caudal aludido.

Al examinar el proceso en detalle, se encuentra que los diversos elementos que constituyen una cuenca hidrográfica (camino recorrido por el agua o red de drenaje, forma, pendiente, rugosidad) cambian continuamente en el tiempo y en el espacio. Por lo anterior, el esfuerzo normalmente se dirige hacia la construcción de un modelo que relacione entradas y salidas en lugar de llevar a cabo la extremadamente difícil tarea de una representación exacta del sistema, las cuales pueden llegar a ser desconocidas o no significativas desde un punto de vista práctico.

Es aquí donde interviene el concepto de modelo hidrológico, el cual es una aproximación al sistema real, en donde las entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Los modelos hidrológicos se clasifican, de acuerdo con el grado y modo de aproximación al mundo real, en:

- Modelos determinísticos: no consideran aleatoriedad, una entrada produce siempre una misma salida.
- Modelos estocásticos: consideran, en sus procesos, la aleatoriedad, es decir, una entrada puede no producir siempre la misma salida.

Cada clase de modelo a su vez se subdivide, de acuerdo con la variación espacial. Los fenómenos hidrológicos cambian en las tres dimensiones espaciales y en el tiempo (lo cual los hace muy complicados de analizar detalladamente). Se tiene entonces la siguiente subclasificación:

Los modelos determinísticos son agregados, cuando el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones en el espacio, o distribuidos, cuando el sistema es considerado como una sucesión de procesos hidrológicos ocurriendo en varios puntos del espacio, siendo entonces las variables dependientes del espacio.

- Los modelos estocásticos se clasifican en independientes en el espacio y correlacionados en él de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio.

- Al considerar la variación en el tiempo, los modelos determinísticos son clasificados como de flujo permanente, en los que la tasa de flujo no cambia, y modelos de flujo no permanente, y los modelos estocásticos son independientes del tiempo (eventos hidrológicos no relacionados entre sí) y correlacionados en el tiempo (eventos hidrológicos que influyen en subsiguientes eventos).

En la práctica, los modelos hidrológicos consideran sólo una o dos de las cinco fuentes de variación (aleatoriedad, tiempo y tres dimensiones espaciales)

4.1.3 Balance Hídrico. El cálculo del balance hídrico se constituye en una de las fuentes de información para abordar el estudio básico Hidrológico de una región. Primordialmente consiste este cálculo en la evaluación de la siguiente expresión, para un sistema hidrológico:

Entradas de agua al sistema = agua que circula dentro del sistema + agua que sale del sistema \pm cambios de almacenamiento de agua en el sistema.

Para el análisis a realizar en la presente monografía, se tomará una forma abreviada del modelo o ecuación del balance hídrico a largo plazo de la cuenca hidrográfica:

$$R = P - ETP - D, \text{ donde}$$

- R es la Escorrentía o escurrimiento, (agua que corre sobre el suelo en un punto determinado del cauce principal, dentro del sistema)
- P es la Precipitación (agua que cae desde la atmósfera sobre la cuenca hidrográfica), constituye la principal entrada al sistema.
- ETP es la Evapotranspiración potencial (agua, en forma de vapor, que escapa desde el suelo y la vegetación de la cuenca hidrográfica, hacia la atmósfera), principal salida del sistema hidrológico junto con la infiltración.
- D es la Demanda de agua en el cauce principal de la cuenca hidrográfica (opera dentro o es una salida del sistema).

La precipitación (P) es obtenida a partir de su medición en pluviómetros ubicados en estaciones climatológicas, mientras que la evapotranspiración (ETP) se calcula mediante fórmulas o relaciones matemáticas, en las que intervienen una o más

variables adicionales, generalmente siendo estas la precipitación y la altura del punto geográfico de interés, aunque podrían considerarse otras variables como la radiación solar, temperatura, humedad atmosférica, etc.

Al tomar los valores de las variables medidas y/o calculadas para cada punto o sector de la cuenca, el modelo aludido antes (Ecuación 1) puede ser considerado como distribuido (variación continua en el espacio).

Existen diversos métodos para calcular el valor de las variables que intervienen en el balance hídrico. Para el caso de la presente monografía, en el que se ha escogido a una cuenca hidrográfica en el departamento del Cesar, la revisión de la literatura disponible señala que se han aplicado diversos métodos (modelos) para el país, los cuales se describirán en forma resumida más adelante.

En cuanto a la demanda de agua, en el presente trabajo se contempla sólo aquella que se presenta en la corriente principal de la cuenca hidrográfica. El valor de esta variable puede llegar a depender, para cada sitio, del estado de la corriente misma en otros sitios aguas arriba y de su influencia sobre la escorrentía en el cauce o drenaje principal en cuestión. La demanda de agua está constituida por la cantidad total que diversas personas toman del cauce mediante obras de toma (bocatomas), mediante colocación de mangueras o simplemente adecuando la entrada de un canal, sobre una de las márgenes de dicho cauce. Posteriormente, el agua captada es destinada a usos específicos, destacándose el consumo humano, agrícola, pecuario y, en menor grado en algunos casos, el industrial. Este aspecto está representado por el término D en la Ecuación 1.

Las autoridades ambientales estipulan la demanda en cuestión, generalmente, evaluando las necesidades de cada predio o usuario asentado en la cuenca hidrográfica, para cada uno de los usos específicos (agrícola, pecuario, consumo, industrial) y asignando mediante un acto administrativo la cantidad o caudal (expresado normalmente en litros/segundo) que debe captarse. El agua es conducida, generalmente, desde el cauce principal, mediante un canal primario a partir del cual se derivan subcanales (llamados derivaciones o subderivaciones, según el caso) hasta llegar al predio objeto de asignación de agua. La suma de caudales otorgados a todos los predios constituye la demanda del recurso agua superficial en el punto de la corriente principal en donde se tiene el inicio del canal primario. Así, en un momento dado puede establecerse si para determinado punto en donde se desea realizar una demanda específica, se tendrá la disponibilidad hídrica suficiente que la satisfaga.

El análisis de la disponibilidad hídrica en una cuenca hidrográfica es uno de los aspectos básicos en los análisis hidrológicos, tomando como base el registro histórico de la cantidad de agua que, en sus diversas formas, circula por la cuenca, llegando a almacenarse en ocasiones grandes cantidades de información. Dichos

análisis revisten gran importancia, ya que a partir de ellos se puede determinar las posibilidades de aprovechamiento del recurso hídrico por parte de la población asentada en la cuenca. Los análisis se efectúan para obtener información espacial y temporal acerca de ciertas variables, para realizar generalizaciones regionales y establecer relaciones entre las variables.

El escurrimiento (R) anual de una cuenca para un año hídrico puede ser estimado como la diferencia entre la precipitación (P) y la evapotranspiración (ETP), si se puede establecer por estudios hidrogeológicos que la infiltración (I) profunda es relativamente insignificante, lo cual generalmente es cierto para períodos largos de tiempo (El tratamiento de la infiltración requiere de investigación extensiva de campo, lo cual está fuera del alcance de la presente monografía).

4.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA HIDROLOGÍA.

Los sistemas de información geográfica (SIG) se aplican ampliamente en los campos de la hidrología operativa y la evaluación de los recursos hídricos. Muchos aspectos de recolección e interpretación de datos pueden ser facilitados por medio de los SIG normalmente empleados en microcomputadores o computadores personales. La tecnología SIG es una herramienta para mejorar los análisis ambientales, que se han sesgado hacia otros temas (vegetación, fauna, suelo, cultura)

En este trabajo, y a través de los SIG, se hará uso de Modelos Digitales del Terreno, para procesar la información requerida para el Balance Hídrico, siguiendo el procedimiento que se esboza de manera general a continuación:

Asignar a un primer modelo digital la información de precipitación, a un segundo modelo la información de evapotranspiración, para luego hacer uso de operaciones aritméticas entre mapas (entre modelos) aplicando la ecuación (1) general del balance hídrico reseñada arriba. Un papel importante en este proceso lo desempeñarán el conjunto de técnicas conocidas como geoestadística, que hacen uso de métodos de interpolación que analizan el comportamiento o variación en el espacio de variables regionalizadas, tal como son las climáticas (involucradas en el balance hidrológico). Así, se busca el logro de uno de los objetivos específicos planteados en el presente trabajo.

5. METODOLOGÍA

En este aparte se describe la base del método utilizado para el modelamiento del terreno de la cuenca escogida.

5.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

La construcción de modelos digitales de una superficie (del terreno en este caso) se basa en la técnica conocida como geoestadística, que realiza el análisis de la distribución de variables regionalizadas, teniendo en cuenta las relaciones o dependencias entre los diversos puntos o regiones.

5.1.1 La geoestadística en el análisis del balance hídrico. Un componente importante de la geoestadística lo constituye la estimación de valores de una variable (precipitación), tomando en cuenta uno o más criterios (altitud, velocidad del viento), en sitios o localizaciones en donde no se ha medido, a partir de valores de la misma variable en sitios en los que sí se ha logrado hacer su medición. Tales estimaciones se basan en la interpolación de los valores que se desea conocer.

A continuación se presenta una descripción de algunos conceptos a utilizar en el análisis hidrológico a realizar, y que están relacionados con el tema del presente numeral.

5.1.2 Modelos digitales del terreno. Un modelo digital del terreno (MDT) puede ser descrito como una representación, en 3 dimensiones, de una superficie con coordenadas X, Y, Z almacenadas en formato digital.

La idea del modelado de superficie puede ser aplicada a varias disciplinas, entre ellas, Ingeniería Civil, análisis de datos o aplicaciones estadísticas, de tal manera que los valores que adopten las coordenadas dependen del campo de aplicación:

Generalmente, X e Y expresarán posiciones en un plano bidimensional horizontal sobre el cual se proyectará la coordenada Z en forma vertical, la cual expresará ya sea la altura o nivel de elevación (cuando se trate de topografía), precipitación, humedad del suelo, evaporización, temperatura (cuando se trate de clima), o en algunos casos, una variable no espacial, por ejemplo, población humana o de alguna especie animal en particular.

El uso más extendido de los MDT es el de la representación de la altura de la superficie del terreno, en cuyo caso, el modelo es llamado digital de elevación (MDE). Así, los MDE son herramientas útiles tanto en el diseño como en la ejecución o construcción de un proyecto de Ingeniería como por ejemplo:


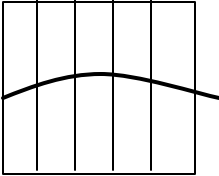
- Diseño horizontal y vertical de carreteras.
- Cálculo de volúmenes óptimos de movimiento de tierra.
- Análisis de cuencas hidrográficas.
- Localización de presas y embalses (incluyendo su monitoreo una vez construidas).
- Planeación paisajista y análisis de impacto ambiental.

Para la construcción de modelos, la información es capturada mediante métodos directos o indirectos:

- Directos: Levantamientos topográficos (método tradicional), levantamientos usando el sistema de posicionamiento global, mediciones de datos en campo.
- Indirectos: Digitalización (almacenamiento en computador) de mapas en los que se ha representado la información de interés (curvas de nivel)
- Toma de fotografías aéreas o de imágenes satélites, a partir de las cuales se sigue un proceso de determinación de elevación (por ejemplo) de los puntos de interés, sobre un nivel de referencia.

El método más ampliamente usado es la digitalización de mapas topográficos. Este proceso se lleva a cabo a través de dispositivos electrónicos llamados digitalizadores, con los que se traspa la información de cada curva de nivel, del mapa al computador, lo que a su vez se desarrolla mediante dos métodos: Seguimiento lineal o Barrido de áreas. Estos, pueden ser llevados a cabo manualmente, semi-automáticamente o automáticamente y cuya combinación se resume en la Tabla 1

. Tabla 1 Métodos de digitalización

Modo	Medición (captura de datos)	Atributos	Características de	
			i) Operación Manual	ii) Operación Automática
 <p>a) Seguimiento Lineal</p>	<p>Puntos medidos solamente a lo largo de las curvas de nivel.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selectiva, sólo se miden las curvas de nivel. • Menor cantidad de datos para ser registrados y almacenados • Cantidad de tiempo requerida para la medición de las curvas de nivel la longitud total de dichas curvas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja velocidad de medición. • Hardware de bajo costo económico. • Baja velocidad en el registro de datos. • Codificación de elementos relativamente fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad en la medición y registro de datos. • Hardware de alto costo económico. • Intervención de un operador para la codificación de elementos.
<p>b) Barra de áreas.</p> 	<p>La totalidad del área del mapa es medida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No selectivo, se barre y mide a totalidad del mapa. • Se necesita registrar y almacenar grandes cantidades de datos. • Cantidad de tiempo requerida para la medición de las curvas de nivel es proporcional al tamaño y resolución de la línea de barrido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja velocidad. • Gran cantidad de tiempo requerido. <p>No es práctica su implementación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad en la medición y registro de datos. • Hardware de muy alto costo económico. • Operaciones separadas para codificación y etiquetado de los elementos. • Procesamiento considerable después de la medición

Tomado de: Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering, G, Petrie and T.J.M, Kennie, 1990, pág. 20. McGraw-Hill.

En todos los casos, el mapa es colocado sobre el digitalizador, y un cursor electrónico es deslizado sobre el mapa.

En el modelo de seguimiento lineal manual, la operación se lleva a cabo mediante un digitalizador que es guiado por la persona que realiza el trabajo de captura de la información.

El seguimiento lineal semiautomático o automático, se llevó a cabo en un principio, mediante la operación de equipos electrónicos que leían la información (curva de nivel) a través de un sensor que iluminaba y barría una pequeña área para así establecer la presencia y dirección de la misma.

El método de barrido automático de áreas, se basa en el uso de un dispositivo conocido como barredor (scanner, en idioma inglés), capaz de producir y almacenar un archivo de datos de coordenadas en bruto, para todas las líneas y símbolos que se han representado en el mapa. En estos equipos, por lo general el mapa es puesto alrededor de un cilindro (tambor), que rota a una velocidad constante bajo un fotodetector que a su vez se mueve continuamente hacia un lado y otro del eje del cilindro.

5.1.2.1 Generación de los modelos digitales del terreno. De manera general, los métodos y equipos brevemente descritos persiguen trasladar la información cartográfica digital. En el caso de los mapas topográficos, el propósito es convertir las líneas que representan las curvas de nivel en cadena de datos (una para cada curva), para luego generar el MDE. Similarmente, podría generarse un modelo digital de precipitación si las curvas representadas en el mapa fueran isohietas, un modelo digital de temperaturas si las líneas fueran isotermas, y así sucesivamente.

En caso de que la información no este representada en forma de líneas o contornos, sino en forma de red regular o irregular de puntos, el MDT puede ser igualmente generado. En ambos casos se recurre el uso de métodos de interpolación, que han sido incorporados al procesamiento digital de la información.

El objetivo, al construir un MDT de una zona en particular es el de a partir de puntos o líneas con valores conocidos de un parámetro (altura, humedad relativa, temperatura, etc) en sitios escogidos o prefijados, determinar para un punto cualquiera intermedio, dentro de la zona bajo estudio el valor del parámetro correspondiente.

5.1.2.2 Medición, interpolación y procedimientos de contorno. Los métodos utilizados para el modelado del terreno, esencialmente siguen uno de dos aproximaciones:

i) Hacen uso de, o están basados en, valores de un parámetro que han sido recolectados en puntos dispuestos en forma de red regular (rectangular o cuadrada).

ii) Están basados en una red triangular de puntos, de forma, tamaño y orientación irregulares, cada uno con un valor de un parámetro (distribución aleatoria).

5.1.2.3 Modelos del terreno basados en interpolaciones de redes regulares.

Es el método más simple y está basado en redes de puntos, que forman verticalmente cuadrados, rectángulos, hexágonos o triángulos.

En el caso de los MDE, la desventaja de esta aproximación es que la distribución de los datos puntuales no está necesariamente relacionada con las características del terreno mismo. Si el muestreo de datos se conduce en forma de red regular, la densidad (número de puntos por unidad de área) debe ser lo suficientemente alta para representar exactamente las características más pequeñas de la superficie del terreno a ser modelado. Sin embargo, puede aumentarse la densidad de puntos sólo en aquellas zonas en donde se requiera (para los MDE, en las zonas en donde el terreno se hace más rugoso o presenta cambios abruptos).

5.1.2.4 Redes regulares basadas en redes irregulares. Especialmente en levantamientos topográficos, además de una distribución generalizada en el área, puede ser de interés la lectura de información en puntos que son importantes en términos de morfología (colinas, depresiones, riscos, grietas, ríos, etc). Es recomendable, llevar a cabo, en forma preliminar, una interpolación que convierta en forma razonable, dichos datos (irregularmente localizados) a una red regular. Para lo anterior, existen diversos métodos, siendo los más usados, los siguientes:

- **Métodos Puntuales.** Involucran la determinación independiente del valor del parámetro de interés en un punto o nodo específico de la red, a partir de los puntos aleatoriamente distribuidos y que tienen la medición del mismo parámetro. Una vez calculado los valores, se genera el MDT.

Los algoritmos para procesamiento en computador, que son usados para la evolución de cada punto, están basados en un procedimiento de búsqueda de un grupo de puntos llamado los vecinos más cercanos, procedimiento que además toma en cuenta la ponderación de los valores de manera inversamente proporcional a la distancia entre el punto a interpolar y todos los demás (sobre lo que se tiene medición). Usualmente en la ponderación, la distancia es elevada a una potencia que se encuentra en el rango de 0.5 a 4, los métodos de interpolación

por puntos, más usados son: búsqueda por área, búsqueda de los N vecinos más cercanos y la búsqueda sectorizada.

- **Métodos Globales.** Involucran el ajuste de una superficie tridimensional, definida por polinomios de grado superior usando todos los puntos medidos existentes e irregularmente colocados dentro del área a moldear. Una vez que la superficie global ha sido definida se interpolan los valores del parámetro de interés para cada punto de la red regular – a partir de la que se procede luego a generar el MDT si el polinomio escogido tiene muchos términos, como en el caso de los de grados superior, y si se requiere procesar grandes cantidades de datos, puede ser necesario un largo tiempo de computo.

- **Métodos de Parche (Patch).** Están en una posición intermedia entre los dos anteriores. El área a ser modelada se divide en una serie de parches (subáreas) de forma y tamaño idénticos (generalmente rectangular o cuadrada). Se genera, entonces funciones matemáticas para formar la superficie a modelar. Las subáreas o parches, pueden estar perfectamente arregladas, o pueden estar traslapadas, con las contiguas.

Los polinomios usados para representar una superficie (sea esta derivada de las alturas del terreno, o idealización de la distribución de alguna otra variable) tienen la siguiente forma general:

Tabla 2. Polinomios para interpolación.

Términos individuales	Orden del término	Término descriptivo	Números de términos
$Z = a_0$	Cero	Planar	1
$+a_1X + a_2y$	Primero	Lineal	2
$+a_3X^2 + a_4y^2 + a_5Xy$	Segundo	Cuadrático	3
$+a_6X^3 + a_7y^3 + a_8X^2y + a_9Xy^2$	Tercero	Cúbico	4
$+a_{10}X^4 + a_{11}y^4 + a_{12}X^3y + a_{13}X^2y^2 + a_{14}Xy^3$	Cuarto	Cuartico	5
$+a_{15}X^5 + \dots$	Quinto	Quíntico	6

Tomado de: Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering, G. Petrie and T.J.M, Kennie, 1990, pág. 117. McGraw-Hill.

Z representa el valor del parámetro en el punto interpolar (altura, temperatura, etc), X e Y son las coordenadas posicionales del punto en cuestión, a_0, a_1, a_2, \dots son los coeficientes del polinomio. Así, habrá una ecuación para cada punto del modelo.

Los polinomios típicamente usados son:

- a. El bilineal, de 4 términos. $Z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$
- b. El bicuadrático, de 9 términos. $Z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5y^2 + a_6x_2y + a_7xy_2 + a_8x_2y_2$
- c. El bicúbico, de 16 términos. $Z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5y^2 + a_6x_2y + a_7xy_2 + a_8x_2y_2 + a_9x_3 + a_{10}y_3 + a_{11}x_3y + a_{12}xy_3 + a_{13}x_3y_3 + a_{14}x_3y_2 + a_{15}x_2y_3$

5.1.2.5 Modelos del terreno basados en triangulación. La triangulación es usada en la modelación del terreno, debido a que todos los puntos medidos son considerados en el proceso, puesto que forman vértice de triángulos que son usados para modelar el terreno, para determinar alturas de puntos adicionales mediante interpolación. Otra razón para el uso de triángulos es que ofrecen una forma relativamente fácil de incorporar aspectos topográficos como discontinuidades abruptas del terreno (fallas, hendiduras, cañones, etc). Cualquier aproximación triangular debería intentar producir un grupo único de triángulo que sean tan equiláteros como sea posible y con una mínima longitud de lados. Se usa uno de los algoritmos descritos a continuación:

- **Triangulación de Delauny.** Asociado a este método está el llamado polígono de Thiessen, el cual plantea la definición geométrica de la región de influencia, de un punto sobre un área determinada, mediante la construcción de bisectrices perpendiculares en cada triángulo formado alrededor de dicho punto. Dichas bisectrices se insertan en los puntos de Thiessen, para formar el polígono de Thiessen. Un paso preliminar, antes de comenzar la triangulación es definir un grupo de puntos de frontera (artificiales) para formar un perímetro alrededor de los bordes del área de datos. Esto es necesario para crear una estructura para el modelo del terreno y un grupo de triángulos de fronteras que permitirán la extrapolación por fuera del área de datos. .

- **Algoritmo de barrido radial.** Este método data de 1982 (Mariane y Weingarten) como en el de Delauny y en él los puntos pueden estar irregularmente distribuidos, en sitios como fallas, picos del terreno, riscos, etc, (para el caso de modelos de la superficie del terreno), el punto localizado más cerca del centro del área de datos se selecciona como punto de inicio de la triangulación. Desde este punto se mide la distancia y dirección hasta todos los demás puntos del grupo de datos, para ser ordenados y colocados según dicha dirección. Una vez se efectúa esto, se establece la línea radial hasta cada punto y se forma un triángulo alargado conectando una línea entre el nuevo punto y el anterior. Cuando el barrido inicial se ha completado, las concavidades creadas por el mismo deben ser llenadas con nuevos triángulos. Cada punto en la lista de los de frontera es combinado y comparado con los próximos dos puntos en la lista y revisado para ver si puede formarse un triángulo interior, el cual se adicionará a la base de datos, eliminando

un punto (ubicado hacia adentro) de la frontera. Este proceso es repetido con pasadas sucesivas hasta que no se presentan cambios en el modelo generado.

5.1.2.6 Interpolación en la construcción de modelos digitales del terreno.

Como se ha expresado, un MDT puede estar conformado por una red (grid, en inglés) regular o irregular de puntos, cada uno representando el valor de una variable. La estimación de los valores en los nudos es el mayor problema asociado con la construcción del MDT, a esto último se llama interpolación.

El criterio ideal para establecer el tamaño máximo de la red es el de la mitad de la distancia entre los puntos más cercanos, aunque lo recomendable es variar el tamaño de la red de acuerdo a la densidad de los datos en las distintas partes del área a modelar. No obstante, esto último implica enormes esfuerzos computacionales.

Los métodos de interpolación se basan en funciones matemáticas que, básicamente:

- Provean una superficie continua a partir de datos que pertenecen a puntos dispersos en el espacio.
- Sean fáciles de calcular –porque donde hay N puntos, se calcularán N^2 interpolaciones para crear el modelo
- Preferiblemente tengan las propiedades matemáticas en las que se esté interesado (por ejemplo, como en levantamiento gravimétricos).

Así, la escogencia del método de interpolación deberá tener en cuenta que los hay de dos clases:

- Globales. Ajustan una función a la totalidad de los datos, de tal forma que todos existen sobre la superficie generada. Esta técnica incluye la aproximación multicuadrática que se utiliza en muchos modelos de clima, y sistemas bicúbicos (Spline); sin embargo, aunque ideales tienen desventajas: necesitan una gran cantidad de memoria computacional y la solución de ecuaciones matriciales de dimensión $N \times N$, donde N es el número de puntos de la red. Así, estos métodos son de limitada aplicación.

- **Locales:** Las funciones aplicadas aquí producen una superficie continua porque asumen que hay una autocorrelación especial en los datos que disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto en donde se está haciendo la interpolación. Por lo tanto, debe escogerse una distancia más allá de la cual no habrá influencia de los datos en el valor interpolado de la superficie en un punto en particular, a lo cual se llama ponderación. A menudo la función escogida para ponderar los datos puntuales locales que serán usados para calcular la interpolación es mantenida en una forma simple, adoptándose para la misma el promedio del inverso de la distancia.

Una función local alternativa es el proceso denominado Kriging. La función de autocorrelación, conocida como variograma, es definida de antemano, y se toman en cuenta las propiedades de distribución de los datos locales, por medio de un sistema matricial de ecuaciones, que expresa las relaciones de unos respecto a otros, respecto al punto en donde se hará la interpolación y respecto a tendencias regionales en la superficie como un todo. El sistema de ecuaciones es resuelto y los coeficientes usados para calcular tanto la interpolación como estimar el error.

La función más ampliamente usada es el promedio ponderado de la distancia proyectada. Tiene la ventaja de ser simple, rápida y, cuando se usa correctamente, de lograr una muy buena superficie continua. Los problemas inherentes a ella resultan tanto del mal uso o entendimiento de las propiedades de la función y del exceso de confianza en un tamaño de red lo suficientemente grande como, por ejemplo, para permitir que discontinuidades del terreno caigan entre nodos y, por lo tanto, sean difícilmente discernibles en el mapa final.

5.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA EXISTENTE

La cuenca a analizar debe contar con la información topográfica básica en formato digital, preferiblemente a escala 1:25.000. Para la presente monografía, a partir de la cartografía básica en medio digital disponible en Corpocesar, se procede a construir el Modelo Digital de Elevación (MDE), utilizando la información topográfica a la escala citada y que se encuentra representada por las curvas de nivel (líneas de igual altura). Este modelo representa la altimetría de la zona bajo estudio y su información básica proviene del Diagnóstico Biofísico y Socioeconómico de la Cuenca Hidrográfica del río Guatapurí, formulado por Corpocesar en 1994, y se encuentra ya en formato digital (originalmente en el software ArcCAD, de las empresas Esri Ltd. y Autodesk Inc., el cual es del tipo CAD/SIG). Solamente se encuentra digitalizada el área que se encuentra al interior del perímetro de dicha cuenca y no se dispone de información adicional a la escala mencionada, por lo que se advierte aquí que los resultados son influenciados por esta circunstancia.

5.2.1 Construcción del modelo digital de elevación. Los pasos que se siguen de manera general, son los siguientes:

1. Con las curvas de nivel (elevación), se procede a generar un primer modelo tridimensional basado en un arreglo de planos triangulares, obteniéndose una Red Triangular Irregular (Triangular Irregular Network, TIN, por sus siglas en inglés), lo cual es logrado mediante los procesos reseñados en el numeral 5.1.2.1. Este modelo es ya, una representación digital de la superficie del terreno y puede ser usado para realizar análisis acerca de características espaciales (por ejemplo, pendientes, aspecto, etc.).

2. El modelo en su forma TIN, se modifica en un arreglo o matriz (grid, en inglés) de celdas cuadradas, con una dimensión pre-establecida o definida por la persona que efectúa el análisis del terreno. Estas celdas poseen cada una un valor asociado de altura uniforme, de tal manera que el conjunto de ellas ofrece una visión diferente de la superficie.

3. Una vez obtenido el modelo digital de elevación (MDE) como un arreglo de celdas, este puede ser utilizado para desarrollar evaluaciones diversas, dentro de las cuales se cuentan estudios hidrológicos, caracterización física del terreno, etc. En desarrollo de la presente monografía se utilizará el MDE, además, para generar la red de drenaje (hidrografía) con la que, en estudios posteriores, se podría evaluar – por ejemplo el régimen de caudales de una cuenca.

5.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EXISTENTE

5.3.1 Modelos digitales para el balance hídrico superficial. A partir de la información recolectada, validada y procesada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam, luego de realizar las mediciones en las estaciones que funcionan en el departamento del Cesar, se construirán los modelos digitales del terreno, correspondientes a las variables consideradas para el balance hídrico, a saber:

- Modelo Digital de Precipitación
- Modelo Digital de Evapotranspiración
- Modelo Digital de Escorrentía

Se considera que las estaciones del norte del departamento deben ser tomadas en cuenta para el análisis de la variación espacial de los parámetros que allí se miden, ya que la ubicación de la cuenca del río Guatapurí se caracteriza por estar en el

corredor de circulación de los vientos alisios del noreste (predominantemente), entre la Sierra Nevada de Santa Marta por un lado (5400 msnm en los Picos Colón y Bolívar), valle del río Cesar en el medio (donde se ubica la desembocadura del río Guatapurí, a 100 msnm) y la Serranía de Los Motilones o de Perijá, por otro lado (3600 msnm en los cerros El Pintao y El Avión), que condicionan marcadamente el régimen del clima en esta zona del país. Con el análisis regional, a través de los métodos ofrecidos por la geoestadística, se pretende dar un cambio en la forma que tradicionalmente se ha tenido para estudiar los fenómenos climáticos en el departamento del Cesar, si se tiene en cuenta los estudios que se presentan ante la Corporación Autónoma Regional del Cesar, en los que sólo se consideran tradicionalmente dos estaciones para representar el norte del departamento (el aeropuerto de Valledupar, y la estación Motilonia en el Municipio de Agustín Codazzi) separadas 50 kilómetros en dirección norte – sur. En la Tabla 3 se presenta una muestra del listado de estaciones climatológicas localizadas en el norte del departamento del Cesar, con las cuales se desarrolla otro de los objetivos específicos planteados (análisis de la variación espacial de las variables climáticas utilizando la geoestadística).

Tabla 3. Estaciones Climatológicas – Norte del departamento del Cesar. Precipitación Medial Anual y Mensual multianual

NOMBRE	ESTE	NORTE	PMEDIAANUAL	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
ELDESCANSO	1090975	1649053	1119	16	10	20	83	141	108	108	136	158	221	100	39
MANAURE	1114730	1639904	1929	20	45	71	182	255	102	102	175	265	377	233	54
VILLAMARLENE	1087348	1639825	1327	8	15	42	100	196	92	92	134	179	251	166	32
PATILLAL	1094548	1676719	1151	14	13	23	115	190	64	64	125	141	206	124	30
VILLACARMELITA	1085482	1656414	1514	9	18	49	169	229	95	95	146	175	266	158	43
ATANQUEZ	1078141	1674833	1696	27	21	44	150	242	95	95	154	242	324	241	46
PARISDEFRANCIA	1089145	1650892	1279	9	18	52	119	189	112	112	152	162	202	105	38
HLASPLAYAS	1072866	1580796	1325	7	31	66	136	164	101	101	138	179	206	130	47
HLAESPERANZA	1065543	1586312	1149	5	21	46	108	135	104	104	141	152	166	138	30
LOSLLANOS	1085694	1567918	1529	16	30	53	125	192	109	109	153	197	266	193	54
LABOGOTANA	1102042	1608521	2141	32	71	83	268	317	156	156	203	237	291	201	73
SANBENITO	1085541	1632446	1377	12	22	42	137	174	115	115	131	179	196	171	41
SANGABRIEL	1070990	1604759	1390	10	27	94	138	197	116	115	164	161	170	139	39
HSANTATERESITA	1085638	1591885	1485	19	37	53	130	183	116	116	178	168	255	164	43
CODAZZI	1091099	1601117	1504	24	39	71	159	208	110	110	142	180	234	149	55
LETICIA	1094719	1614032	1323	22	32	61	150	175	96	96	115	162	198	136	55
ELRETORNO	1072862	1582639	1365	11	31	79	142	198	86	86	146	165	219	127	44
ELRINCON	1100163	1626953	1332	20	37	46	140	185	96	96	134	173	214	128	37
CIMOTILONIA	1091108	1597429	1570	15	30	69	141	201	118	118	161	202	281	165	51
SOCOMBA	1091186	1566087	1498	15	52	71	155	201	121	121	160	192	205	148	47
HCENTENARIO	1089321	1580832	1472	13	38	56	149	192	115	115	142	184	228	160	52
CARACOLI	1036274	1606550	1079	13	33	48	159	106	95	95	109	123	140	108	51
VILLAROSA	1058176	1619484	1234	18	11	54	115	153	98	98	151	163	192	123	25
ELCALLAO	1092825	1639839	1128	10	13	32	93	174	75	75	123	167	192	140	35
AALFONSOLOPEZ	1090985	1645365	958	12	8	27	64	156	62	62	113	116	192	95	29
GUAYMARAL	1047262	1586284	1200	4	31	68	110	187	101	101	135	146	171	114	30
PUEBLOBELLOIDEAM	1054486	1643445	2001	17	33	58	170	275	129	129	235	288	330	203	56
BOSCONIA	1025323	1591793	1218	10	34	70	140	174	117	117	139	145	135	89	22
PALMAARIGUANI	1014357	1589943	1329	14	32	60	148	178	128	128	146	169	180	117	35
LASCUEVAS	1056303	1648979	1763	22	25	40	135	238	196	196	213	236	261	168	56
HMANATURE	1025319	1597323	1243	12	32	60	121	145	111	111	153	129	193	116	37
ELMNOLINO	1036311	1569680	1349	9	31	66	147	173	94	94	175	166	210	128	37
ELPASO	1036320	1560463	1372	15	25	62	140	188	93	93	138	185	217	154	36
PUBLOBELLOFNC	1049019	1637906	2372	261	230	209	181	165	206	206	188	168	169	181	241
COLON	1050420	1687670	500	40	40	40	40	60	40	40	40	40	40	40	40

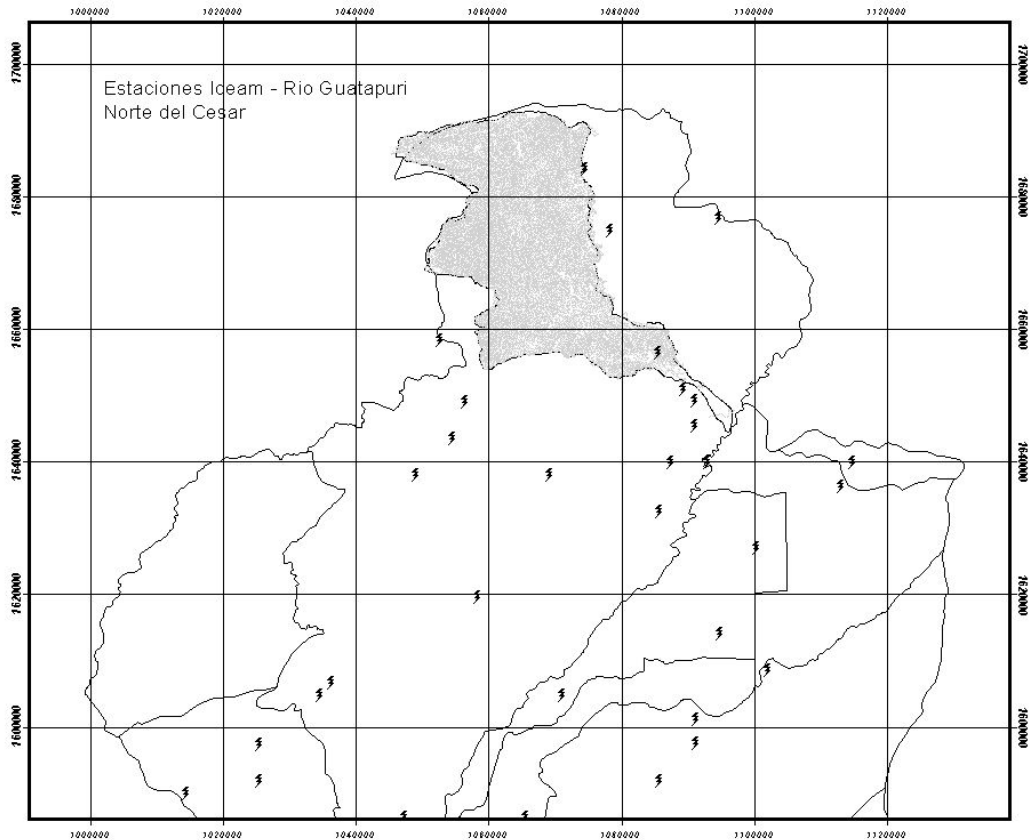
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de Hidrología.

A partir del Modelo Digital de Elevación (MDE), se generan Modelos Digitales del Terreno (MDT) en donde se represente la variable climática de evapotranspiración, aplicando algunas fórmulas, sobre las que se detalla más adelante, derivadas ya sea de la experimentación o de la teoría, y que se encuentran en la literatura sobre el tema.

Alternativamente se puede pensar en generar el MDT para la ETP, a partir de los valores de parámetros que intervienen en el cálculo de la misma, en caso de que existan mediciones directas de tales parámetros. De esta manera se obtiene una gama de modelos para ETP, con los cuales se hará una clasificación y se encontrará el más representativo. Para el caso de la monografía y del área de estudio, sólo existen dos estaciones climatológicas (Aeropuerto Alfonso López y Centro de Investigaciones Motilonia en Agustín Codazzi) que pueden medir tales parámetros.

En la siguiente figura se observa la disposición de la cuenca, la base topográfica y la ubicación de las estaciones listadas en la Tabla 1.

Figura 2. Localización de las Estaciones Climatológicas



Fuente: de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de Hidrología.

Como se observa, no se dispone de información que cubra toda la cuenca o buena parte de esta de manera directa, por lo que es preciso recurrir a estaciones localizadas en las afueras de la zona, lo cual además es aconsejable para establecer la variación de las variables climáticas a considerar por fuera de la cuenca. No obstante, se plantea la siguiente hipótesis para realizar el análisis propuesto como uno de los objetivos específicos: se ubica una estación virtual en la zona más alta de la Sierra Nevada de Santa Marta, para la que asume un valor de precipitación, a partir de estudios realizados por otras agencias del Gobierno Nacional. Es así como, en una evaluación realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (Sierra Nevada de Santa Marta, información geográfica retrospectiva, 2002, ISBN 958-9067-63-8) se informa que la precipitación medio anual en la región más alta es menor a 500 mm (Proyecto Piloto Ordenamiento Territorial de la Sierra Nevada de Santa Marta 1997), procediéndose a tomar 500 mm como valor representativo, planteamiento que deberá tenerse siempre en cuenta para la interpretación de los resultados obtenidos para el MDP.

Para el estudio de la variabilidad espacial de la precipitación se recurre a uno o más de los métodos de interpolación a que se hizo referencia en el numeral 5.1.2.1. Debido a que la precipitación es una variable con comportamiento distribuido (no discreto) se recomienda utilizar métodos que no ofrezcan grandes variaciones de los valores entre puntos o en los que el valor en un punto puede depender, además, de la distancia entre puntos.

Se parte, entonces, de una red de puntos correspondiente a la distribución geográfica de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio y en sus alrededores, con la información asociada de la precipitación (multianual) medida en cada una de ellas. Esta información se transforma en un archivo de base de datos (dBase file) para que pueda leerse en ArcView GIS, en donde se procede a generar el modelo digital de precipitación (MDP) de modo similar a como se obtuvo el MDE. No obstante existe la alternativa de, en el caso de la presente monografía, generar este modelo de lluvias en dos formas generales: como red triangular (TIN) o como malla de celdas (Grid), caso último este en que se recurre al tipo de interpoladores mencionados en el numeral 5.1.2. Para el análisis y diseño de la aplicación objeto de la monografía, se escogieron los métodos de:

- Ponderación del inverso de una potencia (2, 3, etc.) de la distancia entre estaciones.
- Interpolación con splines bicúbicas racionales no uniformes (NURBS, por sus siglas en idioma inglés), que son un tipo especial de línea.

- Interpolación con polinomios de grado superior.

- Interpolación estocástica con el método de Kriging.

Sin embargo, al final debe elegirse uno sólo de los métodos para proceder al análisis del régimen espacial de precipitación, para la cual se recurre a la evaluación del error relativo respecto a un valor de control. Para el presente caso, se toman los caudales obtenidos para la cuenca en cada modelo digital de la escorrentía (balance hídrico) y el caudal medido o aforado por Ideam en la última estación de caudales ubicada aguas abajo del río Guatapurí.

Para el otro componente del balance hídrico, la evaporación, se propone aquí, su evaluación a partir de formulas empíricamente obtenidas en investigaciones realizadas por otros autores.

Para el caso de la monografía presente, el autor encontró recomendaciones acerca de la ecuación derivada por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé) de Colombia, la cual basa la obtención de la ETP solamente en la altura sobre el nivel del mar, luego de haberse realizado un análisis estadístico a los valores arrojados por el método de Penman aplicados a diversas zonas del país, el cual es considerado como uno de los más completos por cuanto hace uso de diversas variables climáticas. La ecuación de Cenicafé es:

$$ETP = 4.658 e^{(-0.0002 * h)}, \text{ donde}$$

- ETP es la evapotranspiración medida en mm/día,
- e es la base de los logaritmos naturales, y
- h es la altura sobre el nivel del mar medida en metros.

Esta expresión se encontró en un documento descriptivo de una investigación sobre modelación hidrológica publicada por la Universidad Nacional de Colombia.

De manera alternativa, en la presente monografía se utiliza la expresión derivada para el departamento del Cesar por el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, Ingeominas, (Evaluación del Agua Subterránea en el departamento del Cesar, Informe Final, Texto. Carlos E. Angel – Alcides Huguett G., 1994), durante la ejecución de un convenio entre Corpocesar e Ingeominas:

$ETP = 4149.27 * h^{(-0.185)}$, donde

- h es la altura sobre el nivel del mar, en metros.
- ETP es la evapotranspiración anual, en mm.

La expresión se basa en una comparación de los resultados arrojados por los métodos de Christiansen y Thornwaite, los cuales tuvieron que ser validados por Ingeominas para derivar la ecuación aludida.

En ambos casos, se encuentra que la ETP disminuye con el aumento de la altura del terreno sobre el nivel del mar, y debido a la variación en los demás parámetros como brillo solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, inherentemente contemplados en la ecuación de Ingeominas). Finalmente, Ingeominas determinó que el método de Christiansen es el que mejor representatividad ofrece para el departamento del Cesar.

En resumen, con estos modelos aritméticos se procede a generar el MDETP (modelo digital de evapotranspiración), para utilizarlo en el cálculo del balance hídrico superficial.

5.3.2. Generación de la red de drenaje. Para este lograr este propósito, se utiliza el método conocido como modelo de flujo en ocho direcciones, en el que se asume que el agua superficial que se encuentra en una celda (área de la superficie terrestre) sólo fluirá hacia una de las celdas adyacentes, siendo esta la que ocupa la posición señalada por la pendiente más pronunciada, obteniéndose una malla (arreglo de celdas) que indican direcciones de flujo, a partir de la cual se deriva la red de drenaje.

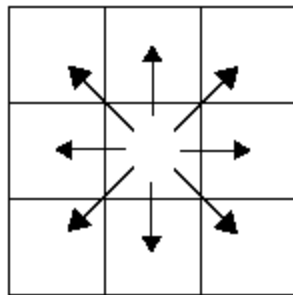
Para cada celda en esta red, el número total de celdas contado desde ella en la dirección aguas arriba, es llamado la acumulación de flujo. En las siguientes figuras se ilustra con un ejemplo el concepto explicado:

- a) Ocho direcciones, hacia una de las cuales puede fluir el agua desde una celda determinada;
- b) Malla de elevaciones del terreno, cada número es un valor de elevación;

- c) Dirección tomada por el agua, de una celda alta a la celda contigua de menor elevación en forma progresiva;
- d) Red de flujo resultado de la suma de todos los caminos.

Figura 3. Modelo de flujo para los modelos digitales del terreno

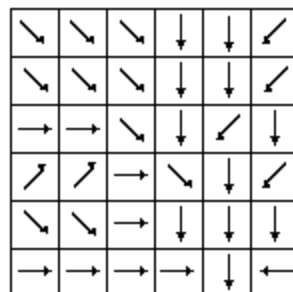
(a) Eight-direction Pour Point Model



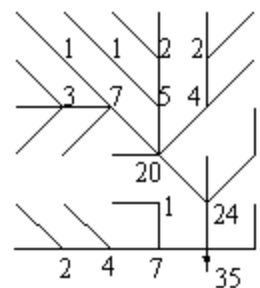
(b) Grid of Terrain Elevations

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

(c) Grid of Flow Directions



(d) Drainage Network Showing Flowaccumulation



Fuente: Spatial water balance of Texas, David Maidment

Antes de definir la red de drenaje usando el método de las ocho direcciones, a partir del MDE ya creado tal como se reseña, se crea un modelo digital de la hidrografía, determinando cuáles son “bajas”, es decir, cual (es) celda (s) se encuentra (n) a menor altitud que todas las que la (s) rodean, con el objetivo de “llenar” tales zonas “bajas” (el llenado consiste en nivelar las celdas de tal manera que no exista, en la zona, depresión alguna que pueda significar acumulación de flujo) para garantizar así la continuidad del movimiento del agua hacia abajo (desde las celdas superiores hacia las celdas inferiores del MDE).

También se utiliza la red hidrográfica en formato digital, disponible como una representación vectorial (líneas que representan ríos), para generar un modelo digital que señale las direcciones del flujo concentrado (drenaje) sobre el MDE. Primero se transforma la red hidrográfica del formato vectorial al formato tipo malla (grid, raster), luego, la red hidrográfica se superpone al MDE para que este adquiera la propiedad de particularizar cuáles celdas pertenecen a la red de drenaje y así determinar la “verdadera” dirección del flujo del agua. Esta superposición, equivale a un proceso de “grabado”, quemado” o de “esculpido” de la red hidrográfica sobre el MDE, al forzar a que aquellas celdas de este modelo que comparten posición geográfica con las celdas del modelo de la red hídrica cambien su valor real de elevación, por uno muy bajo (1 ó 0) de dicho atributo.

Es preciso aclarar aquí, en realidad, pueden existir zonas bajas o de presiones del terreno en la cuenca o región bajo estudio con lo que se conformará un “drenaje interior”, es decir, en donde el agua no sale de la cuenca (cuencas internas); no obstante, no se dispone de suficiente información detallada acerca de la localización de estas zonas para la subcuencas del río Guatapurí, por lo que eventualmente es necesario efectuar un segundo proceso de llenado.

5.4 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS PARA EL PROCESAMIENTO.

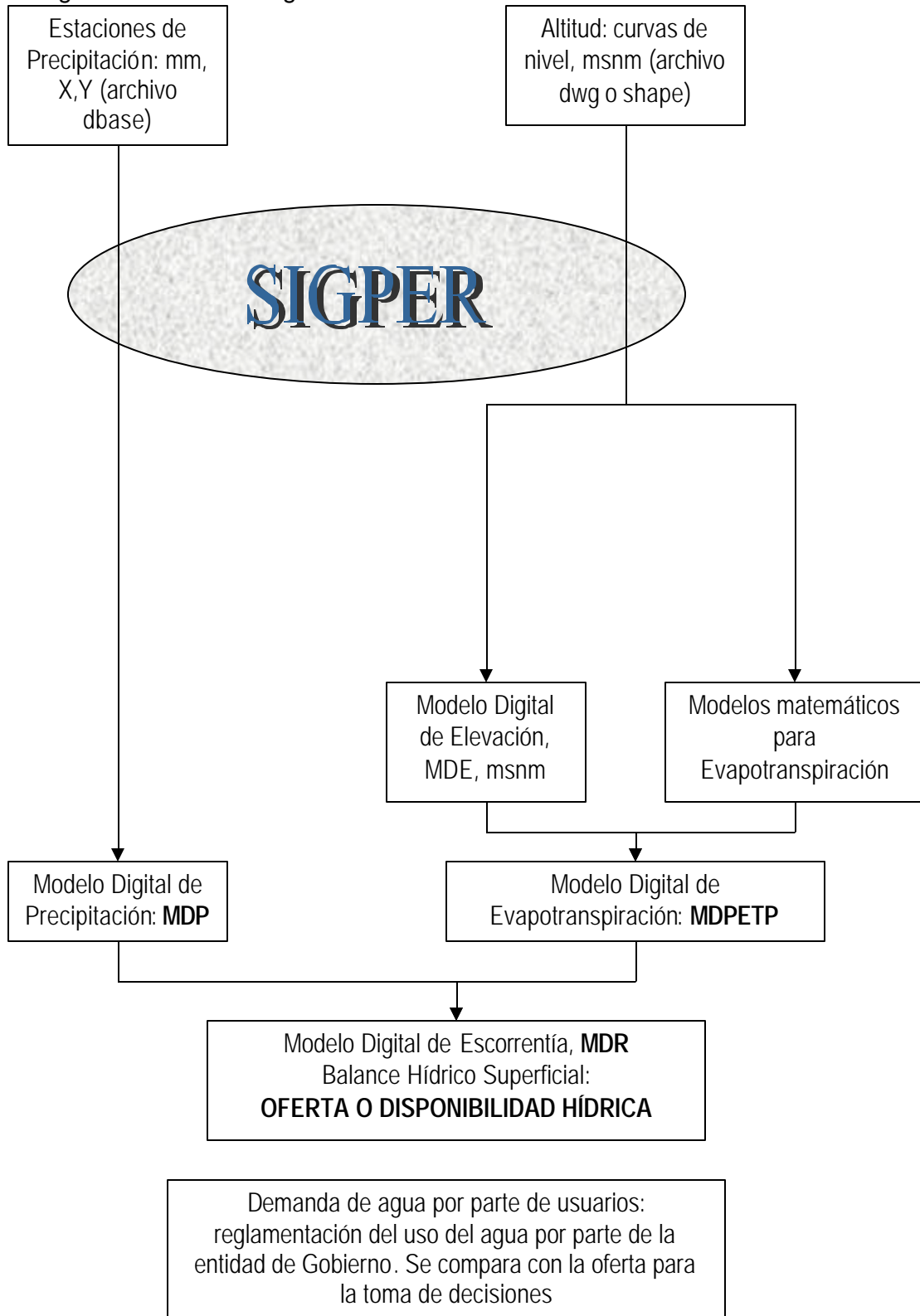
Se dispone de la siguiente información, la cual se ha organizado de tal manera que pueda utilizarse en la aplicación desarrollada:

- Precipitación. Base de datos de IDEAM, que contiene el registro de la precipitación media anual multianual medido en las estaciones activas operadas por el mencionado Instituto, así como las coordenadas planas bajo la nomenclatura IGAC de las mismas estaciones. El archivo original en medio magnético se ha convertido a formato compatible con la aplicación MS Excel de Microsoft Corporation (*.xls, *.dbf).
- Altitud. A partir de las curvas de nivel se obtiene la altura de los puntos que se sitúan sobre las curvas de nivel digitalizadas a escala 1:25.000
- Red hídrica superficial. A partir de la red hídrica superficial digitalizada a escala 1:25.000 se genera la red para los modelos digitales del terreno a procesar.
- Evapotranspiración. A partir de la información de altitud y de modelos matemáticos específicos ya desarrollados anteriormente por otros autores, se obtiene una base de datos espacial de evapotranspiración.

- Balance. Mediante operaciones espaciales (resta) se obtiene la diferencia entre precipitación y evapotranspiración, como una lámina de agua disponible en la cuenca hidrográfica, la cual debe compararse con la demanda por parte de los usuarios de la misma.

Se presenta el siguiente modelo que expresa lo anteriormente reseñado:

Figura 4. Modelo de organización de los datos



Fuente: Autor de la monografía.

5.5 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN O MÓDULO OPERATIVO SISTEMATIZADO, BASADO EN SIG.

Mediante el software ArcView GIS, se desarrolla una aplicación informática que facilite la integración de la información a que se ha hecho alusión en los numerales anteriores. El tema central de dicha aplicación es el uso de técnicas de geoestadística, para la determinación de la variación regional (espacial) de las variables del balance hídrico consideradas en el presente texto (escorrentía, precipitación y evapotranspiración). En desarrollo de la aplicación se utilizan algoritmos que automatizan el proceso de análisis, permitiendo al usuario de la aplicación concentrarse en la interpretación de los resultados obtenidos. Se hace uso también del lenguaje de programación Avenue, propio de ArcView GIS, con el que a través de scripts (libretos que procesan información) se construyen los diversos modelos digitales

Para que opere, la aplicación requiere de las extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst, de ArcView GIS, las cuales son la base de la misma, puesto que soportan el tratamiento de operaciones especializadas, como la inclusión de la tercera dimensión, siendo esta altura, una de las variables del balance hídrico consideradas en esta monografía (Precipitación, Evapotranspiración, Escorrentía) y la llamada álgebra de mapas (es decir, operaciones matemáticas y lógicas entre los valores representados por diversos mapas).

En cuanto a los scripts que se han utilizado en la aplicación, han sido desarrollados ya sea por otras personas (ingenieros Germán Gavilán, Luis Capacho, de la Universidad Industrial de Santander) o por el autor de esta monografía, y se refieren esencialmente a los procesos de construcción de los modelos digitales del terreno, a través de la geoestadística (interpolación para estimación de los valores de los parámetros del balance hídrico). Los scripts se incluyen en el Anexo D de la presente monografía.

Así, el procedimiento seguido para obtener la aplicación que se presenta en esta monografía es el siguiente:

- Recopilación de la información climatológica de propiedad del IDEAM. Al respecto, se tuvo la colaboración interinstitucional, a través de la Subdirección de Hidrología del mencionado instituto, específicamente del hidrogeólogo Hugo Cañas Cervantes (teléfono 0913500111, extensión 1906), quien a su vez prestó asesoría en el aspecto de análisis de resultados finales. La información en cuestión, se refiere a los registros de precipitación multianual de las estaciones ubicadas al norte del departamento del Cesar.

- Revisión de la información topográfica digitalizada de la cuenca del río Guatapurí, de propiedad de Corpocesar, con el fin de constar su validez desde el punto de vista de continuidad de las líneas que representan las curvas de nivel, labor que se realizó igualmente para la red hidrográfica. En los casos en que se encontró discontinuidades, se procedió a corregirlas en la aplicación AutoCAD (Autodesk Inc.) en la cual se encontraba en forma nativa dicha información.

- Revisión de los scripts disponibles, encontrados en la literatura cubierta durante el curso de especialización en SIG, desarrollados durante la misma o en la elaboración de la monografía, o consultados en la red Internet siendo adaptados para los fines de la monografía.

El desarrollo contempla los ciclos clásicos del desarrollo de software, de una manera sencilla, habiendo evolucionado en dos versiones, hasta tener la que se presenta en esta monografía.

Los requerimientos de información que pretende satisfacer la aplicación, son:

- Requerimiento 1. Necesidad de establecer el caudal promedio anual de la cuenca (y sus microcuencas) bajo estudio.
- Requerimiento 2. Necesidad de establecer la red de drenaje de la cuenca bajo estudio.
- Requerimiento 3. Necesidad de establecer el valor y variación espacial de los parámetros que intervienen en la determinación del balance hídrico superficial
- Requerimiento 4. Necesidad de establecer la disponibilidad de agua en la cuenca, con destino a usuarios potenciales, basado esto en la demanda total registrada en las entidades oficiales (Corpocesar).

Así, se presenta el siguiente esquema para el levantamiento de los requerimientos de información:

Figura 5. Formato de levantamiento de los requerimientos 1 y 3

Requerimientos 1 y 3: Caudal medio anual de la cuenca y/o microcuencas (balance hídrico anual superficial); comportamiento espacial de las variables climáticas precipitación y evapotranspiración.

Descripción: Este requerimiento permite conocer el balance hídrico superficial de una cuenca hidrográfica, expresado como caudal medio anual multianual, resultante de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Igualmente facilita el análisis del régimen climático de la cuenca en cuestión.

Objetivo: Suministrar la información del balance hídrico superficial y régimen climático simplificado para un área determinada.

Datos requeridos:

Datos	Tipo	Fuente
Localización estaciones pluviométricas	Numérico	Ideam
Nombre de estación pluviométrica	Carácter	Ideam
Registros de precipitación media anual multianual	Numérico	Ideam
Altura sobre el nivel del mar	Numérico	Corpocesar
Evapotranspiración potencial	Numérico	Ingeominas - Corpocesar

Proceso: El usuario seleccionará la información pluviométrica y de altimetría para generar los Modelos Digitales de Precipitación, y de Elevación y Evapotranspiración Potencial respectivamente, con lo cual se calculará el balance hídrico superficial. También, el usuario evaluará, a través de diversos métodos, la variación espacial de las variables que influyen en el balance hídrico superficial.

Información de salida: Una tabla en la cual se tendrá el Balance hídrico superficial por subcuenca o microcuenca; un modelo tipo raster, del balance hídrico superficial con productos intermedios como el MDP y el MDETP. Se tendrán diversos modelos digitales de precipitación y de evapotranspiración (formato raster)

Restricciones: Se debe tener cobertura suficiente tanto al interior como al exterior de la cuenca, de estaciones pluviométricas; la altimetría se debe tener digitalizada a una escala 1:25.000 para una mejor estimación de la ETP. Las ecuaciones para ETP deben ser aplicables a la zona geográfica bajo estudio.

Observaciones: el área de la cuenca se dará en metros cuadrados y la precipitación en milímetros. El tamaño de celdas a escoger para los modelos digitales debe ser

escogido con antelación, comenzando con la mitad de la mínima separación horizontal entre curvas de nivel

Figura 6. Formato de levantamiento del requerimiento 2

Requerimiento 2: Red de drenaje de la cuenca bajo estudio.

Descripción: Este requerimiento permite generar la red de drenaje superficial y con ello obtener una delimitación de cuencas a partir de modelos digitales del terreno.

Objetivo: Suministrar la información sobre ubicación de la red hídrica.

Datos requeridos:

Datos	Tipo	Fuente
Altura sobre el nivel del mar	Numérico	Corpocesar
Red hídrica digitalizada	*,dwg	Corpocesar

Proceso: El usuario seleccionará la información de altimetría y la red hídrica en formato *.dwg (formato nativo de AutoCAD, Autodesk Inc.) para generar los Modelos Digitales de Elevación y de Drenaje respectivamente.

Información de salida: Un modelo tipo raster, digital, de la red drenaje superficial.

Restricciones: Se debe tener cobertura suficiente tanto al interior como al exterior de la cuenca en cuanto a la información de altimetría y la red hídrica, preferiblemente a escala 1:25.000.

Observaciones: el tamaño de celdas a escoger para los modelos digitales debe ser escogido con antelación, comenzando con la mitad de la mínima separación horizontal entre curvas de nivel.

Figura 7.. Formato de levantamiento del requerimiento 4

Requerimiento 4: disponibilidad de agua en la cuenca, con destino a usuarios potenciales.

Descripción: Este requerimiento permite conocer si puede satisfacerse la demanda de agua superficial en una cuenca hidrográfica.

Objetivo: Suministrar la información sobre disponibilidad de agua superficial.

Datos requeridos:

Datos	Tipo	Fuente
Balance hídrico superficial	Numérico	SIGPER
Nombre derivación principal	Cartacter	Corpocesar
Caudal asignado	Numérico	Corpocesar

Proceso: El usuario seleccionará la información de altimetría y la red hídrica en formato *.dwg (formato nativo de AutoCAD, Autodesk Inc.) para generar los Modelos Digitales de Elevación y de Drenaje respectivamente.

Información de salida: Un modelo tipo raster, digital, de la red drenaje superficial.

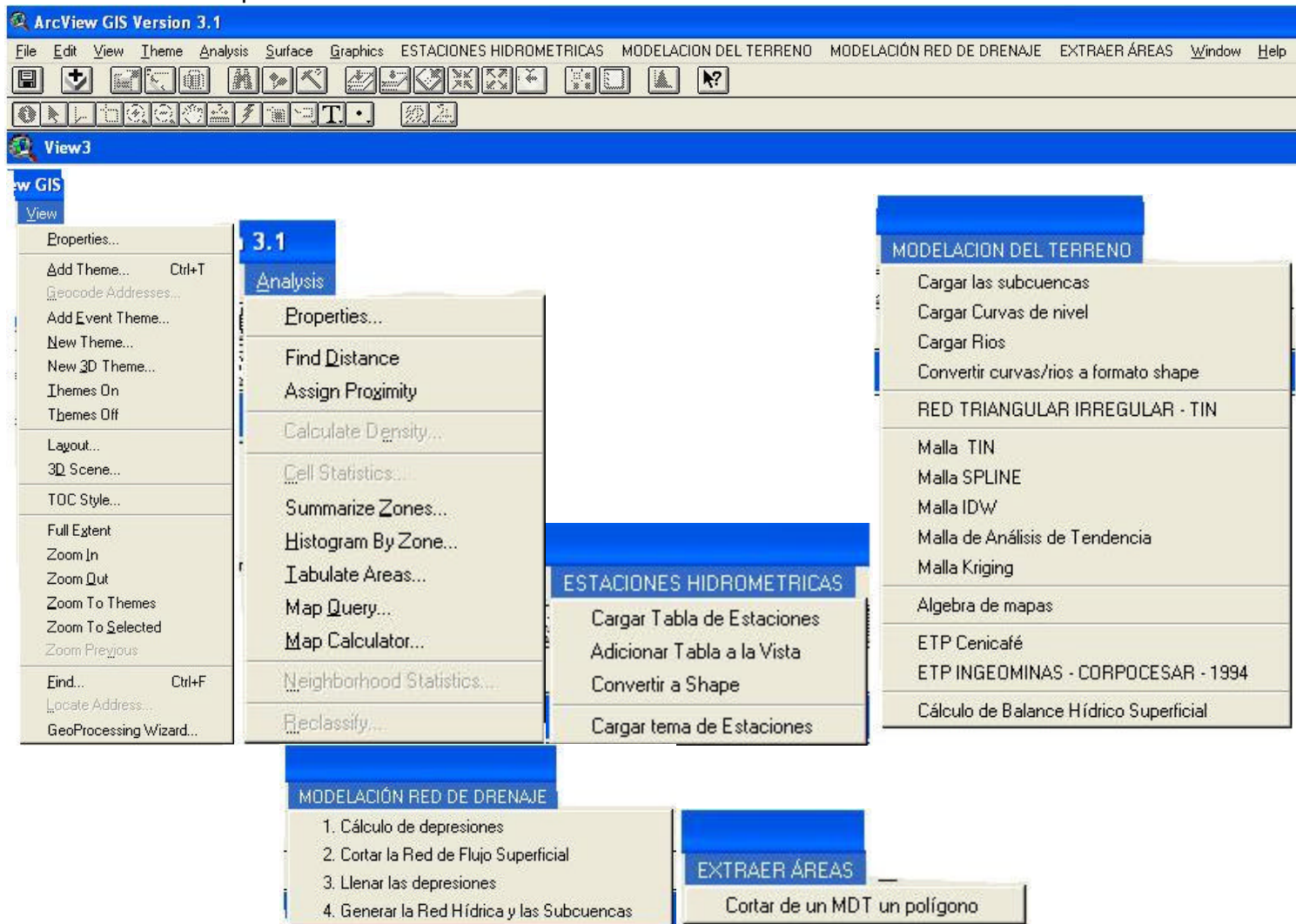
Restricciones: Se debe tener cobertura suficiente tanto al interior como al exterior de la cuenca en cuanto a la información de altimetría y la red hídrica, preferiblemente a escala 1:25.000.

Observaciones: el tamaño de celdas a escoger para los modelos digitales debe ser escogido con antelación, comenzando con la mitad de la mínima separación horizontal entre curvas de nivel.

La aplicación, que se ha dado en llamar SIGPER (Sistema de Información Geográfica para la determinación de la Precipitación, Evapotranspiración y Escorrentía), funciona sobre el software ArcView GIS, como ya se ha mencionado. Los requerimientos en cuanto a equipo de computación están representados por un procesador tipo Pentium 4, unidad central de proceso de 1.7 Gigahertz y 512 Megabytes en RAM. El espacio en disco duro mínimo ideal es de 10 Megabytes para facilitar el proceso de datos y almacenamiento de los resultados, aunque esto depende de la densidad de información y del tamaño del área bajo estudio.

A continuación se describen los procesos que se llevan a cabo cuando se usa la aplicación, para lo que se debe estar familiarizado con la terminología del software en cuestión (ArcView GIS). En la Figura 8 se ilustran los menús principales de los cuales se compone la aplicación, constituida por un proyecto de ArcView GIS (*.apr). Se aclara que los menús nativos de ArcView corresponden a la versión en idioma inglés de dicho software.

Figura 8. Interfase de la aplicación SIGPER.



Fuente: Autor de la monografía.

Se inicia el software ArcView GIS, cargando además las extensiones 3d Analyst y Spatial Analyst, lo cual se realiza en el menú File – Extensions, seleccionándolas en el cuadro de diálogo que aparece, dando click en el botón OK.

La Vista debe tener asignación de unidades métricas (View Properties). Se sigue el menú View – Properties y se fijan las unidades (en Map units y Distance units se escoge meters)

Desde el menú ESTACIONES HIDROMÉTRICAS:

Se toma la opción Cargar Tabla de Estaciones se debe cargar la tabla que contenga la información de las estaciones pluviométricas (Precipitación.dbf)

Luego se debe Adicionar Tabla a la Vista, para cargar en la vista la ubicación de las diversas estaciones ubicadas en el área de estudio (Precipitación.dbf), tomando como valores para X, el campo Este y para Y el campo Norte de la misma tabla. Una vez cargado se debe encender el tema en la vista.

El tema cargado se debe Convertir a Shape, escogiendo el directorio destino (por ejemplo, d:\sigba\precipitacion) y se debe dar nombre al nuevo archivo (lluvia.shp, rainfall.shp o similar) tomando luego la opción YES como respuesta a la pregunta de si se desea adicionar el tema a la vista.

Se procede a sentar las bases de la modelación del terreno. En MODELACIÓN DEL TERRENO, se debe cargar el tema de cuencas, cuyo archivo debe obtenerse del directorio en el cual se encuentra (ej, d:\sigba\cuencas). Para el caso de la cuenca escogida se dispone de la cobertura tipo ArcInfo que representa las subcuencas (Subc) del área de interés. De manera similar se puede cargar el tema que contiene el límite o perímetro de la cuenca.

MODELO DIGITAL DE PRECIPITACIÓN. A continuación, se construye el modelo digital de precipitación, MDP, para lo cual se acude a la información, suministrada por el IDEAM, de los valores medios mensuales multianuales de precipitación, medidos en las estaciones escogidas como marco de referencia. Se activa el tema generado para la estaciones (paso 2c, lluvia.shp pmanual.shp) y en el menú MODELACIÓN DEL TERRENO se toma la opción RED TRIANGULAR IRREGULAR – TIN, tomando en el campo Height Source el campo Pmediaannual P_media_an, dando click en OK. Luego se escoge el directorio apropiado para almacenar la información del tema a generar (ej, d:\sigba\precipitacion) llamando al resultado apropiadamente (Tin_p_anual pmanualtin), el cual se activa y enciende. Aquí se obtiene un modelo digital de la precipitación, conformado por una red triangular irregular (tin, en idioma inglés) para el caso multianual. De manera similar, se repite

la operación para cada uno de los meses del año, tomando cada vez, la información del campo del mes respectivo. No obstante, debido a que no se dispone de información del parámetro ETP para los diversos meses, no se ha procesado dicha información, por lo que esta iniciativa queda planteada para una segunda etapa del desarrollo de la herramienta.

Se procede a generar otro MDP, esta vez en forma de arreglo regular de celdas cuadradas a partir del TIN obtenido en el paso anterior. Para el efecto se activa primero el tema generado en el paso anterior (toma del menú MODELACIÓN DEL TERRENO la opción MALLA TIN (interpolación de celdas a partir de un modelo triangular irregular), siguiendo al directorio apropiado (d:\sigba\precipitacion asignándole el nombre (ej: pmagrdtin, es decir un grid obtenido a partir de un tin). En el tamaño del modelo a generar (Output Grid extent), se escoge el tema correspondiente a la cuenca (Limguata); en el tamaño de celda del modelo (Cell Size) se escoge una dimensión de 50 m y de oprime la tecla Enter para actualizar el número de filas y columnas que tendrá el modelo a generar. Se oprime el botón OK. Luego se responde YES a la pregunta de si se desea adicionar el tema generado a la Vista.

Se continúa con los otros métodos disponibles para la generación del modelo digital de precipitación (IDW, Spline y Análisis de Tendencia), para lo cual y, en cada caso, se escoge el tema que contiene las estaciones de medición de precipitación (en el caso de la monografía, lluvia.shp pmanual.shp); a la pregunta de si desea escoger un tamaño de celda en unidades de mapa para el proceso de interpolación se responde YES y se escoge el mismo tamaño de celda que el modelo generado a partir del tin (50 m en el caso de estudio) y seleccionando el campo Pmediaaannual, como base para la interpolación, se escoge el tema que contiene el área dentro de la cual se llevará a cabo la interpolación (Subc), oprimiendo luego OK. En este punto de puede escoger una o varias alternativas, dependiendo de la disponibilidad de información:

Se toma ya sea el límite de la cuenca bajo estudio (Subc), o un área de mayor extensión que abarque estaciones ubicadas fuera de la cuenca (Limite.shp). Esto último se considera es recomendable, habida cuenta de la influencia global de la información y mejor representatividad que esta opción ofrece para la interpolación por cualquiera de los métodos. El área de mayor extensión a que se hizo alusión (Limite.shp), puede construirse a voluntad del usuario, para lo cual primero debe crearse el tema que lo contendrá (siguiendo el menú, se toma la ruta View – New Theme Feature Type – Polygon – OK, se busca el directorio apropiado - d:\sigba\cuencas - asignándole un nombre, Limite.shp en el caso de la monografía. Luego, en la barra de herramientas de ArcView GIS, donde se toma el ícono Draw Polygon y se procede a digitalizar a criterio del evaluador el polígono que representará el área de evaluación. Una vez finalizada la digitalización, se detiene su edición (menú Theme – Stop Editing) y contesta YES a la pregunta de si se quiere grabar la edición del tema creado.

A continuación se espera a que el sistema realice las operaciones necesarias hasta que automáticamente se adicione el tema con el modelo digital resultado. Al editar el nombre del tema (Theme – Properties) se puede cambiar el nombre para adaptarlo al origen del mismo (por ejemplo, Spline_precip_anual), para el MDP realizado a través del método Spline dentro del área contenida en el tema de las subcuencas (Subc) Limguata, IDW_precip_anual, etc.)

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN. En **MODELACIÓN DEL TERRENO**, se debe Cargar Curvas de Nivel, como paso inicial de la modelación digital de la topografía del área de estudio, del directorio en el cual se tiene almacenada la información respectiva (ej: d:\sigbal\topografia). Si se dispone de un archivo en formato *.dwg de AutoCAD R14 o inferior, se debe activar en ArcView GIS la extensión CAD Reader previamente (menú File – Extensions...). Una vez cargado el archivo, se visualiza con un solo símbolo editando la leyenda (Theme – Edit Legend – Legend Type – Single Symbol - Apply)

Se continúa, entonces, con la generación del modelo digital de elevación, MDE. Se activa y enciende el tema que contiene la información de curvas de nivel (curva_nivel.dwg), para tomar la opción Convertir curvas/ríos a formato shape, para convertir dicho tema, asignando un nombre adecuado (curvanivel.shp, curvas.shp o similar), ubicándolo en el directorio de información topográfica.

Con el tema recién creado activo, se toma la opción **MODELACIÓN DEL TERRENO - RED TRIANGULAR IRREGULAR TIN**, para generar un modelo digital de elevación basado en este método, tomando en Height Source el campo Elevation (de la tabla del tema en cuestión) que contiene los valores de altura para cada curva de nivel, se da clic en el botón OK del respectivo cuadro de diálogo, se busca el directorio asignado para contener la información topográfica (d:\sigbal\topografia) en donde se guarda el modelo a generar (curvas_tin, tin_curvas o similar)). Al tema resultante se apagan las líneas conocidas como hardbreaklines (editando la leyenda). Para visualizar el MDE en formato TIN, se apaga el tema del cual se originó (curvas_nivel.shp o eventualmente curvas_nivel.dwg)

A continuación se procede a generar una versión, en formato grid, del MDE derivado de las curvas de nivel. Para esto, con el TIN recién generado activo, se toma la opción **MALLA TIN** del menú **MODELACIÓN DEL TERRENO**, asignando un nombre al archivo a generar (MDE_Guatapuri, Guatapuri_mde o similar) y ubicándolo en el directorio destinado a la información topográfica, se da clic en el botón OK, para posteriormente asignar en el cuadro de diálogo que aparece en pantalla tanto el tema que contiene el área sobre la cual se va a obtener el MDE (subc) como el tamaño de celda a adoptar para el modelo (se recomienda asignar, en principio, un tamaño de celda igual a la mitad de la menor distancia horizontal entre curvas de nivel) .En el caso de la monografía, se encontró que es suficiente un tamaño de celda de 50 metros (aunque la menor distancia entre curvas de nivel es inferior a

ello), por lo que se teclea 50 en CellSize y se oprime Enter para actualizar el número de filas y columnas del modelo a generar. Se da click en OK y se aguarda a que el modelo procese la información, después de lo cual se contesta YES a la pregunta de si se adiciona el tema a la vista. Se obtiene así una malla de celdas cuadradas, cada una poseyendo un sólo valor de altura o elevación: esta es la representación del Modelo Digital de Elevación (MDE). La leyenda se puede editar, escogiendo entre las diversas paletas disponibles (Elevation o Terrain Elevation), no obstante se sugiere optar por la clasificación en un alto número de intervalos (usando el botón Classify en el cuadro de diálogo de edición de leyendas) escogiendo un valor alto para el número de clases utilizando el método de iguales intervalos, y dando click en el ícono de ordenación de las clases, para luego aplicar los cambios (Apply). De esta forma, el resultado es visualmente (respecto a los valores) más dicente, para la representación del MDE en formato de malla (grid).

Con el uso de la aplicación se puede generar un modelo de malla (raster) de la red de drenaje superficial, a partir del Modelo Digital de Elevación (raster) y la información sobre la hidrografía (archivo vectorial de la red hídrica).

La metodología estándar para delinear la red de drenaje (y por consiguiente las subcuencas hidrográficas) a partir de un modelo de elevación digital en formato raster se basa en el llamado algoritmo de flujo desde un punto en ocho direcciones. Este algoritmo identifica la celda, dentro de las ocho que la rodean, hacia la cual fluiría el agua atraída por la fuerza de gravedad.

La metodología consiste de los siguientes pasos generales:

Determinación de celdas bajas. Dichas celdas bajas se forman en el MDE dependiendo del proceso, y detalle, de la digitalización que se siguió al momento de leer las curvas de nivel. Las celdas bajas o depresiones (pits en inglés) representan zonas con menor altura que todas aquellas que las rodean, significando esto que son regiones en donde el flujo de agua se acumularía, a medida que sigue la pendiente hacia abajo. Estas zonas bajas bien pudieran existir, o no, en la realidad, para lo que es necesario realizar levantamientos topográficos a escala muy detallada en caso de que se requiera minuciosidad (para el propósito del balance hídrico de una cuenca hidrográfica, se considera que no es necesario el llevar a cabo tales levantamientos detallados).

“Quemado” o “esculpido” de la red de drenaje. En este paso, se asigna un valor de elevación uniforme (e inferior a todos) a las celdas de dicho MDE cuya posición coincide con la red hídrica en formato vectorial. En el caso de la monografía, se asigna cero (elevación cero) a tales celdas, mientras que a las demás se les deja su valor original. En esta etapa se debe disponer de la red hídrica superficial (si se encuentra en formato vectorial se convierte a formato raster o grid). El propósito de

esta etapa es asegurarse que el flujo de agua permanezca dentro de los cauces (en el modelo).

Llenado de las depresiones del MDE. El resultado es un nuevo modelo digital de elevación que se genera a partir del MDE preliminarmente obtenido. El objetivo es tener un modelo digital de elevación, en el que a las celdas bajas se les nivela con aquellas que las rodean y que tienen el valor de elevación más cercano (equivale a nivelar “por lo bajo” la depresión previamente existente). A este MDE se le conoce como “modelo llenado”.

Cálculo de la “acumulación del flujo”. Corresponde a la determinación del área de drenaje a partir del número de celdas que, siguiendo la dirección de flujo, son tributarias o afluentes de una celda en particular.

Identificación de los drenajes (corrientes) principales, seleccionando aquellas celdas que posean un valor de flujo acumulado mayor que un cierto valor (umbral) determinado por el usuario de la aplicación.

Etiquetado (linking) de cada uno de los segmentos de corriente de la red hídrica. Se asigna un único número a cada segmento de la red.

Delineado de las subcuencas hidrográficas de la zona de estudio. A partir del etiquetado de la red, se obtiene el área de drenaje (incrementalmente) asociada a cada segmento

Así, en la aplicación se toma el menú MODELACIÓN DEL TERRENO – Cargar Ríos, con lo cual se adiciona el tema de la red hídrica en formato vectorial (en la monografía se usa el archivo rios.dwg, que se encuentra ubicado en el directorio d:\sigbal\hidrografia (si se dispone de la red hídrica en formato shape, se carga directamente dicho tema). La leyenda del tema cargado se cambia a un sólo símbolo (Single Symbol). Seguidamente se convierte este archivo vectorial a formato shape con el menú Convertir ríos/curvas a formato shape, ubicando el resultado en el subdirectorío hidrografia, llamando el archivo a obtener rios.shp, contestando YES a la pregunta de si desea adicionar el tema a la vista (Add shapefile as a theme to the view?)

Una vez realizado el paso anterior, se activa el tema que contiene el modelo digital de elevación del área a estudiar (MDE_Guatapurí), con el objetivo de determinar si el MDE contiene los que se denominan celdas bajas, depresiones o sumideros (pits). Dichas celdas bajas se forman en el MDE dependiendo del proceso de digitalización que se siguió al momento de leer las curvas de nivel. Como ya se mencionó, las celdas bajas representan zonas con menor altura que todas aquellas

que las rodean, significando esto que son regiones en donde el flujo de agua se acumula, a medida que sigue la pendiente hacia abajo.

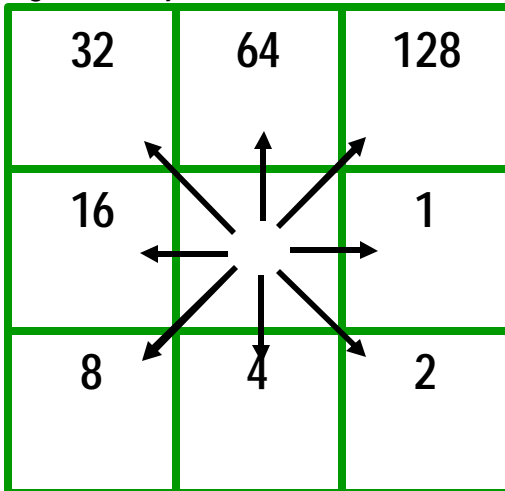
La determinación de la existencia de tales celdas se lleva a cabo mediante el menú MODELACIÓN RED DE DRENAJE – 1. Cálculo de Depresiones, seleccionando en el cuadro de diálogo que aparece en pantalla el tema con el MDE a evaluar (MDE_Guatapurí, o Guatapurí_mde en el caso de la monografía), luego de lo cual se da clic en el botón OK. Se obtiene un tema con formato malla (Grid o raster) al que automáticamente se le asigna el nombre de Sumideros, y presenta sólo dos valores (tema binario), siendo cero (0) asignado a celdas no bajas, y uno (1) a celdas bajas (Para el caso de la zona bajo estudio sólo se obtuvieron unas pocas celdas bajas, localizadas hacia el perímetro oeste de la cuenca, tal vez debido a que no se cuenta con una zona más amplia con curvas de nivel detalladas).

Se procede a “quemar” la red de drenaje, utilizando el menú MODELACIÓN RED DE DRENAJE – 2. Cortar la Red de Flujo Superficial, con el cual se asigna uno de dos valores a las celdas del tema que contiene la red hídrica (en formato shape), tal como se mencionó anteriormente. Se selecciona el MDE de la cuenca (Guatapurí_mde), seguido del tema que contiene la red de drenaje (Rios.shp). Para una mejor visualización, al tema que es adicionado a la vista se le edita la leyenda, y con Classify se dejan sólo dos clases, cuyos valores (Value) se cambian así: la primera, 0 – 0.1 y la segunda 0 – #, donde # es la mayor elevación del mde. (en forma alterna, puede aumentarse el número de clases, lo importante es dejar con valor de cero a la primera, y de la segunda en adelante asignar valores que continúen desde cero hasta la máxima altura del MDE).

El siguiente paso consiste en el llenado de tales depresiones (Sumideros), con el objetivo de obtener un modelo de elevación que soporte un adecuado patrón de drenaje superficial, que garantice el flujo en la dirección pendiente abajo. El menú que contiene el procedimiento para el llenado de las depresiones es el MODELACIÓN RED DE DRENAJE – 3. Llenar las depresiones, con el cual se selecciona el modelo digital de elevación correspondiente (el que posee la red de drenaje cortada o “quemada”) y se da click en el botón OK para que se inicie el proceso de llenado. Seguidamente se genera la red de drenaje, a partir del MDE llenado (sin depresiones, sumideros o pits). Se sigue el menú MODELACIÓN RED DE DRENAJE – 4. Generar la Red Hídrica y las Subcuencas. Con el MDE que se ha llenado seleccionado y dando clic en el botón OK, a medida que se realiza el proceso, se adicionan varios temas a la vista activa. Los temas obtenidos como resultado se explican a continuación:

Dirección de flujo: representa las direcciones de flujo superficial tomando como índice el algoritmo de flujo desde un punto en ocho direcciones, asignando un color y código únicos a cada celda del modelo generado para este tema. Los códigos se asignan teniendo en cuenta las ocho direcciones principales señaladas en la siguiente figura:

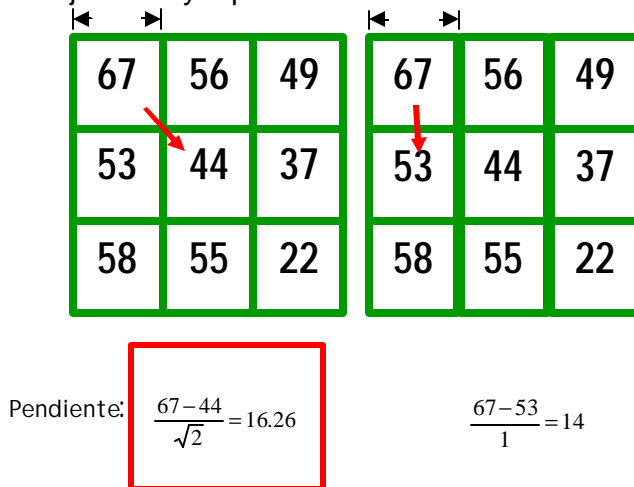
Figura 9. Flujo en ocho direcciones



Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

El procedimiento utilizado a través de los scripts seleccionados para la herramienta, escoge el camino de mayor pendiente para determinar la red de flujo.

Figura 10. Flujo de mayor pendiente

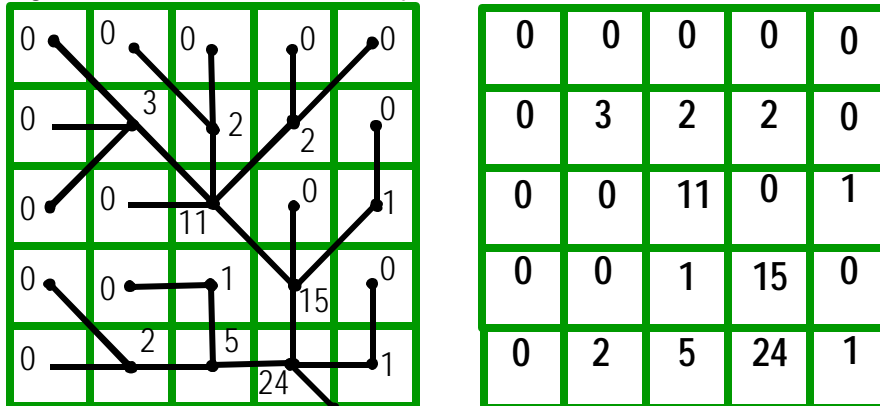


Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

La aplicación genera el tema mostrando sólo 8 clases o direcciones. En caso que no se obtenga así, el tema se visualiza de una mejor manera, en ArcView GIS editando la leyenda así: Legend Type (Tipo de Leyenda): Graduated Color (Color Graduado); Classification Field (Campo de clasificación): Value (Valor); Classify (Clasificar): Equal Interval (Intervalos Iguales) usando 8 clases topeando en la columna Value (Valor) 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128

Flujos Acumulados: Representa la acumulación de celdas, en la dirección aguas arriba; equivale al número de celdas (y al valor del área aferente) desde las cuales fluye el agua superficialmente hacia una celda determinada. Este tema se visualiza mejor editando su leyenda así: Legend Type: Graduated Color, Classification Field: Value, y Classify como Standard Deviation (Desviación Estándar) con Break Classes (Clases Naturales) en $\frac{1}{4}$ de la Desviación Estándar (Std Deviation)

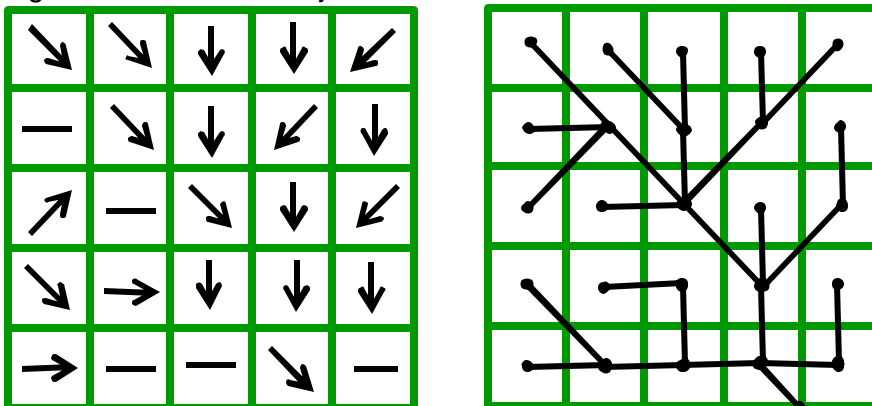
Figura 11. Acumulación de Flujos.



Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

Red de Drenaje: corresponde a la representación, en formato raster, de los caminos que forman la red de drenaje superficial sobre el modelo digital del terreno. Sólo posee dos valores: 1 para las celdas que definen la red y 0 para las celdas que no pertenecen a la red.

Figura 12. Red de drenaje

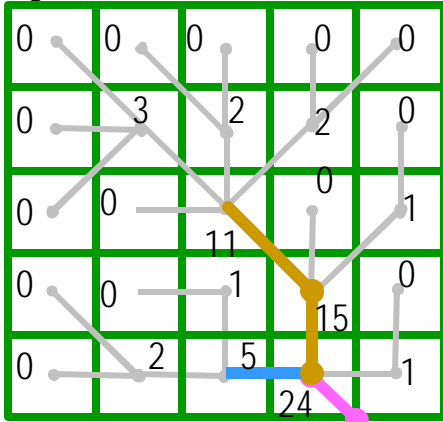


Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

Links (o segmentos) de la red de drenaje: contiene la asignación de un código único a cada segmento de la red hídrica superficial generada, lo cual es usado para determinar las cuencas o subcuencas dentro del área bajo consideración. Su

visualización es adecuada con los siguientes parámetros: Legend Type: Unique Value, Values Field: Value, y Color Scheme: Bountiful Harvest. Cada segmento puede poseer varias celdas, que comparten el mismo valor en el segmento a que pertenecen.

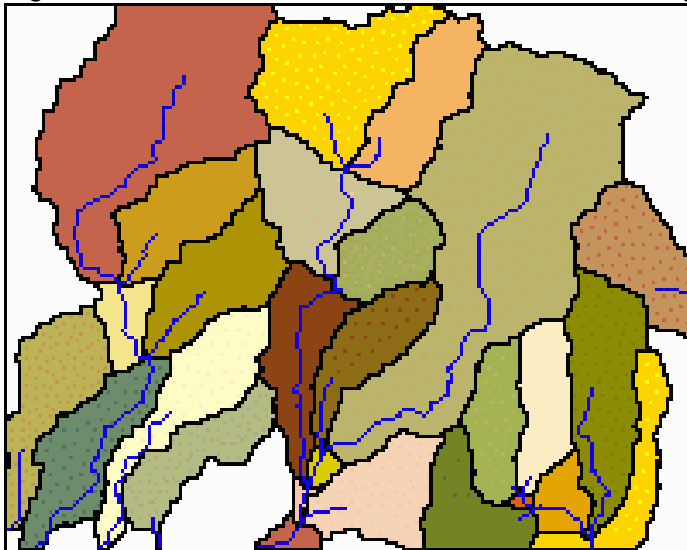
Figura 13. Links de la red de drenaje



Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

Subcuencas: representa las áreas aferentes a los diversos tramos de la red hídrica, con lo cual se conforma el mapa de subcuencas de la cuenca bajo estudio. La visualización puede ser similar a la de links de la red.

Figura 14. Subcuencas derivadas de la red de drenaje



Fuente: **Spatial Water Balance of Texas**, David Maidment

Para cada segmento se puede generar la subcuenca (microcuenca) aferente

Luego, se procede a generar el Modelo Digital de Evaporación. En este punto conviene recordar los conceptos utilizados para el desarrollo (y uso) de la aplicación.

Como se anotó en el numeral 4.1.3, la evaporación (o agua que escapa hacia la atmósfera) se tiene dos componentes principales: evaporación desde el suelo/agua y evaporación desde la vegetación, llamándose al conjunto Evapotranspiración (ETP). La ETP no se mide, recurriéndose al cálculo a partir de teorías y/o experimentos, en los que se obtiene una expresión (modelo aritmético) para la estimación de esta variable. Diversos autores, en varios países han desarrollado ecuaciones que se aplican dependiendo ya sea de las condiciones específicas del sitio en el cual se desarrolló, o a partir del juicio del evaluador, quien debe decidir acerca del grado de aplicabilidad de las ecuaciones.

En este punto, se usan las expresiones derivadas por Cenicafé e Ingeominas, a las cuales se hizo alusión anteriormente.

Cenicafé: $ETP = 4.658 e^{(-0.0002 * h)}$, donde

ETP, se obtiene en mm/día,
E, es la base de los logaritmos naturales, y
H, es la altura sobre el nivel del mar medida en metros.

En la aplicación desarrollada se utiliza el menú MODELACIÓN DEL TERRENO – ETP Cenicafé, con el que solicita la escogencia del modelo digital de elevación de la cuenca, para ser generado y adicionado a la vista.

Ingeominas: $ETP = 4149.27 * h^{(-0.185)}$, donde

H, es la altura sobre el nivel del mar, en metros, y
ETP, es la evatranspiración anual, en mm.

El menú a escoger para este último caso es MODELACIÓN DEL TERRENO – ETP Ingeominas Corpocesar 1994, debiendo escogerse también el modelo digital de elevación de la cuenca. Una vez se tenga en la vista los dos modelos de evapotranspiración (MDETP) obtenidos, se procede a efectuar el balance de agua disponible en forma superficial. Primero se debe cortar o extraer, de los MDE, MDP y MDETP aquellas celdas que pertenecen sólo al área o sistema hidrológico bajo análisis (cuenca hidrográfica), ya que inicialmente se pudo haber interpolado sobre

un área de mayor extensión (lo cual, se recalca, es recomendable para obtener un resultado mas representativo). Se toma el menú EXTRAER ÁREAS - Cortar de un MDT un polígono, seleccionando sucesivamente los diversos modelos digitales generados para la elevación, precipitación y evapotranspiración. En cada caso, primero se debe escoger el tema del modelo digital a seleccionar y luego el tema del polígono a usar como área de corte (Subc, el de subcuencas en este caso). Se obtienen sendos temas tipo malla (modelos digitales) que contienen celdas dentro del perímetro de la cuenca. En el caso de la monografía, se asigna un nombre, así: Area de tema_del_modelo_digital dentro de tema_del_polígono_de_corte.

Ya en este punto se puede proceder a calcular el balance hídrico superficial. Para el efecto se toma el menú MODELACIÓN DEL TERRENO – Cálculo del balance hídrico superficial. Aquí, debe escogerse los dos modelos digitales que intervienen en dicho balance: el de precipitación y el de evapotranspiración (en la monografía se han generado varios modelos digitales de precipitación y dos modelos digitales de evapotranspiración, por lo que puede hacerse distintas combinaciones para efectuar análisis). El resultado es un modelo digital (malla, grid, o raster) que representa la diferencia entre la precipitación, P, de agua (entrada al sistema) y la evapotranspiración, ETP (salida del sistema), y que constituye la escorrentía, R (agua que opera dentro del sistema). Esta escorrentía es la que determina el caudal que circula por la cuenca hidrográfica. El tema que es adicionado automáticamente a la vista activa es llamado Balance de modelo digital de precipitación – modelo digital de evapotranspiración

A continuación se procede a calcular el caudal para cada microcuenca, y el total para la subcuenca. Para esto, se activa el tema de las subcuencas (en el caso de la monografía, Subc), se toma el menú Analysis – Summarize Zones (resumen por zonas), se escoge el campo de la base de datos que contiene el nombre de las microcuencas para efectuar el resumen de escorrentía por cada una de ellas, seleccionando a continuación el tema sobre el cual se hace el resumen, es decir el modelo digital de escorrentía. Se muestra entonces una tabla en donde se registra el total de escorrentía por microcuenca, así como una gráfica que muestra los resultados (si el número de microcuencas o áreas de resumen es superior a 25, no se presenta la gráfica). Para dicha tabla se adiciona un nuevo campo que contendrá el caudal. Se sigue el menú Table – Start Editing (Comenzar edición), luego Edit – Add Field y en el cuadro de diálogo que aparece en pantalla se asigna un nombre al campo nuevo (por ejemplo BALANCE), se deja el tipo de dato (Type) como numérico (Number), con ancho (Width) 16 o superior, y cero en lugares decimales (Decimal Places), dando ahora clic en el botón OK.

A continuación se opera el botón Calculate, o se sigue el menú Field – Calculate, para calcular el valor del nuevo campo, con base en el modelo digital del balance o escorrentía, que contendrá el valor del caudal, para luego seleccionando con doble click los campos Area, Mean y los operandos * (multiplicación) y / (división) digitar en el cuadro de diálogo que aparece en pantalla, la siguiente expresión:

$$(\text{Area}) * (\text{Mean}) / 31536000$$

donde Area (área de cada microcuenca) y Mean (escorrentía media anual) son campos de la tabla creada. 31536000 corresponde al factor de conversión de tiempo (número de segundos que tiene un año). Esta expresión se explica a continuación:

El balance, diferencia entre Precipitación y Evapotranspiración, se obtiene como una lámina de agua superficial (escorrentía), en mm/año y se encuentra en el campo Mean. Dicha lámina realmente ocupa un volumen en la cuenca y en un tiempo determinado (1 año), lo cual se expresa como caudal (volumen por unidad de tiempo). Así, para obtener el caudal se realiza la siguiente operación:

$$\frac{\text{BH (mm)} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m} * 1000 \text{ litros} * \text{Area (m}^2\text{)}}{\text{año} * 31'536.000 \text{ seg} * 1000 \text{ mm} * \text{m}^3}$$

de donde cancelando unidades, se obtiene litros/segundo.

Luego se obtiene la suma de los balances de cada una de las microcuencas, mediante la estadística de la tabla y del campo en cuestión. Se activa el campo añadido (BALANCE) y se sigue el menú Field – Statistics, procediéndose a registrar el valor del ítem Sum. ASÍ EL RESULTADO TOTAL OBTENIDO EN EL CAMPO ADICIONADO (BALANCE, en el caso de la presente monografía), REPRESENTA LA CANTIDAD DE AGUA SUPERFICIAL TOTAL QUE EN PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL SE OBTIENE PARA LA CUENCA (teniendo en cuenta que se partió de datos de precipitación media multianual), es decir, el caudal medio multianual.

De esta manera, al procesar para los distintos modelos digitales de precipitación y evapotranspiración obtenidos, los caudales medios multianuales resultantes son:

Tabla 4. Resultados del modelo digital de balance hídrico superficial.

	MODELO DIGITAL DE ESCORRENTIA (BALANCE SUPERFICIAL)	WEIGHT o POTENCIA	MODELO DIGITAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	
			CENICAFÉ	INGEOMINAS - CORPOCESAR
			CAUDAL MEDIO ANUAL (LITROS/SEGUNDO)	
1	SPLINE TENSION	0,10	13.323,00	15.749,00
2	SPLINE TENSION	1,00	13.011,00	15.440,00
3	SPLINE TENSION	7,00	12.646,00	15.084,00
4	SPLINE REGULARIZED	0,20	9.842,00	12.263,00
5	SPLINE REGULARIZED	0,50	9.018,00	11.453,00
6	INVERSE DISTANCE WEIGHTING	2,00	9.120,00	11.544,00
7	INVERSE DISTANCE WEIGHTING	3,00	10.225,00	12.653,00
8	TREND ANALYSIS	3,00	7.737,00	10.173,00
9	TREND ANALYSIS	2,00	1.849,00	4.279,00
10	KRIGING ESFÉRICO		7.651,00	9.760,00
11	KRIGING CIRCULAR		6.782,00	8.887,00
12	KRIGING EXPONENCIAL		7.524,00	9.627,00
13	KRIGING GAUSS		7.481,00	9.589,00
14	KRIGING LINEAL		7.651,00	9.755,00
CAUDAL MEDIO ANUAL AFORADO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUATAPURÍ (Litros/segundo), Ideam				16.070,00
NÚMERO DE DATOS CALCULADOS				14

Fuente: Autor de la monografía.

El dato de caudal medio anual multianual representa la disponibilidad de agua para el período de un año, con el cual se compara la demanda por parte de usuarios y así se determina si dicho caudal satisface a esa demanda. La demanda total, reglamentada mediante Resolución 139 del 04 de agosto de 1987 por la Corporación Autónoma regional del Cesar para el río Guatapurí y ejercida por los usuarios es de 7.900,21 ltros/segundo, teniendo en cuenta un caudal base de reparto de 11.260 litros/segundo, lo cual arroja un caudal remanente (por asignar), según resolución, de 3.359,79 litros/segundo. A continuación se incluye el cuadro general de reparto para las derivaciones principales (es decir, las que salen directamente del cauca principal)

Tabla 5. Asignación de caudales, derivaciones principales del río Guatapurí

NOMBRE DE LA DERIVACIÓN	TIPO DE CAPTACIÓN	CAUDAL ASIGNADO Litros/segundo
Primeras captaciones resguardo indígena	Manquera de 2"	0,63
Primera derecha No. 1	Manquera de 2"	1,00
Segunda derecha No. 2 (1)	Bombeo, 4"	6,00
Tercera derecha No. 3	Manquera de 2"	2,00
Primera izquierda No. 4	Canal Serrano	15,22
Cuarta derecha No. 5	Canal	2,00
Quinta derecha No. 6	Canal La Solución	792,16
Segunda izquierda No. 7	Canal	46,00
Sexta derecha No. 8	Canal acueducto Valledupar	1.804,00
Séptima derecha No. 9	Canal Sierra	1.537,00
Tercera izquierda No. 10	Bombeo	3,00
Cuarta izquierda No. 11	Canal Cabas	297,00
Quinta izquierda No. 12	Canal Los Corazones	364,94
Sexta izquierda No. 13	Canal Petaca	325,00
Octava derecha No. 14	Canal Cicolac	137,00
Novena derecha No. 15	Canal Campo Adela	1,00
Séptima izquierda No. 16	Canal Pájaro	416,00
Octava izquierda No. 17	Canal Canoa	1.498,20
Décima derecha No. 18	Canal Guatapurí, Salguero, Mayales	270,00
Novena izquierda No. 19	Caño Molina	294,60
Décima izquierda No. 20	Canal	1,00
Décimaprimeras derecha No. 21	Canal	1,00
Décimasegunda derecha No. 22	Canal	62,00
Décimaprimeras izquierda No. 23	Canal	23,00
Última captación izquierda	Bombeo	0,46
CAUDAL TOTAL ASIGNADO		7.900,21
CAUDAL BASE DE REPARTO		11.260,00
CAUDAL REMANENTE SEGÚN RESOLUCIÓN		3.359,79

Fuente: Corpocesar, Coordinación de Concesiones Hídricas

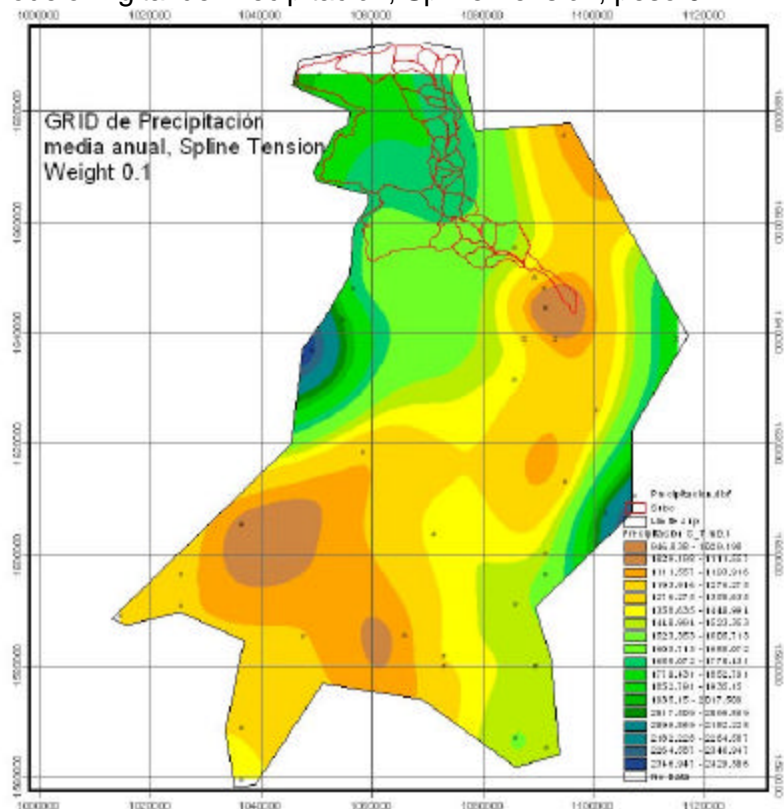
Se destaca aquí que, para el caso del río Guatapurí, todas las captaciones relacionadas se ubican sobre el cauce principal y se concentran en el curso bajo del mismo, a partir del sitio conocido como El Reposo.

6. CONCLUSIONES

A manera de conclusión, se procede a escoger el modelo que mejor representa la situación para la cuenca. Lo anterior se debe hacer apoyándose en mediciones que se lleven a cabo en el mundo real, para lo cual se dispone de los datos de aforos de caudal que ha levantado históricamente el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (antiguo Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, HIMAT). Para la cuenca del río Guatapurí, el caudal medio multianual reportado por la red de medidores de flujo superficial, es de 16200 litros/segundo en la parte baja de la cuenca.

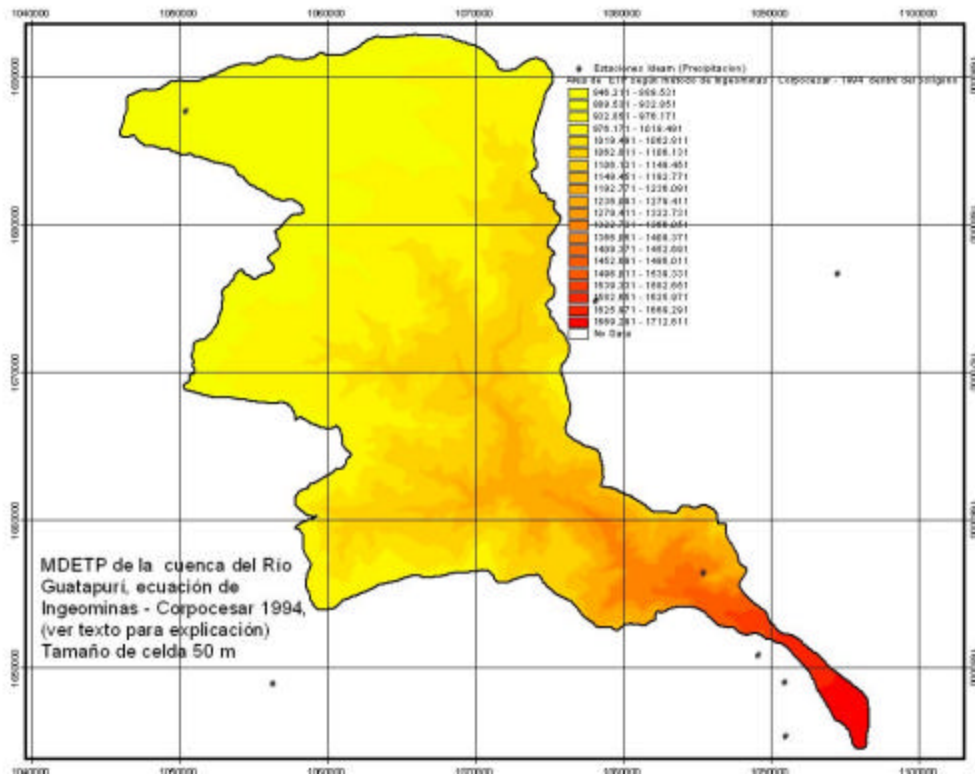
Como puede observarse en la tabla anterior, el modelo digital que más se aproxima en la determinación del balance hídrico superficial, tal como se ha planteado en esta monografía, es el basado en el método de interpolación que usa las spline, en modalidad Tensión (que representa la tensión a la que estaría sometida la superficie de interpolación para acomodarse a los puntos del modelo digital) con un peso de 0.10 para la ponderación de la información y cuyos componentes (precipitación y evapotranspiración) se ilustran a continuación:

Figura 15. Modelo Digital de Precipitación, Spline Tensión, peso 0.1



Fuente: Autor de la monografía

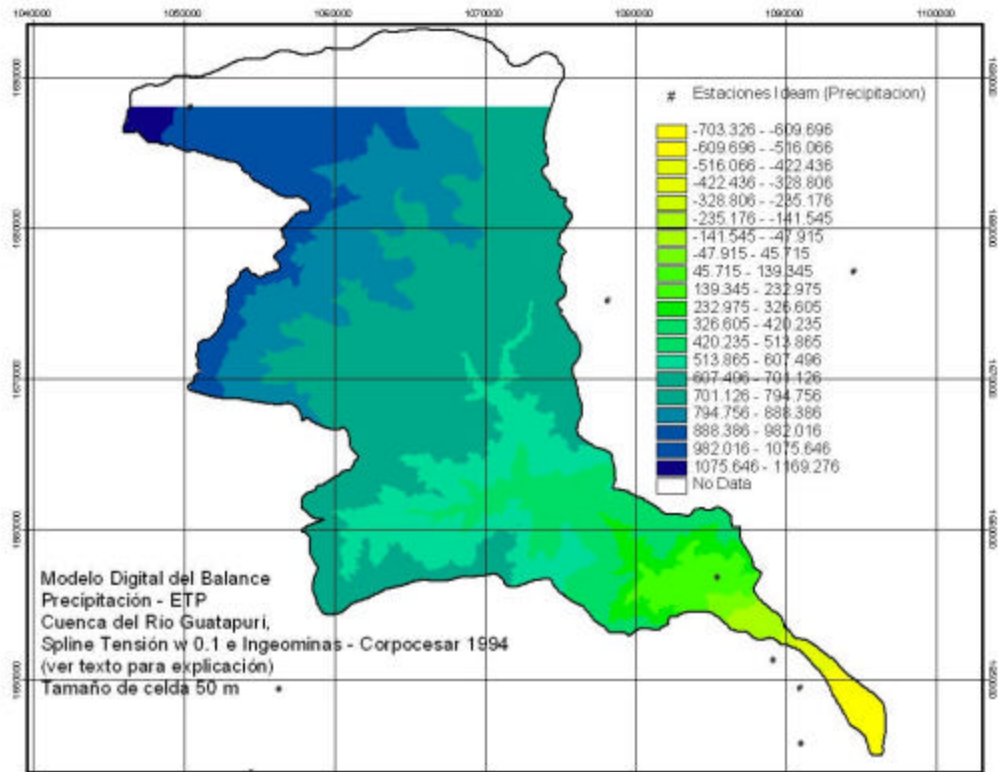
Figura 16. Modelo Digital de Evapotranspiración, Ingeominas – Corpocesar 1994



Fuente: Autor de la monografía

Además de esto, al considerar el análisis de los datos obtenidos, se constata que el mejor resultado de todos corresponde al modelo digital en el cual interviene el método de Ingeominas – Corpocesar (Evaluación del agua subterránea del departamento del Cesar, año de edición 1994), con un caudal de 15749 litros/segundo (15.75 m³/seg), corroborándose así la utilidad del método de cálculo propuesto en la presente monografía, en opinión de su autor.

Figura 17. Modelo Digital del Balance Hídrico Superficial



Fuente: Autor de la monografía

El análisis de la variación espacial de las variables que intervinieron en la determinación del balance hídrico superficial, se ilustra en las figuras que se incluyen en el Anexo A, obtenidas luego de procesar la información con el procedimiento descrito arriba, y usando la aplicación diseñada. A partir de los modelos obtenidos, y específicamente el basado en el método Spline Tensión, con weight 0.1 para la precipitación y la ecuación Ingeominas – Corpocesar 1994 para la evapotranspiración, se concluye lo siguiente:

La precipitación aumenta en dirección noroeste y a medida que aumenta la altura de la subcuenca del río Guatapurí. Los valores de precipitación generados por el modelo se desvían apreciablemente del valor de la estación asumida para la parte más alta de la Subcuenca (Colón). Por lo anterior, se recomienda examinar otros resultados utilizando información adicional a partir de un mayor número de estaciones pluviométricas, ya que para la presente monografía sólo se tuvo acceso a aquellas ubicadas en el departamento del Cesar.

La evapotranspiración, calculada con el método mencionado, presenta sus valores medios anuales más altos (1.625 a 1712 mm) en la parte baja y suroriental de la subcuenca, mientras que los valores medios anuales más bajos (846 a 1.100 mm)

se presentan en la zona alta de la subcuenca, ocupando la mayor proporción del área de la misma.

No obstante, se observa que los modelos no ofrecen el resultado esperado para la estación asumida en lo alto de la Sierra Nevada de Santa Marta (parte alta de la cuenca del río Guatapurí), lo cual es una característica de los interpoladores, en especial el spline, el cual se caracteriza por que puede sobreestimar valores si hay cambios apreciables de los datos verticales al considerar su separación horizontal (Andrew Romanek y David Maidment, Universidad de Texas, Austin). El análisis por subcuenca, determina la relación de caudales, ilustrada en la Tabla 5.

Tabla 6. Caudales por subcuenca, derivados del modelo digital de balance hídrico.

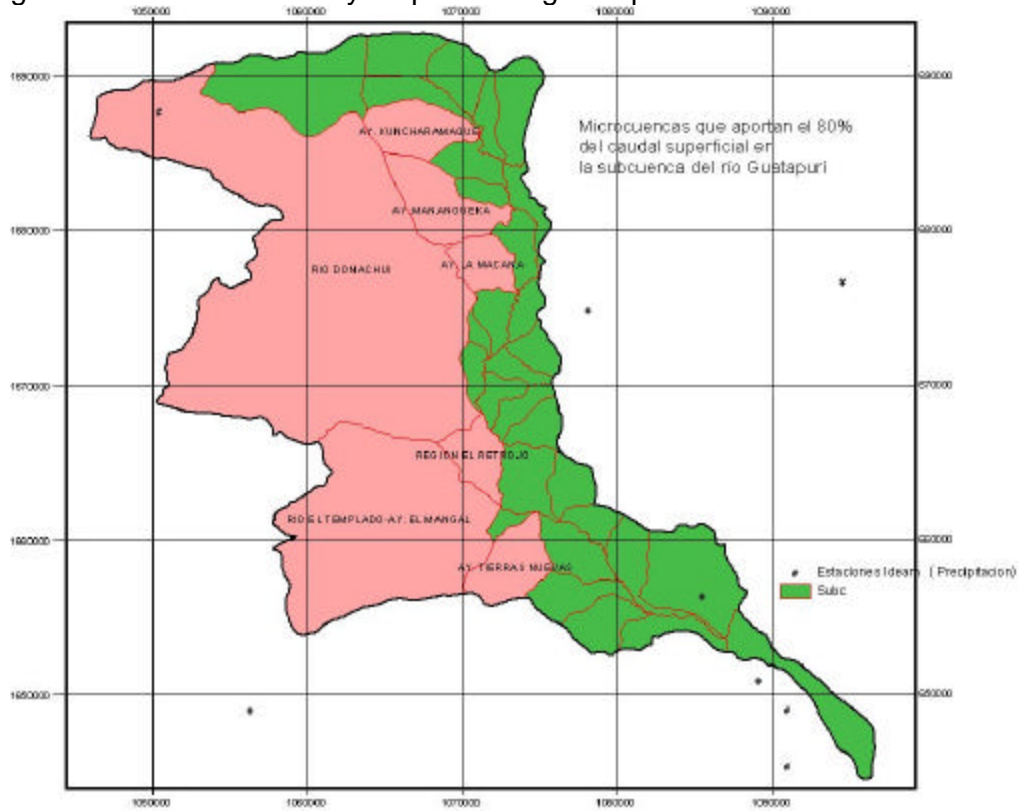
NOMBRE	AREA	MEAN	BALANCE
RIO DONACHUI	312169984,0000	822,5063	8142
RIO L TEMPLADO-AY. EL MANGAL	128690000,0000	614,2098	2506
AY. MANANGUEKA	25320000,0000	785,7487	631
AY. KUNCHARAMAQUE	17270000,0000	828,1358	454
AY. TIERRAS NUEVAS	19360000,0000	544,1674	334
AY. LA MACANA	12270000,0000	724,1624	282
REGION EL RETROJO	13150000,0000	577,6525	241
REGION EL PLATANITO	14340000,0000	526,2917	239
AY. CAPITANEJO	31560000,0000	225,5056	226
REGION CHENDUKUA	8880000,0000	747,6167	211
REGION TIERRAS NUEVAS	8510000,0000	658,6389	178
REGION AY. DEL MORRO	12080000,0000	446,8050	171
REGION ARIGUANI	12620000,0000	415,3789	166
AY. MANGUECA	7940000,0000	650,6836	164
REGION EL COPEY	7580000,0000	679,5713	163
AY. ESCONDIDO	7000000,0000	686,1220	152
AY. PIEDRA DE AFILAR	8940000,0000	516,6567	146
GUATAPURI E-W	4830000,0000	928,8884	142
REGION VENENCIANA	6300000,0000	658,1270	131
REGION SAN JOSE	6200000,0000	654,8087	129
Q. SURIVAQUITA	5800000,0000	702,3242	129
REGION AY. YUKUIRA	6040000,0000	644,6678	123
REGION LOMA LOS CORAZONES	12430000,0000	307,4287	121
AY. EL COMINO	11720000,0000	319,1205	119
REGION AY. SAN PEDRO	5820000,0000	628,4238	116
REGION AY. DOS BOCAS	5190000,0000	678,9809	112
REGION CUNQUE	4490000,0000	719,2703	102
REGION LA MENALCA	4820000,0000	632,7250	97
REGION A	6400000,0000	419,9446	85
Q. QUINCAMAQUE	3730000,0000	710,7255	84
AY. EL CEIBAL	2300000,0000	689,2850	50
REGION LAS PALMAS	8270000,0000	166,9961	44
REGION AY. EL TIGRE	2750000,0000	495,1485	43
GUATAPURI ALTO W	610000,0000	726,4937	14
Q. DONAGUI	140000,0000	716,6342	3
GUATAPURI BAJO E-W	21050000,0000	450,9045	-301
TOTALES	766569984,0000		15749

Fuente: Autor de la monografía

La columna Mean expresa la diferencia entre precipitación (P) y evapotranspiración (ETP), como una lámina de agua (mm) en el período de un año en forma promedio. La columna Balance expresa el caudal superficial medio anual multianual. Esta tabla se obtuvo con la aplicación desarrollada. Se observa que las microcuencas Donachuí, El Templado – El Mangal, Mamangueka, Kuncharamake, Tierras Nuevas,

La Macana y El Retrojo, que representan el 69 por ciento del área cubierta por los datos, aportan el 80 por ciento del caudal, indicando esto que son las más productivas en materia de recurso hídrico. Su localización se da sobre el flanco occidental de la subcuenca, tal como se ilustra en la siguiente figura:

Figura 18. Cuencas con mayor aporte de agua superficial



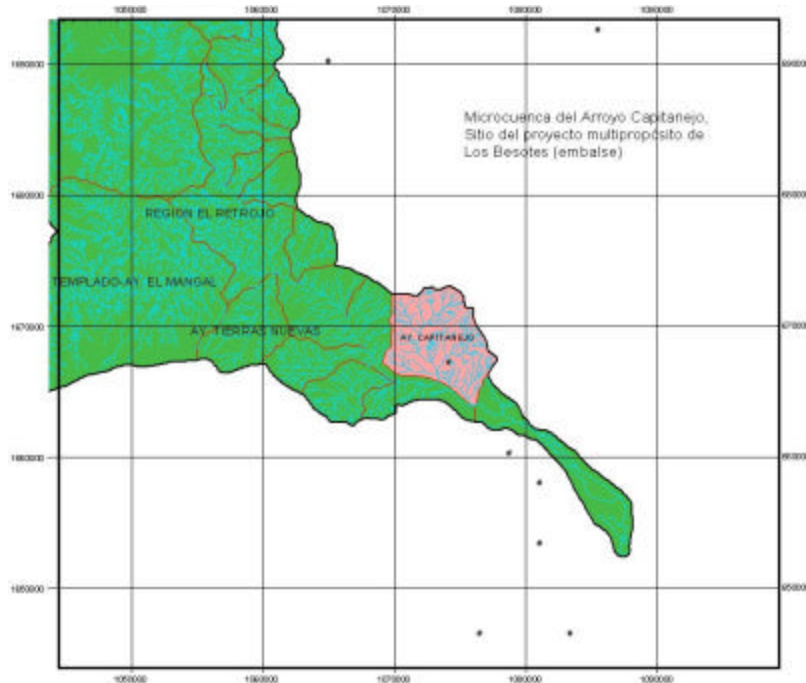
Fuente: Autor de la monografía

Todas las captaciones o derivaciones principales (directas del cauce) se ubican aguas abajo de las cuencas en cuestión, significando esto que, de acuerdo con los resultados obtenidos con la modelación, la demanda puede satisfacerse. No obstante, debe tenerse en cuenta el concepto del caudal ecológico (introducido por algunas autoridades ambientales) para la asignación de caudal a un mayor número de solicitudes por parte de los usuarios de la cuenca. Este aspecto es determinante al momento de formular el Plan de Ordenamiento de la Subcuenca del río Guatapurí., puesto que de lo afirmado se desprende que es en estas cuencas en donde se deben concentrar los mayores esfuerzos de conservación, recuperación y manejo ambiental integral, por parte de las autoridades competentes.

El modelo digital de balance hídrico superficial señala que existe déficit de agua en la subcuenca del río Guatapurí, en su tramo inferior, y que esencialmente el agua se produce en la parte alta y media. Esta circunstancia, aunque puede parecer obvia,

es determinante para diseñar programas de aprovechamiento del recurso hídrico, máxime cuando es en dicho tramo en el que se encuentra asentada la ciudad de Valledupar.

Figura 19. Sitio de embalse Los Besotes (arroyo Capitanejo)



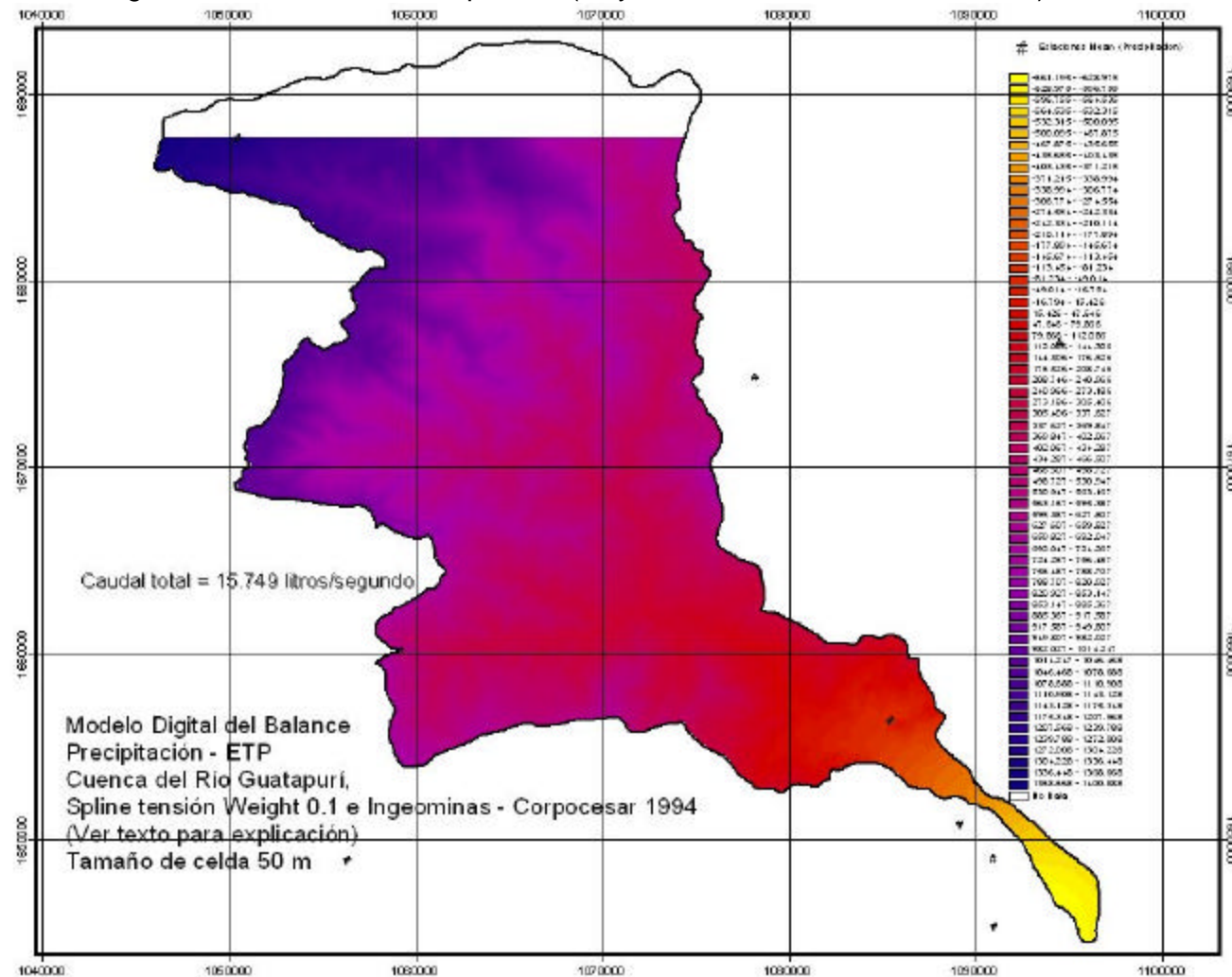
Fuente: Autor de la monografía.

En efecto, el proyecto de construcción de una presa en la región conocida como Los Besotes (cuenca del arroyo Capitanejo) se localizaría muy cerca de la zona de déficit de agua superficial, y específicamente en una zona en la que el balance tiende al equilibrio entre precipitación y evapotranspiración (la cuenca Capitanejo tiene, según el modelo, un caudal anual de 226 litros por segundo. Este proyecto tiene el propósito de servir como fuente del acueducto de Valledupar, cuyas necesidades actuales (año 2004) se acercan a los 2000 litros por segundo, por lo que se ha pensado en captar el agua desde la parte media de la cuenca, con un caudal de alrededor de 17.000 litros por segundo (Fuente: Emdupar S.A. E.S.P.). Este requerimiento, de acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación efectuada, no podría satisfacerse, ya que el caudal total de la cuenca es igual o inferior al especificado para el proyecto de embalse. No obstante, se recalca que los datos generados deben ser revisados mediante la consideración de un mayor número de estaciones pluviométricas por fuera de la cuenca (hacia los departamentos de Guajira y Magdalena, limítrofes con la subcuenca analizada). El proyecto en cuestión, ha sido declarado como no prioritario por parte del Gobierno Nacional (Consejo Comunal de Gobierno en Valledupar, Álvaro Uribe Vélez, Presidente de Colombia, marzo de 2004).

El déficit de agua superficial en algunas de las cuencas, eventualmente señala la ocurrencia de una situación singular: al haber mayor evapotranspiración en relación con la precipitación, puede tenerse aportes de otras fuentes, puesto que se ha observado, durante los recorridos del autor de la presente monografía por la subcuenca en su experiencia como funcionario de Corpocesar, que se encuentra agua fluyendo durante una parte del año, siendo una de dichas dcha fuentes el agua subterránea. Esto fue advertido al consultar con el especialista en Hidrogeología, Hugo Cañas Cervantes, de IDEAM.

Finalmente, el modelo digital de balance hídrico superficial con una visualización más detallada (mayor número de clases de valores) se incluye a continuación:

Figura 20. Modelo Digital del Balance Hídrico Superficial (mayor número de intervalos de clase)



Fuente: Autor de la monografía

BIBLIOGRAFÍA

ANGEL, Carlos E. y HUGUETT, Alcides. Evaluación del Agua Subterránea en el departamento del Cesar, Convenio Interadministrativo Ingeominas – Corpocesar. 1995. 326 p.

CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R., y. MAYS, Larry W. Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá. McGRAW – HILL INTERAMERICANA, S.A.. 1994. , 584 p.

I
ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. Ayuda en línea, del software ArcView Gis 3.x

GAVILÁN, Germán E. Modelamiento Digital. Notas de clase. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2003. 134 p.

MAIDMENT, David, and OLIVERA Francisco, Ph.D. Stream and Watershed Delineation from DEM's. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin. 1997. Artículo publicado en la red Internet.

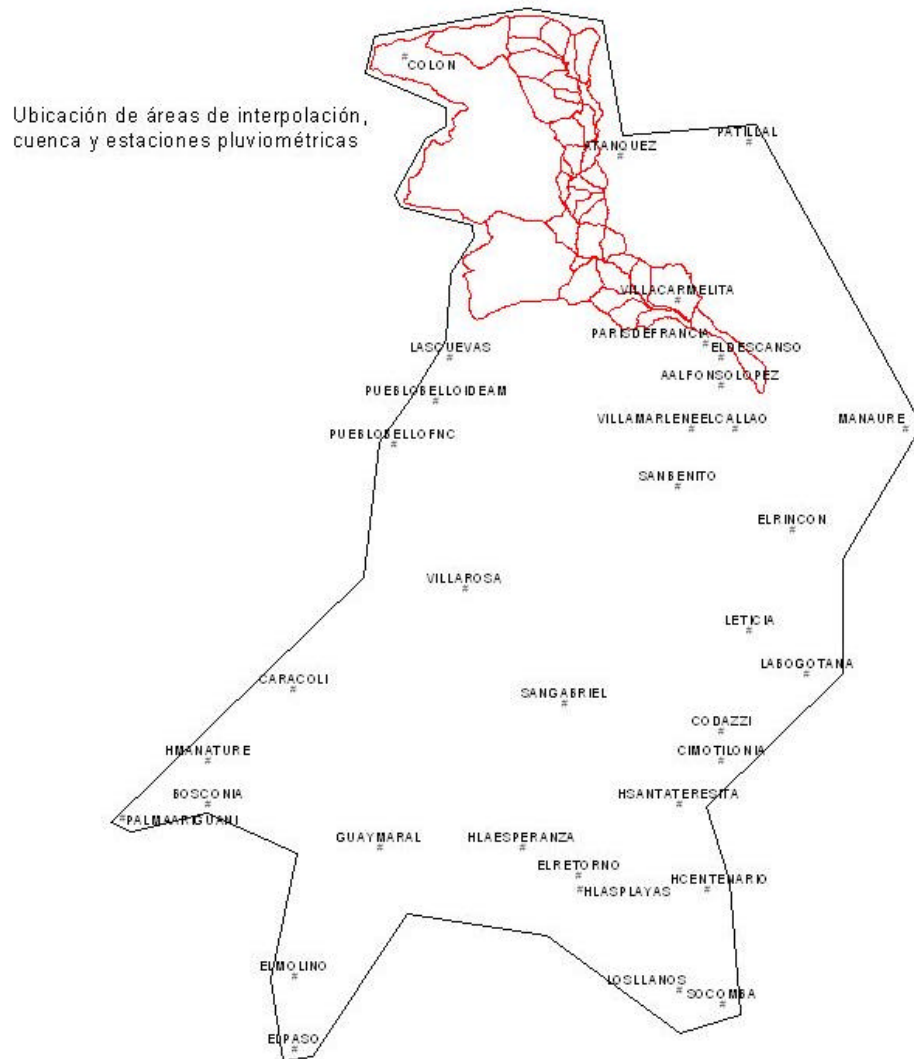
OLIVERA, Francisco, , Spatial Hydrology of the Urubamba River System in Peru, Using Geographic Information Systems (GIS). Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin. 1996. La información fuente se puede consultar en internet: <http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera/peru/peru.htm>

PETRIE, G. and KENNIE, T.J.M. Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering, McGraw-Hill, Inc. 1990.351 p.

REED, M. Seann, MAIDMENT, David R, and PATOUX Jérôme. Spatial Water Balance of Texas, CRWR Online Report 97-1. 1997. La información fuente se puede consultar en internet: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/library/wbtexas/sect1.htm>

ANEXO A. MODELOS DIGITALES DE PRECIPITACIÓN

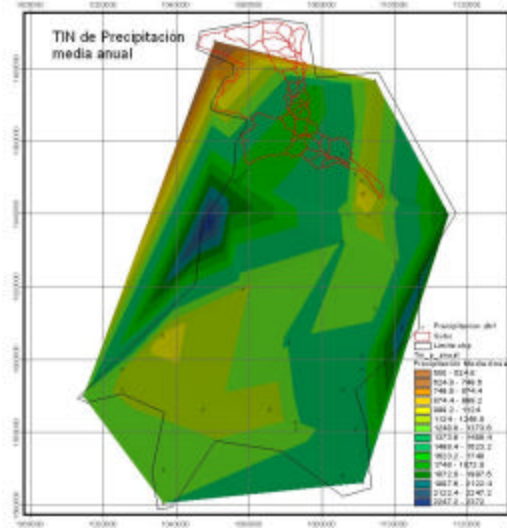
La subcuenca del río Guatapurí (polígono rojo) y el área envolvente considerada para las estaciones pluviométricas del norte del Departamento del Cesar



Fuente: SIGPER

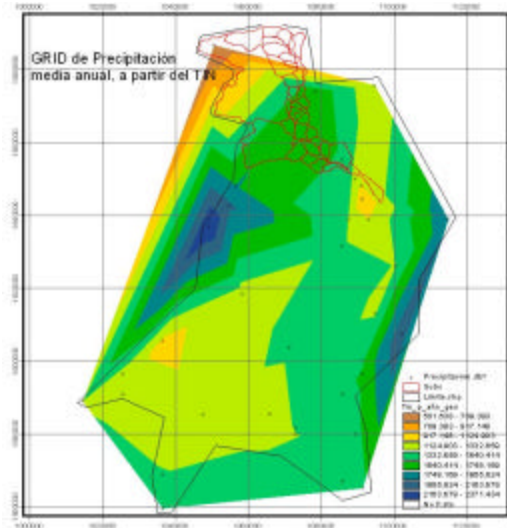
MODELOS DIGITALES DE PRECIPITACIÓN. Método: Redes Triangulares Irregulares (TIN)

TIN



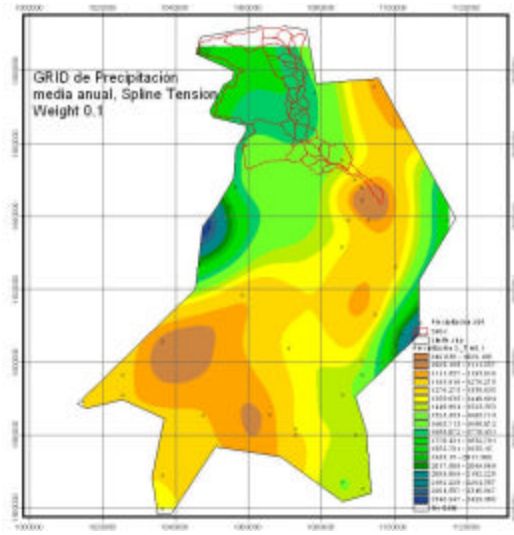
Fuente: SIGPER

GRID a partir de la TIN



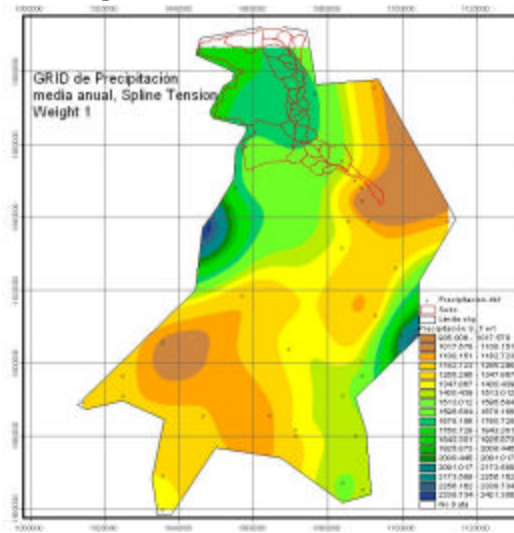
Fuente: SIGPER

Método: **Spline Tension Weight 0.1**



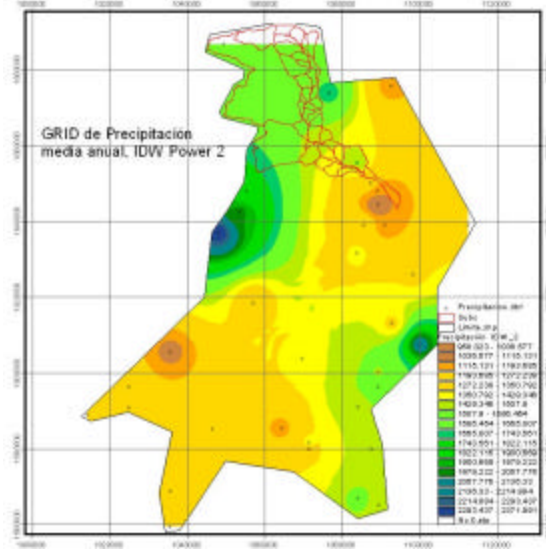
Fuente: SIGPER

Método: **Spline Tension Weight 1**



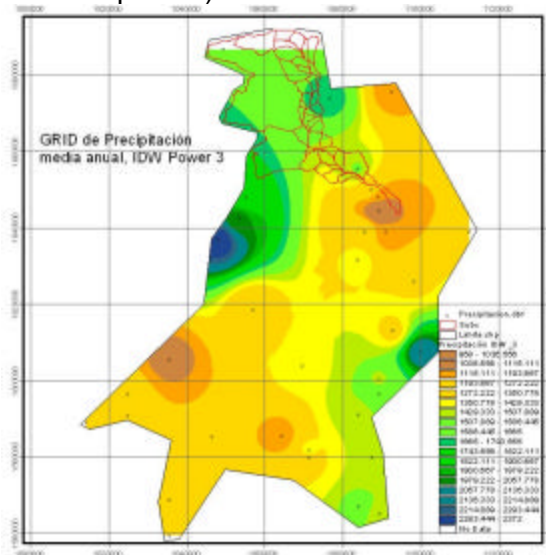
Fuente: SIGPER

Método: **Inverse Distance Weighting**, (Promedio ponderado del inverso de una potencia de la distancia entre puntos). Potencia 2



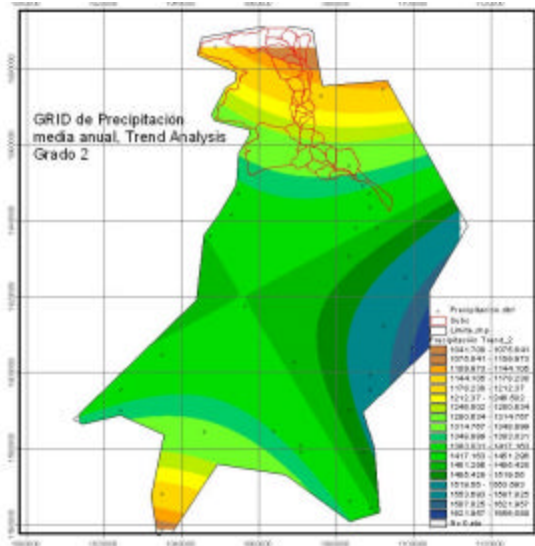
Fuente: SIGPER

Método: **Inverse Distance Weighting**, (Promedio ponderado del inverso de una potencia de la distancia entre puntos). Potencia 3



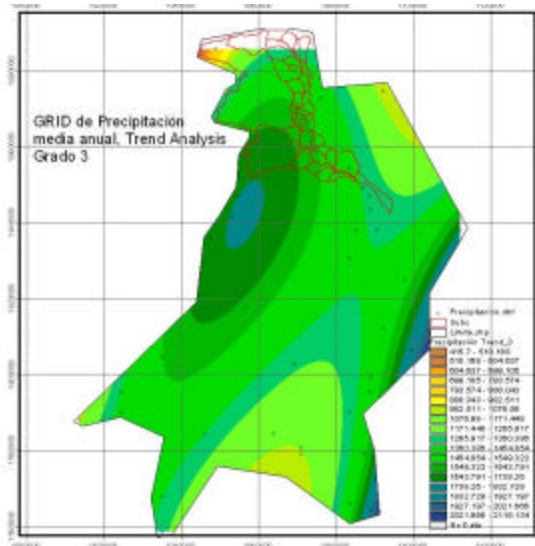
Fuente:SIGPER

Método: **Trend Analysis** (Análisis de tendencia con polinomios de grado superior), Grado 2



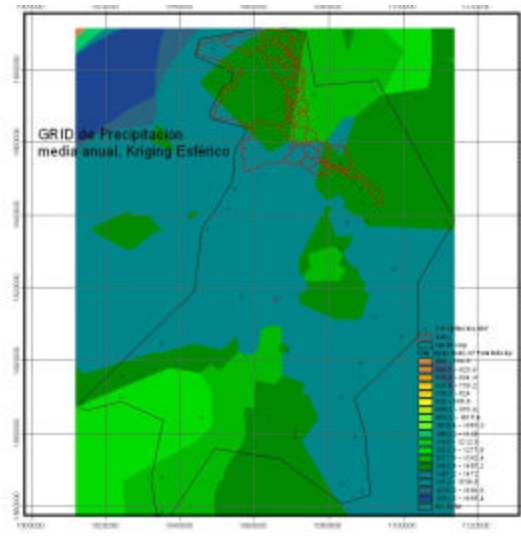
Fuente: SIGPER

Método: **Trend Analysis** (Análisis de tendencia con polinomios de grado superior), Grado 3



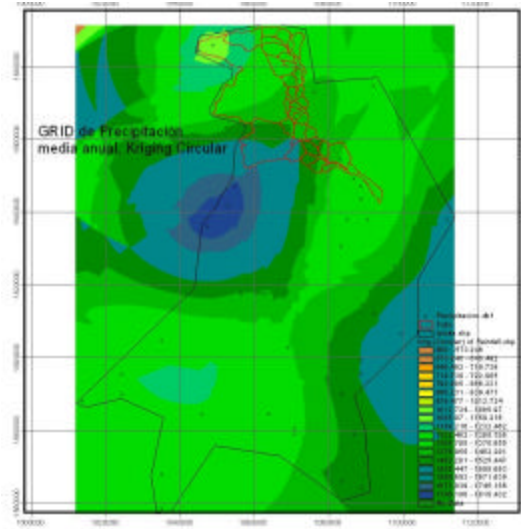
Fuente: SIGPER

Método: Kriging Esférico



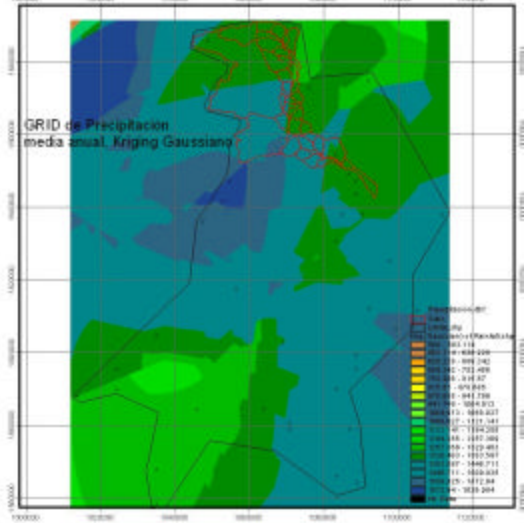
Fuente: SIGPER

Método: Kriging Circular



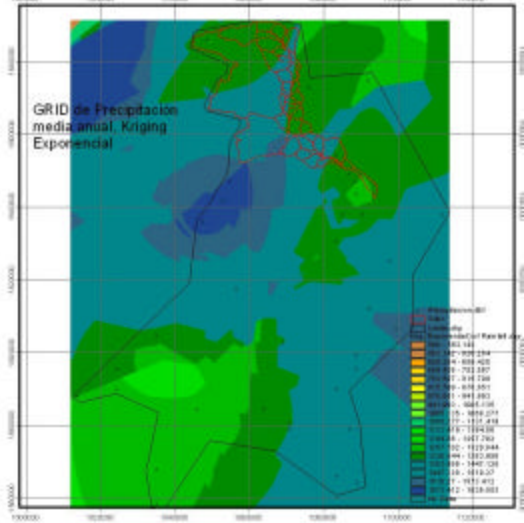
Fuente: SIGPER

Método: Kriging Gaussiano



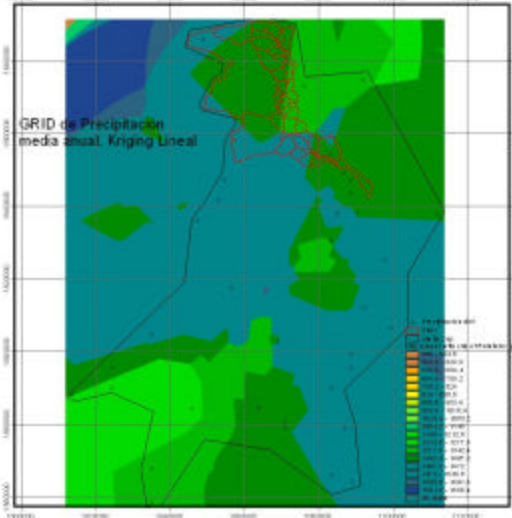
Fuente: SIGPER

Método: Kriging Exponencial



Fuente: SIGPER

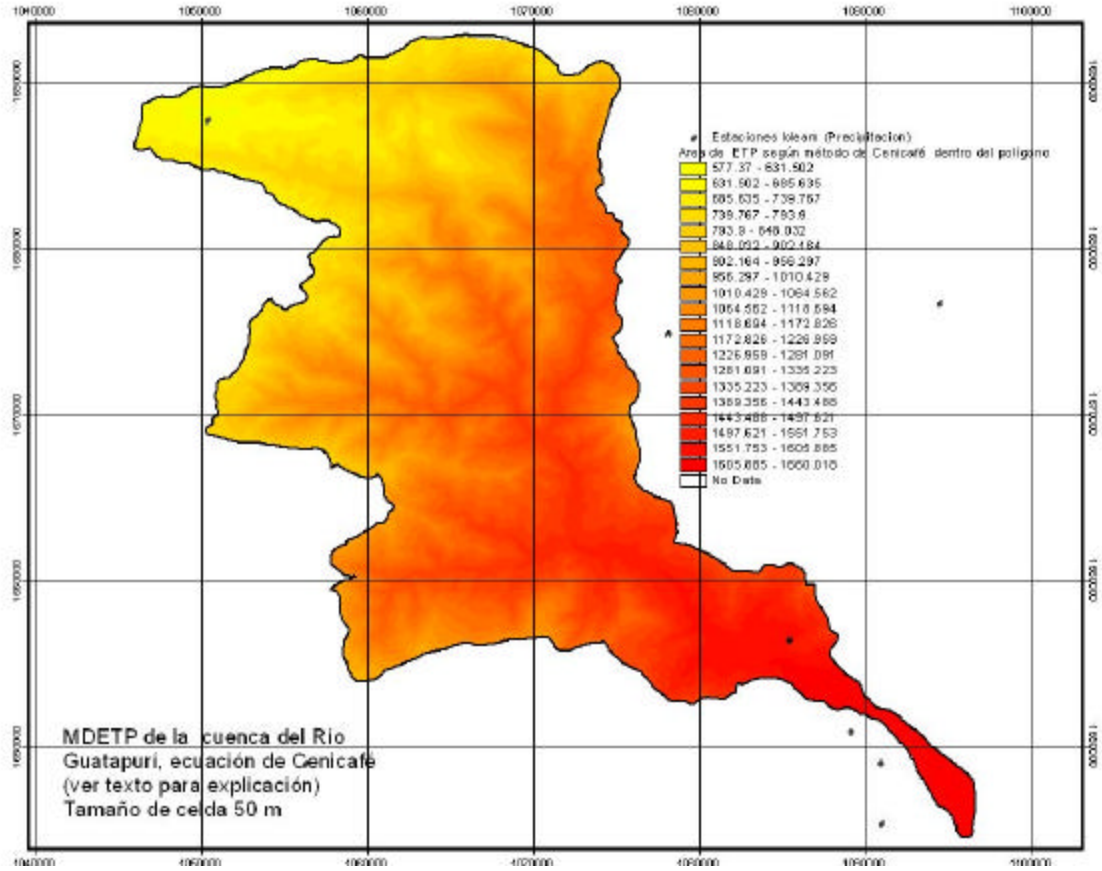
Método: KrigingLineal



Fuente: SIGPER

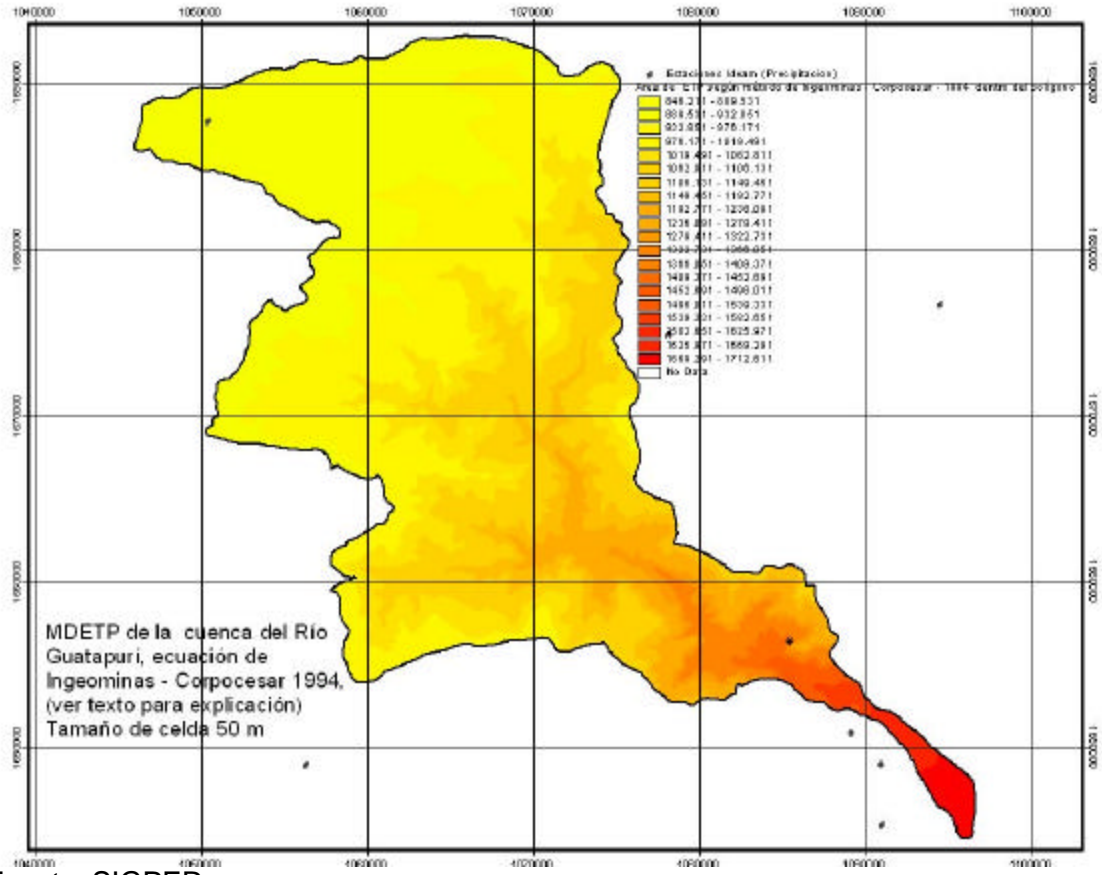
ANEXO B. MODELOS DIGITALES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Modelo digital de evapotranspiración Cenicafé



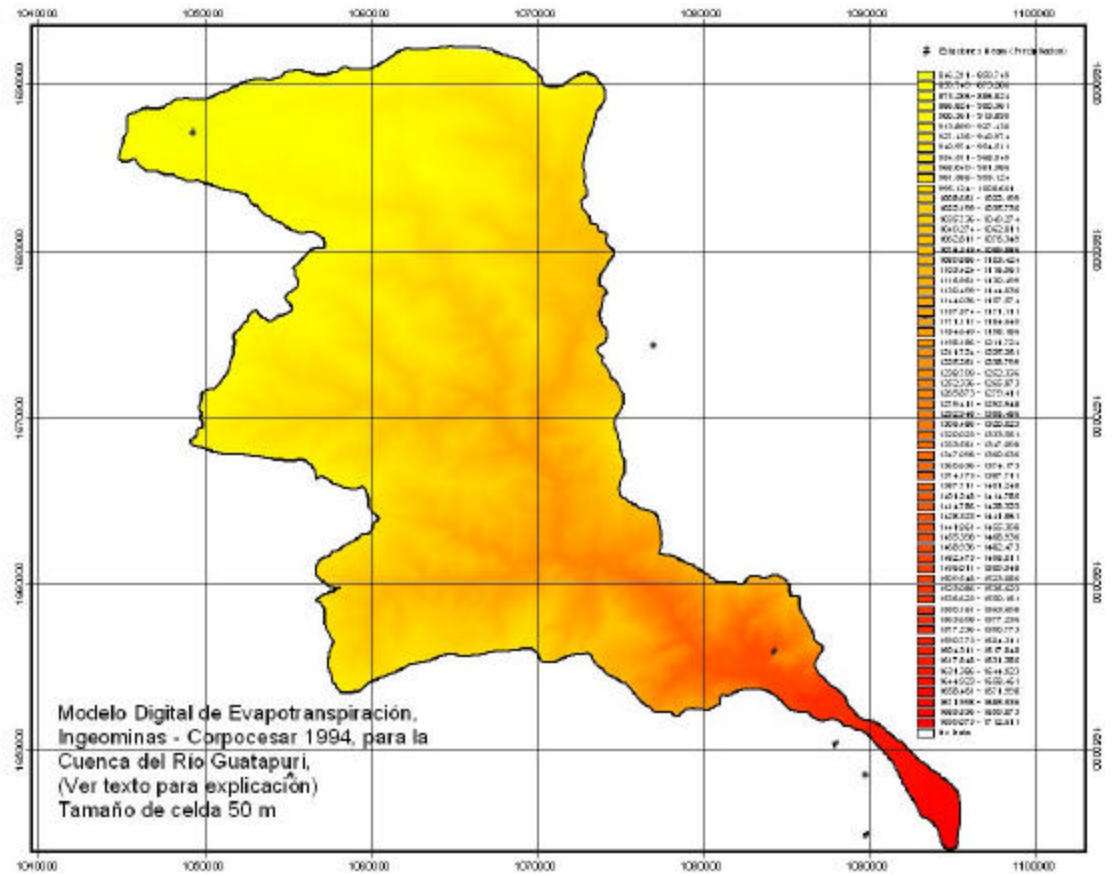
Fuente: SIGPER

Modelo digital de evapotranspiración Ingeominas – Corpocesar 1994



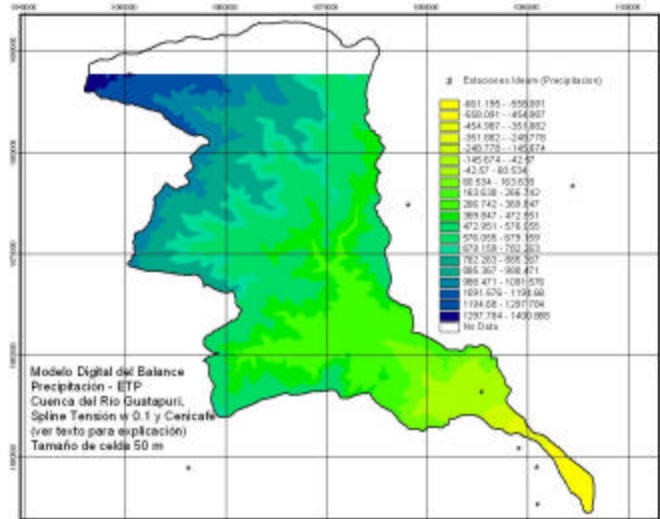
Fuente: SIGPER

Modelo digital de evapotranspiración Ingeominas – Corpopesar 1994 con mayor número de intervalos de clase



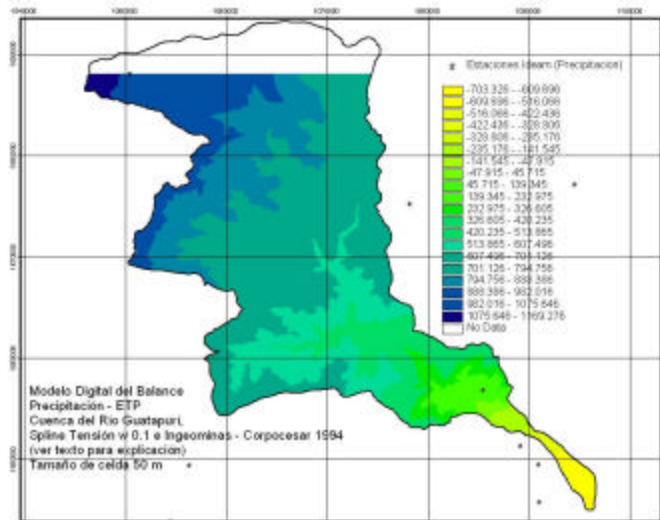
ANEXO C. MODELOS DIGITALES DE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL

MDP Spline Tension Peso 0.1 – MDETP Cenicafé



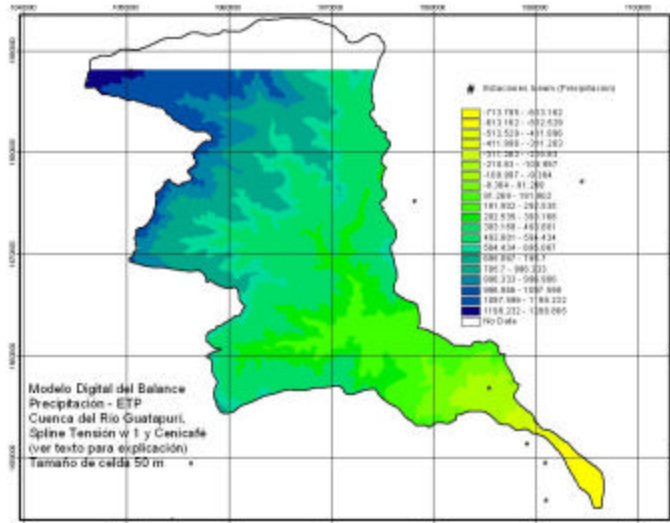
Fuente: SIGPER

MDP Spline Tension Peso 0.1 – MDETP Ingeominas Corpocesar 1994

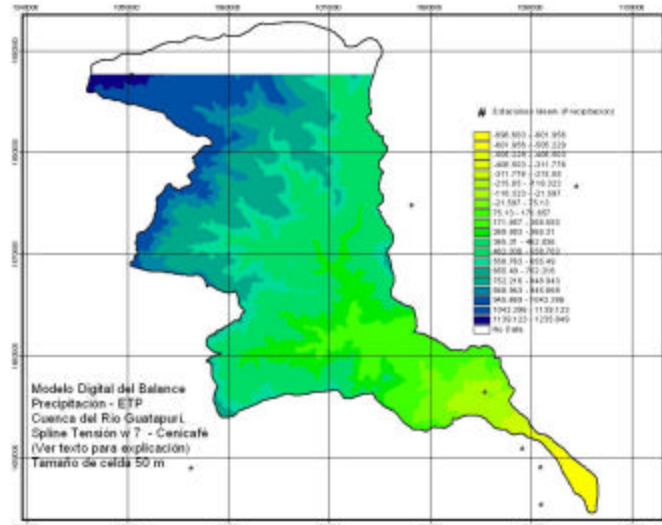


Fuente: SIGPER

MDP Spline Tension peso 1 – MDETP Cenicafé

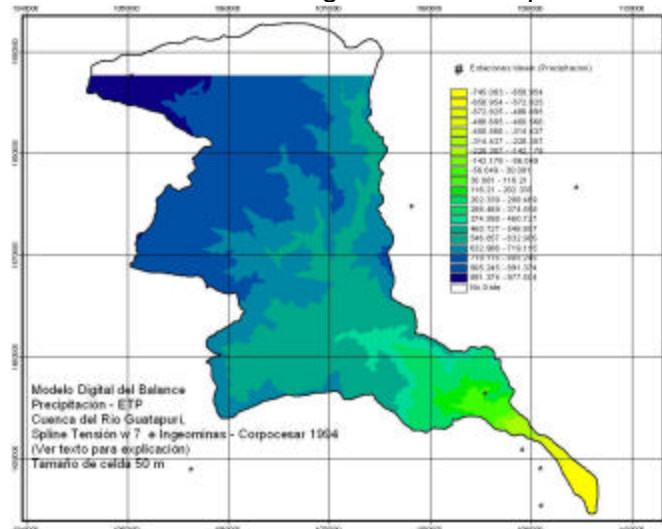


MDP Spline Tension Peso 7 – MDETP Cenicafé



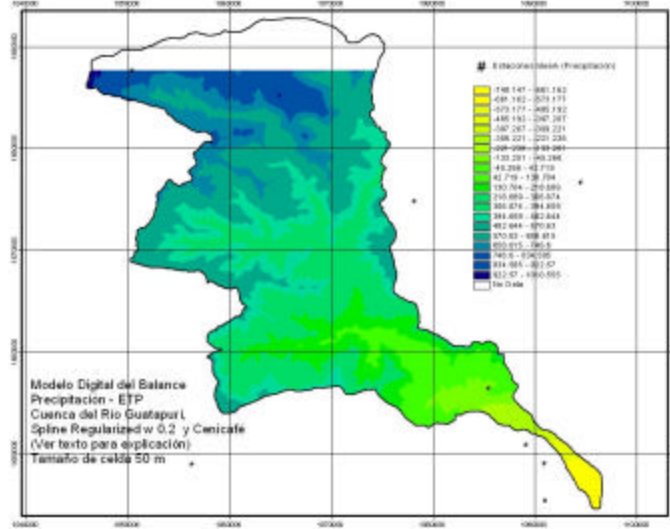
Fuente SIGPER

MDP Spline Tension Peso 7 – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



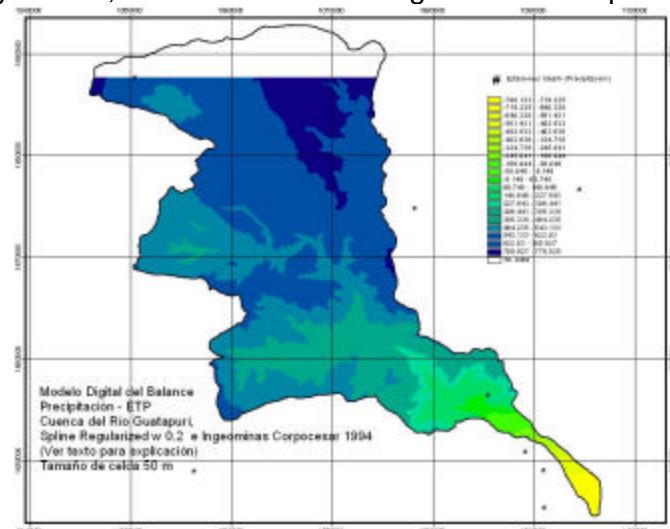
Fuente: SIGPER

MDP Spline Regularized, Peso 0.2 – MDETP Cenicafé



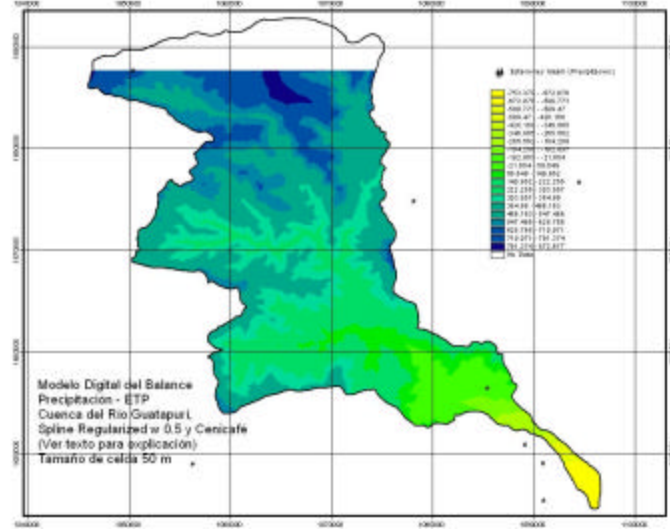
Fuebnte: SIGPER

MDP Spline Regularized, Peso 0.2 – MDETP Ingeominas - Corpocesar 1994



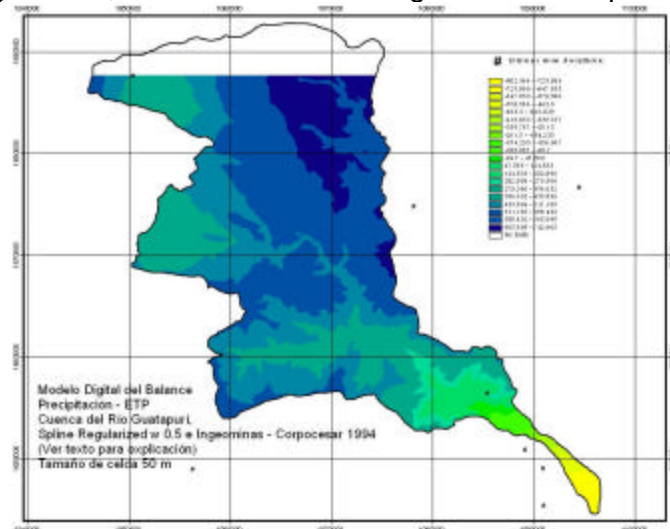
Fuente: SIGPER

MDP Spline Regularized, Peso 0.5 – MDETP Cenicafé



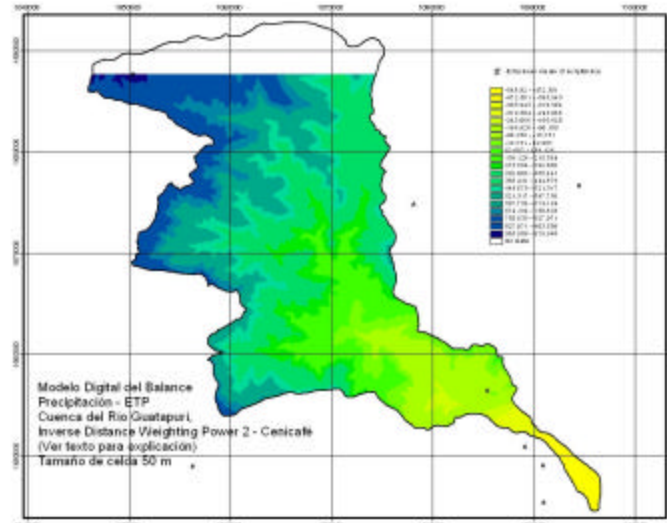
Fuente: SIGPER

MDP Spline Regularized, Peso 0.2 – MDETP Ingeominas - Corposesar 1994



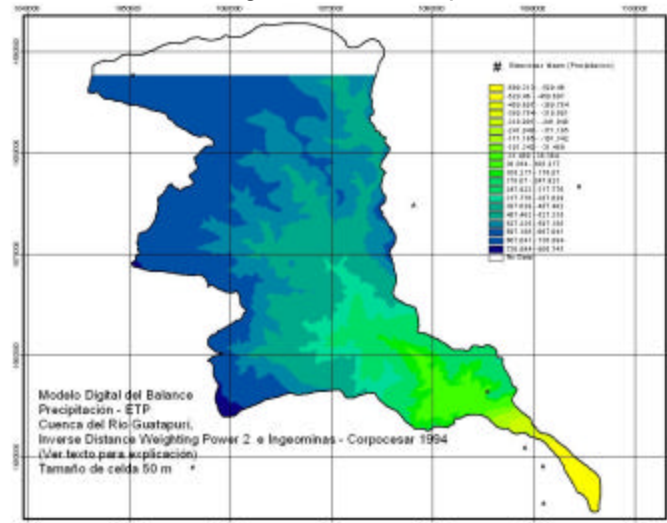
Fuente: SIGPER

MDP IDW, Potencia 2 – MDETP Cenicafé



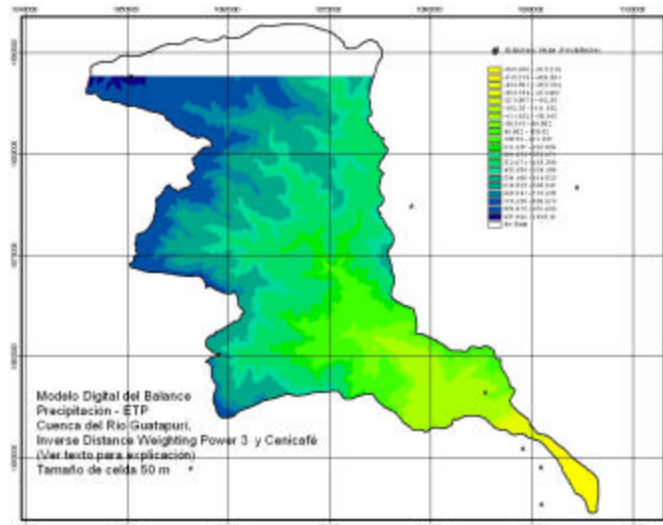
Fuente: SIGPER

MDP IDW, Potencia 2 – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



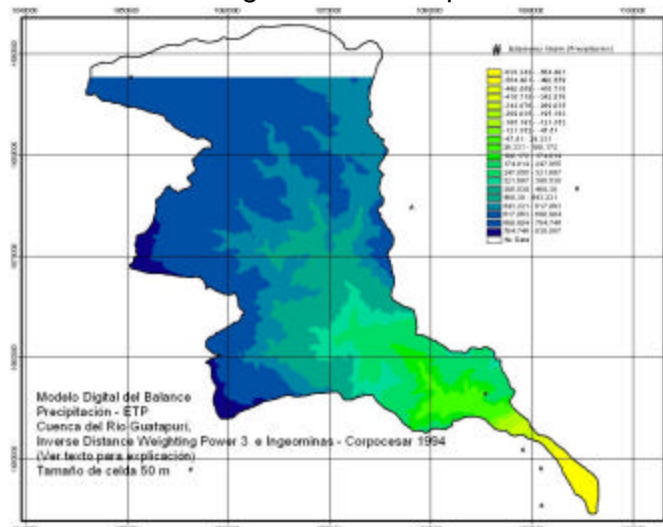
Fuente: SIGPER

MDP IDW, Potencia 3 – MDETP Cenicafé



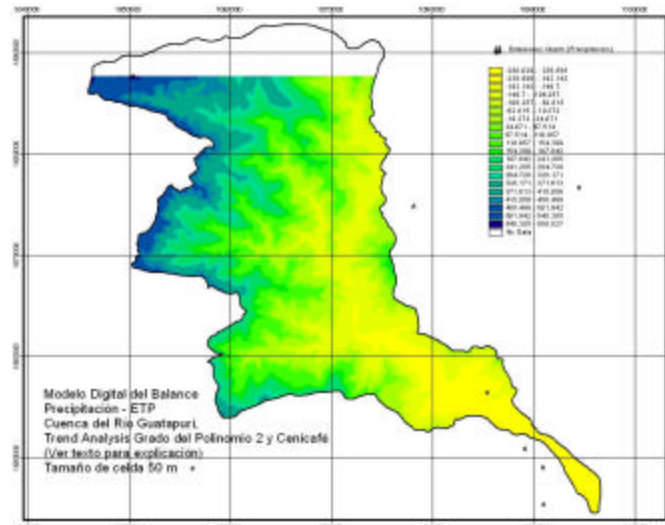
Fuente: SIGPER

MDP IDW, Potencia 2 – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



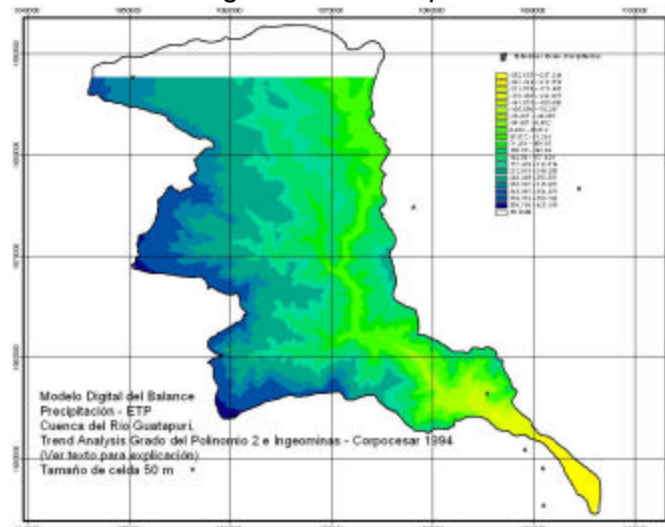
Fuente: SIGPER

MDP Trend Grado 2 – MDETP Cenicafé



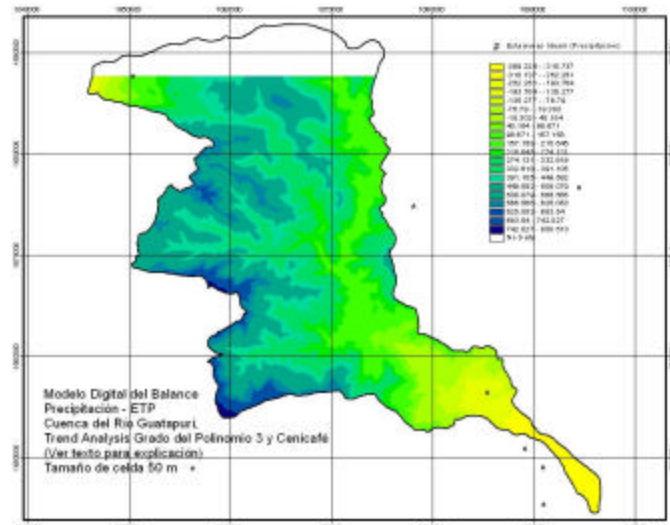
Fuente: SIGPER

MDP Trend Grado 2 – MDETP Ingeominas – Copocesar 1994



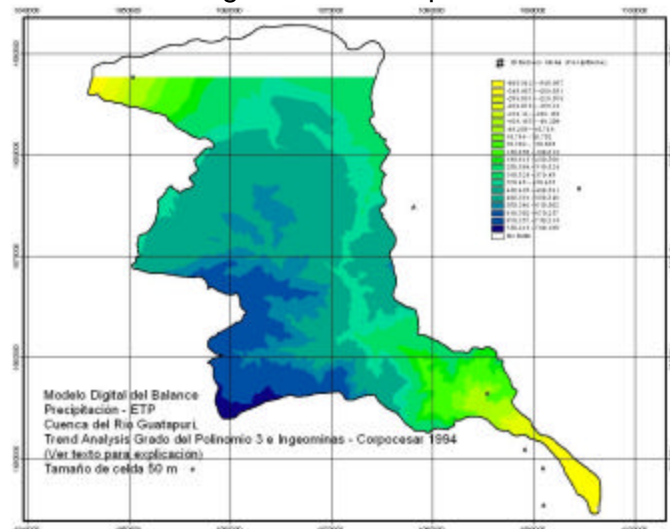
Fuente: SIGPER

MDP Trend Grado 3 – MDETP Cenicafé.



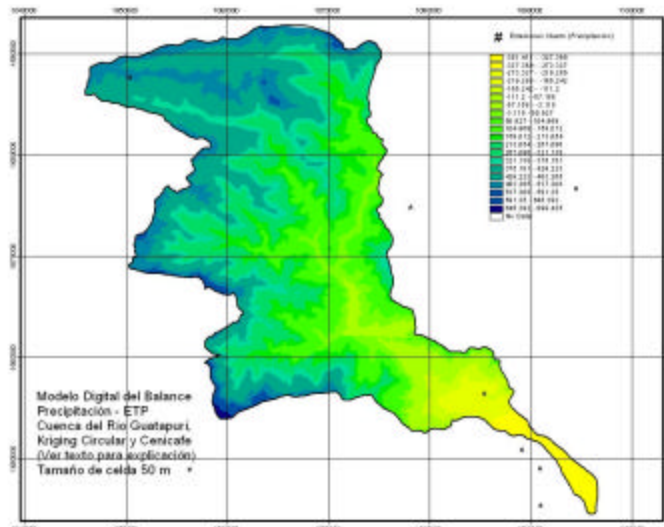
Fuente: SIGPER

MDP Trend Grado 3 – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



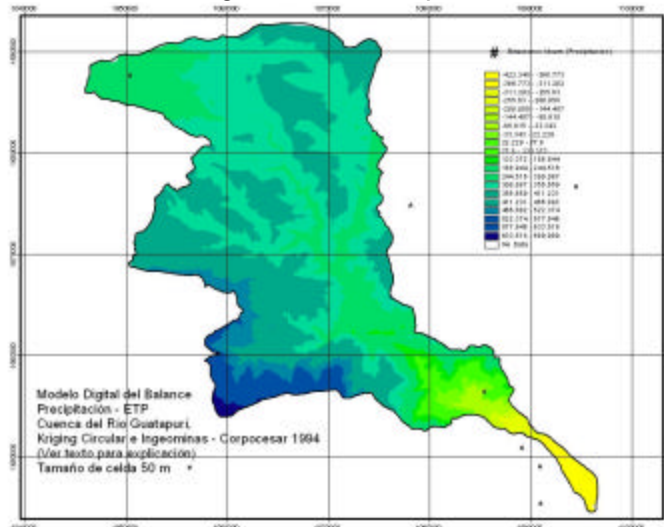
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Ciclar – MDETP Cenicafé



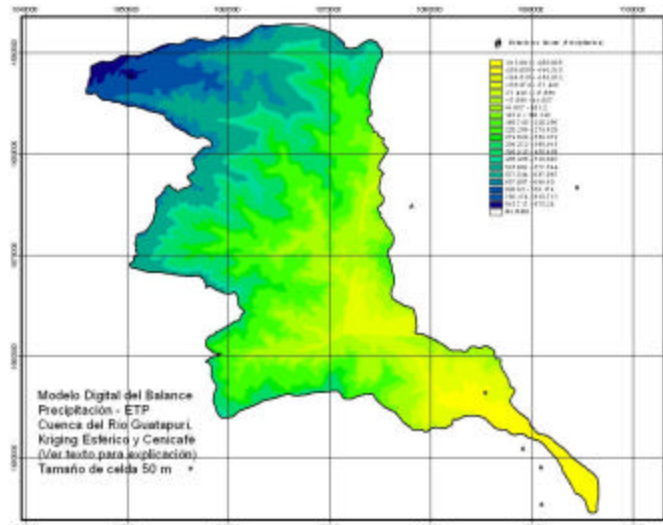
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Ciclar – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



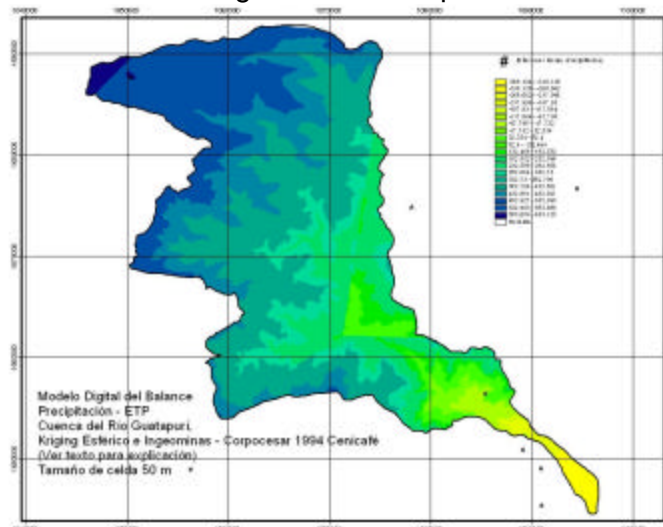
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Esférico – MDETP Cenicafe



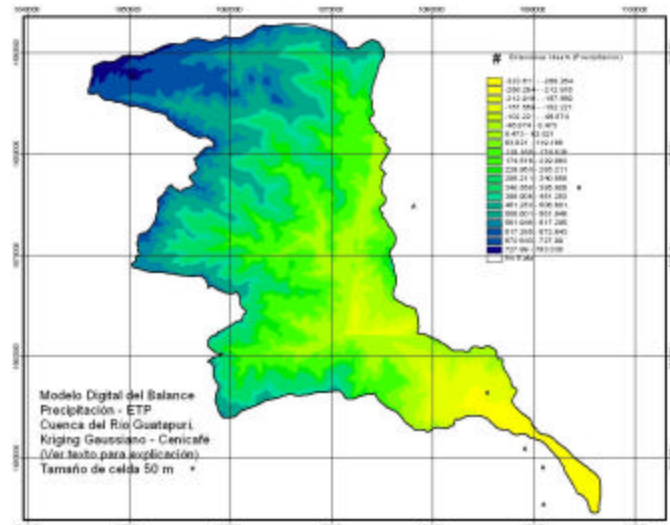
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Esférico – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994



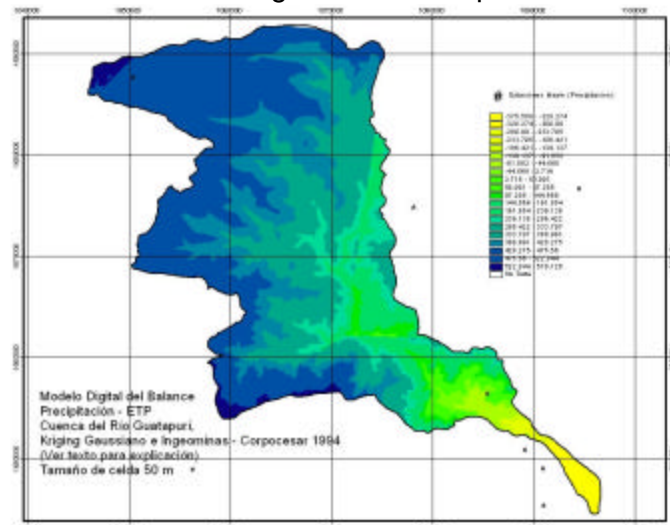
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Gaussiano – MDETP Cenicafé



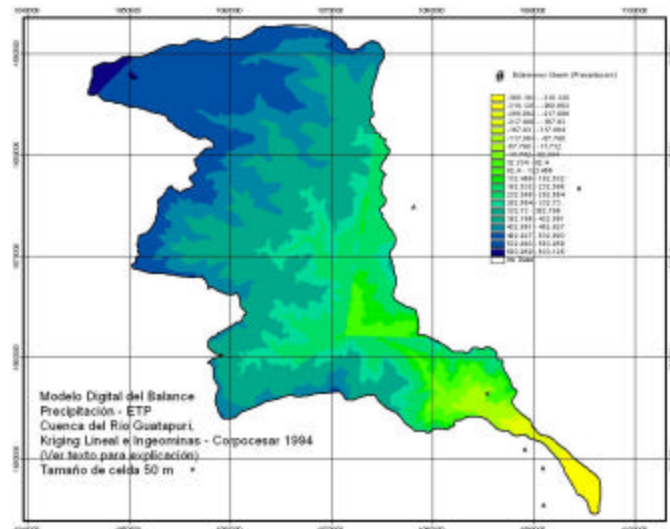
Fuente: SIGPER

MDP Kriging Gaussiano – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994

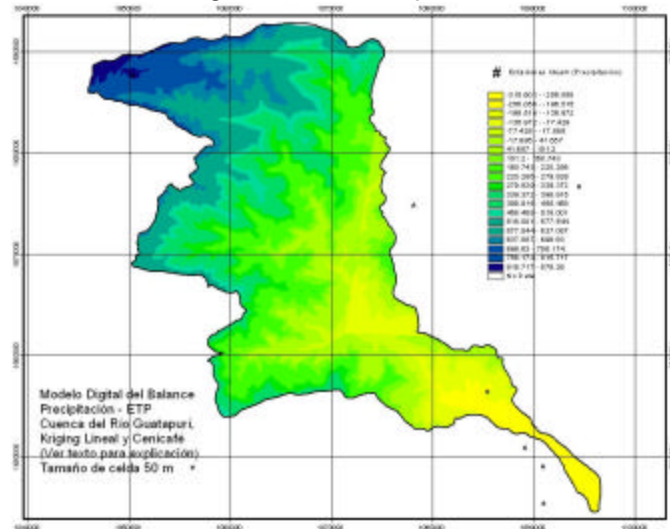


Fuente: SIGPER

MDP Kriging Lineal – MDETP Cenicafé



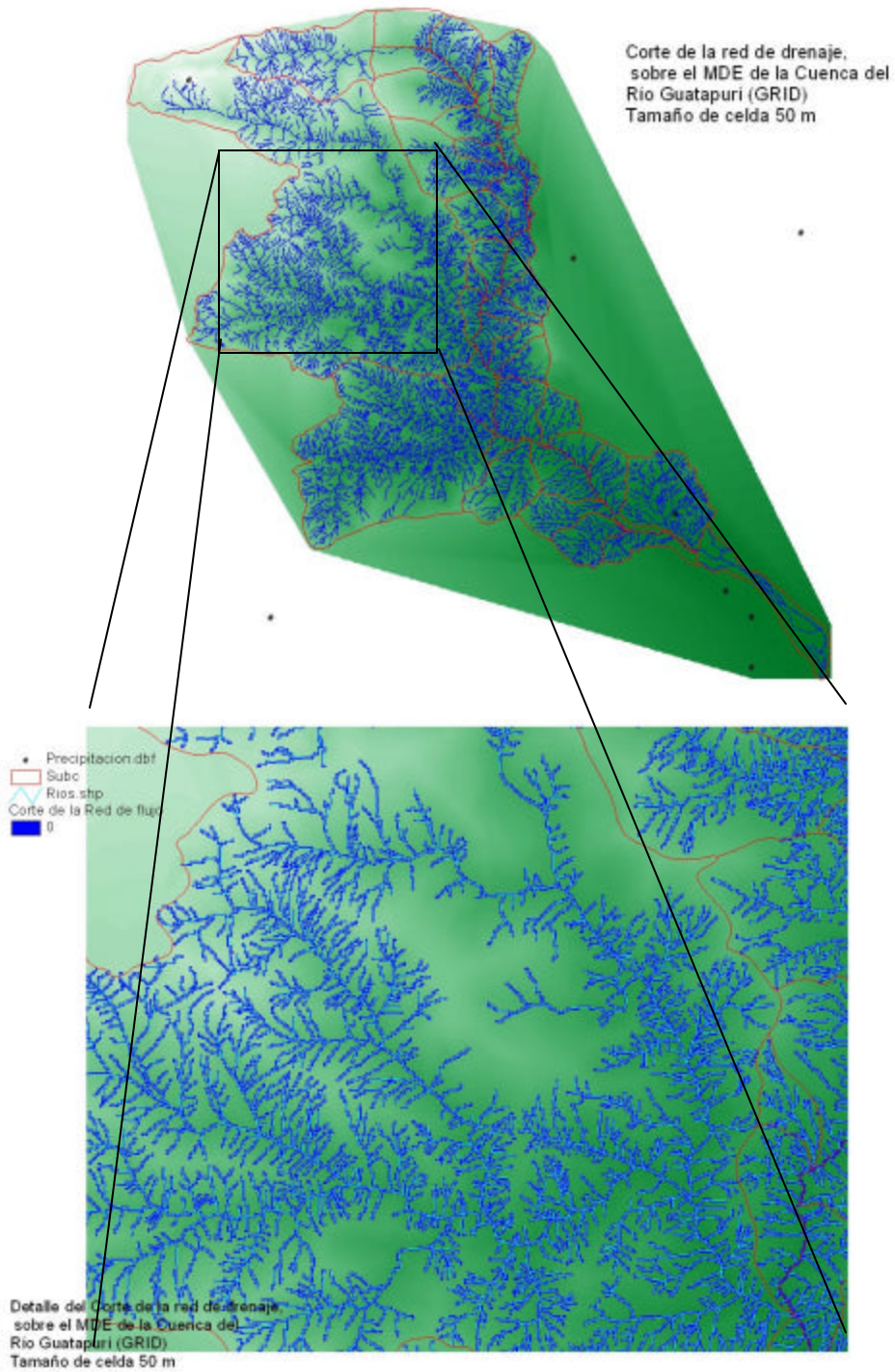
MDP Kriging Lineal – MDETP Ingeominas – Corpocesar 1994

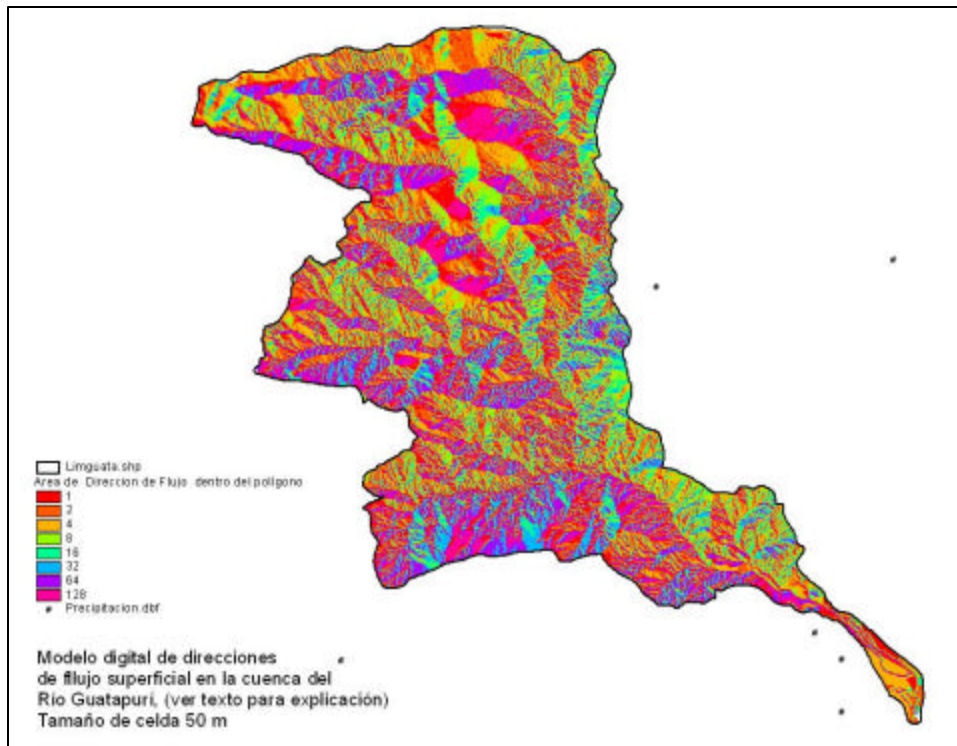


Fuente. SIGPER

ANEXO D. MODELOS DIGITALES DE LA HIDROGRAFÍA (RED DE DRENAJE)

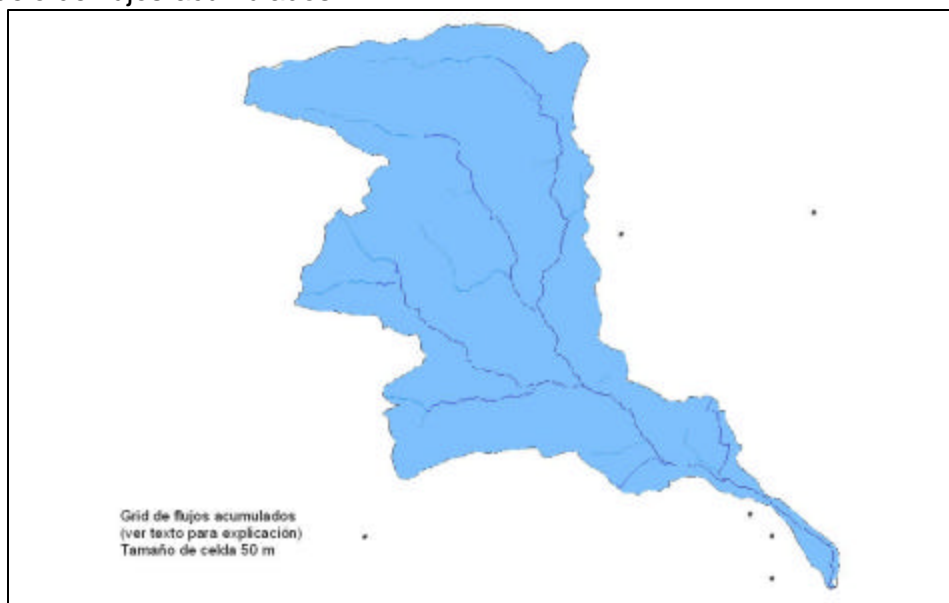
Detalle del Corte de la Red de Drenaje





Fuente: SIGPER

Modelo de flujos acumulados



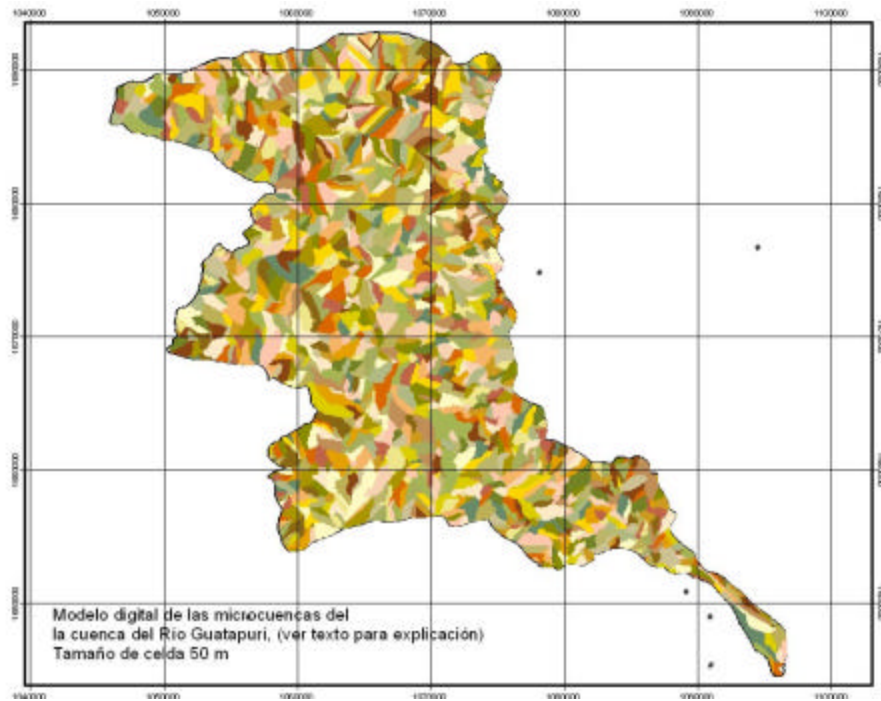
Fuente: SIGPER

Modelo de las corrientes generadas



Fuente: SIGPER

Modelo de microcuencas



Fuente: SIGPER

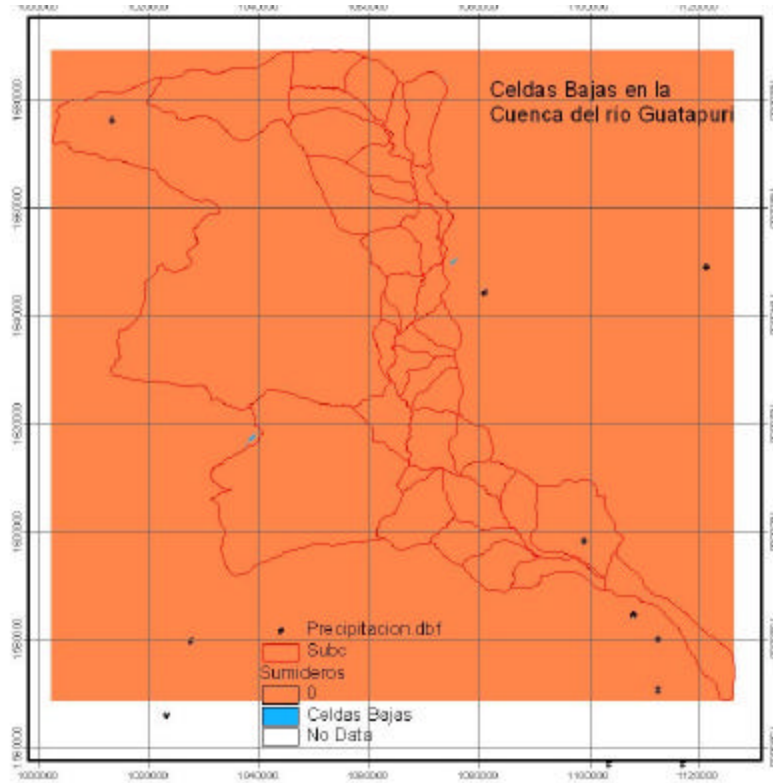
Modelo digital de la red de drenaje



Fuente: SIGPER

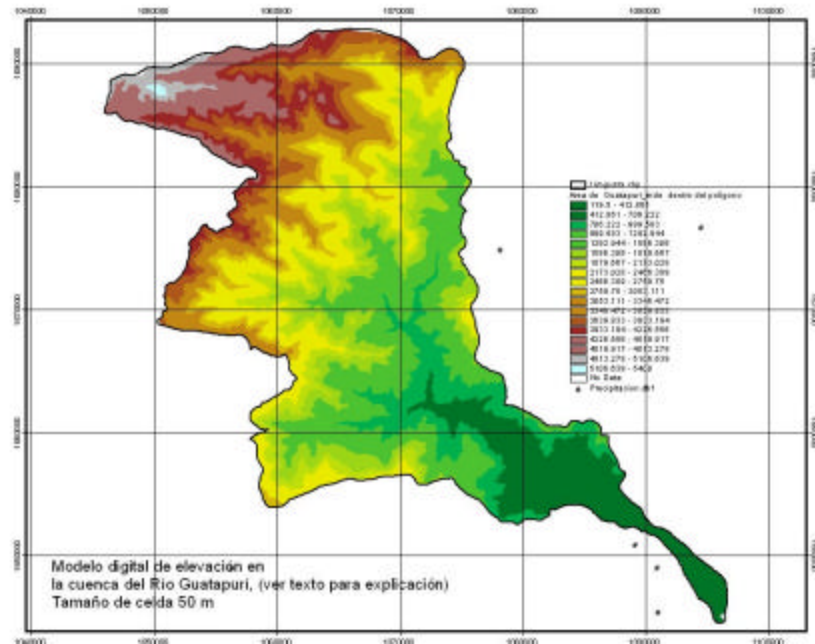
ANEXO E. MODELOS DIGITALES DE ELEVACION

Ubicación de celdas bajas



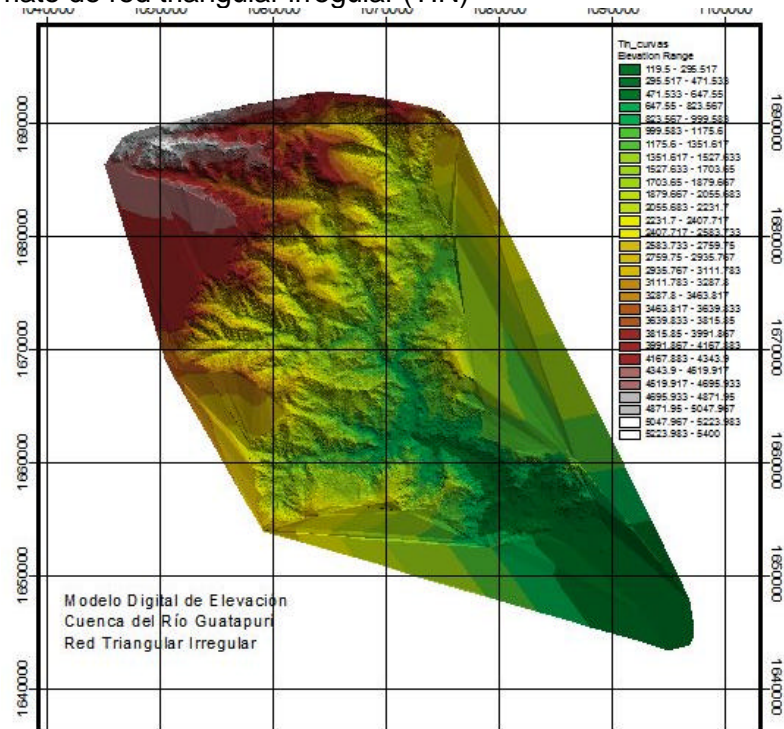
Fuente: SIGPER

MDE en formato de celdas (Grid)



Fuente: SIGPER

MDE en formato de red triangular irregular (TIN)



Fuente: SIGPER

ANEXO E. SCRIPTS EN LENGUAJE AVENUE PARA LA APLICACIÓN SIGPER

1. SCRIPT PARA EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN SPLINE

```
*****Este script crea los contornos o curvas de nivel a
*****partir de una lista de puntos Ventana = av.GetActiveDoc

Ventana = av.GetActiveDoc
temalist = Ventana.getthemes

Distancia = "Determinar distancia para la Interpolacion."

'Selecciona de una lista de puntos para determinar los contornos
if(Ventana.is(View).not)then
  MsgBox.Error("No hay activado una Ventana!", "Alerta!!!")
  return nil
else
  aProjeccion = Ventana.GetProjection
end

theThemeslist = Ventana.getthemes

'crea la lista para mostrar al usuario
temalist = list.make
for each tema in theThemeslist
  if(tema.canselect = true) then
    if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOINT)then
      temalist.add(tema)
    end
  end
end

if(temalist = nil)then
  MsgBox.Error ("En el proyecto no se encuentran un shape de puntos", "")
  exit
end

'Guarda el tema seleccionada por el usuario
Estacion = MsgBox.Choiceasstring(temalist, "Por favor seleccione el tema que
contiene los puntos de interpolación", "Seleccione un Tema")
if(Estacion = NIL) then exit end
Punts = estacion.GetFtab.GetNumRecords
Rectang = Estacion.ReturnExtent

YesNo = MsgBox.YesNo ("Desea ingresar un tamaño de celda en unidades de
mapa para el proceso de Interpolación: YES o Desa seleccionar"+NL+
```

```

        "un tema raster del Proyecto: NO",Distancia,True)

if (YesNo = True) then
    estado = True
    while(estado)
        cell = MsgBox.Input("Entre el tamaño de celda en unidades de mapa"++
            "para la Interpolación.",distancia,"25")

        if(cell = Nil)then
            return Nil
        elseif(cell.IsNumber)then
            estado = False
        else
            estado = True
            MsgBox.Warning("El valor debe ser numérico",distancia)
        end
    end
    cellsize = cell.AsNumber
else
    'seleccionar un tema Grid
    GridList = List.Make
    for each atema in theThemeslist
        if(atema.GetClass.GetClassName = "Gtheme")then
            Gridlist.add(atema)
        end
    end
    Temagrid = MsgBox.ChoiceAsString(GridList,"Por favor seleccione un tema
raster" ++
        "para extraer la distancia a interpolar",distancia)
    if(Temagrid = Nil) then Exit end
    Valorgrid = Temagrid.GetGrid
    cellsize = Valorgrid.GetCellSize
    'Rectang = ValorGrid.GetExtent
end

'construye una lista de campos de la tabla de puntos
anFtab = Estacion.GetFtab
'construye una lista de campos de la tabla de puntos
campos={}
for each f in anFtab.GetFields
    'if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber or f.IsTypeString))then
    if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber))then
        campos.add(f)
    end
end
end

'chequea si en verdad existe campos en la ftab.
'count retorna un numero de elementos de una lista

```

```

if (campos.count = 0)then
  MsgBox.Warning ("no existe campos en el tema seleccionado de puntos",distancia)
  return NIL
end

```

```

'obtiene el campo de anFtab(Tabla para construir la interpolacion

```

```

Valores = MsgBox.MultiListAsString(campos,"Seleccione los campos de" ++
  Estacion.GetName ++
  "que contiene los datos a interpolar","Proceso de Interpolación")

```

```

if(Valores = NIL)then
  return NIL
end

```

```

'Procedimiento para cortarlo el area a la cuenca

```

```

temashp = list.make
for each tema in theThemeslist
  if(tema.canselect = true) then
    if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOLY)then
      temashp.add(tema)
    end
  end
end
end

```

```

limite = MsgBox.Choiceasstring(temashp,"Seleccione el limite del área para el"+NL+
  "proceso de interpolacion",Distancia)
if (limite = Nil) then exit end

```

```

for each campus in Valores

```

```

'Generacion del tema interpolado

```

```

*****Paso Opcional
'thecellsize = 100
'interpolaList = InterpolationDialog.Show(Estacion,thecellsize)

```

```

'Rutina para determina si el usuario selecciones todas las opciones
'del del dialogo de interpolacion

```

```

  'if (interpolaList.Count < 2) then
  '  return NIL
  'end
'****Objeto Interpolacion Spline*****

```

```

  Metodo = Interp.MakeSpline(#Spline_Regularized,0.5,10)

```

```

****Realizar cambios aqui*****

GridInterpolado =
Grid.MakeByInterpolation(anFtab,aProjeccion,campus,Metodo,{cellsize,rectang})

'Opcional para que se determine el limite de la cuenca como un poligono
'GridOut = GridInterpolado.ExtractByPolygon(limite,aProjeccion,True)

*****Este parte de Avenue es del sistema ArcView para generar los
cortes*****
'Consigue la extension (area) como un rectangulo
thePolyThmExtent = limite.getselectedextent
if (thePolyThmExtent.IsEmpty) then thePolyThmExtent = limite.ReturnExtent end
'Consigue parametros para un nuevo Grid
theFtab = limite.GetFTab
'del grid interpolado****
theCell = GridInterpolado.GetCellSize
theExtent = GridInterpolado.GetExtent
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSENV_VALUE, thePolyThmExtent)
ae.SetCellSize(#ANALYSENV_VALUE, theCell)
ae.Activate
'la extracion actual ocurre aqui
tempGrid = Grid.MakeFromFtab(theFtab,aProjeccion,nil,{theCell,theExtent})
newGrid = (tempGrid.IsNull).Con (tempGrid, GridInterpolado)
newGridint = newGrid.float
'Resetea el analisis "environment" de las parametros de entrada
aRect = Nil
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSENV_MAXOF, aRect)
ae.SetCellSize(#ANALYSENV_MAXOF, aRect)
*****Hasta Aqui proceso de cortar la cuenca

! *****

' Chequea errores en el GRID
if(newGridint.HasError)then
  MsgBox.Warning("El nuevo raster generado tiene errores",distancia)
  return false
end
' Save the data set
aFN=FN.Merge(av.GetProject.GetWorkDir.AsString,Campus.GetName.AsString)
if(aFN=nil)then
  MsgBox.Warning("Problemas con el nombre del tema",distancia)
  return false
else
  newGridint.Rename(aFN)
end
*****

```

```
theGTheme = Gtheme.Make(newGridint)
' check if output is ok
if (GridInterpolado.HasError) then return NIL end
if (newGrid.HasError) then return NIL end

theGtheme.SetName("Spline")
theGtheme.SetActive (True)
theGtheme.SetVisible (True)

' add theme to the view
ventana.AddTheme(theGTheme)

end
```

2. SCRIPT PARA EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN IDW

*****Este script crea los contornos o curvas de nivel a
*****partir de una lista de puntos.

```
Ventana = av.GetActiveDoc  
temalist = Ventana.getthemes
```

```
Distancia = "Determinar distacia para la Interpolacion."
```

```
'Selecciona de una lista de puntos para determinar los contornos  
if(Ventana.is(View).not)then  
  MsgBox.Error("No hay activado una Ventana!","Alerta!!!")  
  return nil  
else  
  aProjeccion = Ventana.GetProjection  
end
```

```
theThemeslist = Ventana.getthemes
```

```
'crea la lista para mostrar al usuario
```

```
temalist = list.make  
for each tema in theThemeslist  
  if(tema.canselect = true) then  
    if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOINT)then  
      temalist.add(tema)  
    end  
  end  
end
```

```
if(temalist = nil)then  
  MsgBox.Error ("En el proyecto no se encuentran un shape de puntos","")  
  exit  
end
```

```
'Guarda el tema seleccionada por el usuario
```

```
Estacion = MsgBox.Choiceasstring(temalist,"Por favor seleccione el tema de puntos  
para la interpolación","Seleccione un Tema")  
if(Estacion = NIL) then exit end  
Punts = estacion.GetFtab.GetNumRecords  
Rectang = Estacion.ReturnExtent
```

```
YesNo = MsgBox.YesNo ("Desea ingresar un tamaño de celda en unidades de  
mapa para el proceso de Interpolación: YES o Desea seleccionar"+NL+  
"un tema raster del Proyecto: NO",Distancia,True)
```

```
if (YesNo = True) then  
  estado = True  
  while(estado)  
    cell = MsgBox.Input("Entre el tamaño de celda en unidades de mapa"++
```

```

        "para la Interpolación.", distancia, "25")

    if(cell = Nil)then
        return Nil
    elseif(cell.IsNumber)then
        estado = False
    else
        estado = True
        MsgBox.Warning("El valor debe ser numerico", distancia)
    end
end
cellsize = cell.AsNumber
else
    'seleccionar un tema Grid
    GridList = List.Make
    for each atema in theThemeslist
        if(atema.GetClass.GetClassName = "Gtheme")then
            Gridlist.add(atema)
        end
    end
end

    Temagrid = MsgBox.ChoiceAsString(GridList, "Por favor seleccione un tema
raster"++)
        "para extraer la distancia a interpolar", distancia)
    if(Temagrid = Nil) then Exit end
    Valorgrid = Temagrid.GetGrid
    cellsize = Valorgrid.GetCellSize
    'Rectang = ValorGrid.GetExtent
end

'construye una lista de campos de la tabla de puntos
anFtab = Estacion.GetFtab
'construye una lista de campos de la tabla de puntos
campos={}
for each f in anFtab.GetFields
    'if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber or f.IsTypeString))then
    if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber))then
        campos.add(f)
    end
end
end

'cheque si en verdad existe campos en la ftab.
'count retorna un numero de elementos de una lista

if (campos.count = 0)then
    MsgBox.Warning ("no existe campos en el tema seleccionado de puntos", distancia)
    return NIL
end
end

```

```

'obtiene el campo de anFtab(Tabla para construir la interpolacion

Valores = MsgBox.MultiListAsString(campos,"Seleccione los campos de" ++
Estacion.GetName ++
    "que contiene los datos a interpolar", "Proceso de Interpolación")

    if(Valores = NIL)then
        return NIL
    end

'Procedimiento para cortarlo el area a la cuenca
temashp = list.make
for each tema in theThemeslist
    if(tema.canselect = true) then
        if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOLY)then
            temashp.add(tema)
        end
    end
end

limite = MsgBox.Choiceasstring(temashp,"Seleccione el limite del área para el"+NL+
    "proceso de interpolacion",Distancia)
    if (limite = Nil) then exit end

for each campus in Valores

'Generacion del tema interpolado

*****Paso Opcional
'thecellsize = 100
'interpolaList = InterpolationDialog.Show(Estacion,thecellsize)

'Rutina para determina si el usuario selecciones todas las opciones
'del del dialogo de interpolacion

    'if (interpolaList.Count < 2) then
        '    return NIL
    'end
*****Objeto Interpolacion Spline*****

    Metodo = Interp.MakeIDW(3,NIL,NIL)

*****Realizar cambios aquí*****

GridInterpolado =
Grid.MakeByInterpolation(anFtab,aProjeccion,campus,Metodo,{cellsize,rectang})

```

```

'Opcional para se determine el limite de la cuenca como un poligono
'GridOut = GridInterpolado.ExtractByPolygon(limite,aProjeccion,True)

'*****Este parte de Avenue es del sistema ArcView para generar los
cortes*****
'Consigue la extension (area) como un rectangulo
thePolyThmExtent = limite.getselectedextent
if (thePolyThmExtent.IsEmpty) then thePolyThmExtent = limite.ReturnExtent end
'Consigue parametros para un nuevo Grid
theFtab = limite.GetFTab
'del grid interpolado****
theCell = GridInterpolado.GetCellSize
theExtent = GridInterpolado.GetExtent
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSISENV_VALUE, thePolyThmExtent)
ae.SetCellSize(#ANALYSISENV_VALUE, theCell)
ae.Activate
'la extracion actual ocurre aqui
tempGrid = Grid.MakeFromFtab(theFtab,aProjeccion,nil,{theCell,theExtent})
newGrid = (tempGrid.IsNull).Con (tempGrid, GridInterpolado)
newGridint = newGrid.float
'Resetea el analisis "environment" de las parametros de entrada
aRect = Nil
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSISENV_MAXOF, aRect)
ae.SetCellSize(#ANALYSISENV_MAXOF, aRect)
'*****Hasta Aqui proceso de cortar la cuenca

! *****

' Chequea errores en el GRID
if(newGridint.HasError)then
  MsgBox.Warning("El nuevo raster generado tiene errores",distancia)
  return false
end
' Save the data set
aFN=FN.Merge(av.GetProject.GetWorkDir.AsString,Campus.GetName.AsString)
if(aFN=nil)then
  MsgBox.Warning("Problemas con el nombre del tema",distancia)
  return false
else
  newGridint.Rename(aFN)
end
'*****

theGTheme = Gtheme.Make(newGridint)
' check if output is ok
if (GridInterpolado.HasError) then return NIL end
if (newGrid.HasError) then return NIL end

```

```
theGtheme.SetName("IDW")
theGtheme.SetActive (True)
theGtheme.SetVisible (True)

' add theme to the view
ventana.AddTheme(theGTheme)
```

```
end
```

3. SCRIPT PARA EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN TREND ANALYSIS (POLINOMIOS DE GRADO SUPERIOR)

```
*****Este script crea los contornos o curvas de nivel a
*****partir de una lista de puntos.
Ventana = av.GetActiveDoc
temalist = Ventana.getthemes

Distancia = "Determinar distacia para la Interpolacion."

'Selecciona de una lista de puntos para determinar los contornos
if(Ventana.is(View).not)then
  MsgBox.Error("No hay activado una Ventana!", "Alerta!!!")
  return nil
else
  aProjeccion = Ventana.GetProjection
end

theThemeslist = Ventana.getthemes

'crea la lista para mostrar al usuario
temalist = list.make
for each tema in theThemeslist
  if(tema.canselect = true) then
    if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOINT)then
      temalist.add(tema)
    end
  end
end

if(temalist = nil)then
  MsgBox.Error ("En el proyecto no se encuentran un shape de puntos","")
  exit
end

'Guarda el tema seleccionada por el usuario
Estacion = MsgBox.Choiceasstring(temalist, "Por favor seleccione el tema de puntos
para la interpolación", "Seleccione un Tema")
if(Estacion = NIL) then exit end
Punts = estacion.GetFtab.GetNumRecords
Rectang = Estacion.ReturnExtent

YesNo = MsgBox.YesNo ("Desea ingresar un tamaño de celda en unidades de
mapa para el proceso de Interpolación: YES o Desa seleccionar"+NL+
"un tema raster del Proyecto: NO",Distancia,True)

if (YesNo = True) then
  estado = True
```

```

while(estado)
  cell = MsgBox.Input("Entre el tamaño de celda en unidades de mapa"++
    "para la Interpolación.",distancia,"25")

  if(cell = Nil)then
    return Nil
  elseif(cell.IsNumber)then
    estado = False
  else
    estado = True
    MsgBox.Warning("El valor debe ser numérico",distancia)
  end
end
cellsize = cell.AsNumber
else
  'seleccionar un tema Grid
  GridList = List.Make
  for each atema in theThemeslist
    if(atema.GetClass.GetClassName = "Gtheme")then
      Gridlist.add(atema)
    end
  end
end

  Temagrid = MsgBox.ChoiceAsString(GridList,"Por favor seleccione un tema
raster"++
  "para extraer la distancia a interpolar",distancia)
  if(Temagrid = Nil) then Exit end
  Valorgrid = Temagrid.GetGrid
  cellsize = Valorgrid.GetCellSize
  'Rectang = ValorGrid.GetExtent
end

'construye una lista de campos de la tabla de puntos
anFtab = Estacion.GetFtab
'construye una lista de campos de la tabla de puntos
campos={}
for each f in anFtab.GetFields
  'if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber or f.IsTypeString))then
  if (f.IsVisible and (f.IsTypeNumber))then
    campos.add(f)
  end
end
end

'cheque si en verdad existe campos en la ftab.
'count retorna un numero de elementos de una lista

if (campos.count = 0)then
  MsgBox.Warning ("no existe campos en el tema seleccionado de puntos",distancia)
  return NIL

```

```

end

'obtiene el campo de anFtab(Tabla para construir la interpolacion

Valores = MsgBox.MultiListAsString(campos,"Seleccione los campos de" ++
Estacion.GetName ++
    "que contiene los datos a interpolar", "Proceso de Interpolación")

    if(Valores = NIL)then
        return NIL
    end

'Procedimiento para cortarlo el area a la cuenca
temashp = list.make
for each tema in theThemeslist
    if(tema.canselect = true) then
        if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOLY)then
            temashp.add(tema)
        end
    end
end

limite = MsgBox.Choiceasstring(temashp,"Seleccione el limite del área para el"+NL+
    "proceso de interpolacion",Distancia)
    if (limite = Nil) then exit end

for each campus in Valores

'Generacion del tema interpolado

*****Paso Opcional
'thecellsize = 100
'interpolaList = InterpolationDialog.Show(Estacion,thecellsize)

'Rutina para determina si el usuario selecciones todas las opciones
'del del dialogo de interpolacion

    'if (interpolaList.Count < 2) then
    '    return NIL
    'end
*****Objeto Interpolacion Spline*****

    Metodo=Interp.MakeTrend (2,False)

****Realizar cambios aqui*****

```

```

GridInterpolado =
Grid.MakeByInterpolation(anFtab,aProjeccion,campus,Metodo,{cellsize,rectang})

'Opcional para se determine el limite de la cuenca como un poligono
'GridOut = GridInterpolado.ExtractByPolygon(limite,aProjeccion,True)

'*****Este parte de Avenue es del sistema ArcView para generar los
cortes*****
'Consigue la extension (area) como un rectangulo
thePolyThmExtent = limite.getselectedextent
if (thePolyThmExtent.IsEmpty) then thePolyThmExtent = limite.ReturnExtent end
'Consigue parametros para un nuevo Grid
theFtab = limite.GetFTab
'del grid interpolado****
theCell = GridInterpolado.GetCellSize
theExtent = GridInterpolado.GetExtent
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSENV_VALUE, thePolyThmExtent)
ae.SetCellSize(#ANALYSENV_VALUE, theCell)
ae.Activate
'la extracion actual ocurre aqui
tempGrid = Grid.MakeFromFtab(theFtab,aProjeccion,nil,{theCell,theExtent})
newGrid = (tempGrid.IsNull).Con (tempGrid, GridInterpolado)
newGridint = newGrid.float
'Resetea el analisis "environment" de las parametros de entrada
aRect = Nil
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSENV_MAXOF, aRect)
ae.SetCellSize(#ANALYSENV_MAXOF, aRect)
'*****Hasta Aqui proceso de cortar la cuenca

' *****
' Chequea errores en el GRID
if(newGridint.HasError)then
  MsgBox.Warning("El nuevo raster generado tiene errores",distancia)
  return false
end
' Save the data set
aFN=FN.Merge(av.GetProject.GetWorkDir.AsString,Campus.GetName.AsString)
if(aFN=nil)then
  MsgBox.Warning("Problemas con el nombre del tema",distancia)
  return false
else
  newGridint.Rename(aFN)
end
'*****

theGTheme = Gtheme.Make(newGridint)
' check if output is ok

```

```
if (GridInterpolado.HasError) then return NIL end  
if (newGrid.HasError) then return NIL end
```

```
theGtheme.SetName("Trend")  
theGtheme.SetActive (True)  
theGtheme.SetVisible (True)
```

```
' add theme to the view  
ventana.AddTheme(theGTheme)
```

```
end
```

4. SCRIPT PARA EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING

'Name: MB.View.SpatialKriging

'Filename: MB_View_SpatialKriging.ave

'Title: interpolates values using the kriging method

'Created by:

,

'Marco Boeringa

'Gemeentewaterleidingen Amsterdam (Amsterdam Water Supply)

'Vogelenzangseweg 21

'2114 BA Vogelenzang

'the Netherlands

'poect8@gw.amsterdam.nl

,

'Datum: 3-3-'98

'Description:

,

'This Script allows the user to interpolate a point or multipoint theme using the kriging method.

'All options have been implemented: For ordinary kriging the spherical, circular, exponential, gaussian and

'linear methods for modelling the semivariance are available. For universal kriging both options (linear and

'quadratic drift) have been implemented.

'If the user has made a selection on his dataset, the user will have the following options:

'- use the selected records for interpolation

'- use all records for interpolation

'- use the selected records for estimating the semivariogram (ordinary kriging only)

'- use all records for estimating the semivariogram (ordinary kriging only)

'The options for interpolation and estimating the semivariogram are disjunct, meaning you can choose to

'interpolate using the entire dataset, but only use a subset (selected set) of your data for estimating

'the semivariogram. Also the other way around: use the entire dataset for estimating the semivariogram,

'but only a subset for interpolation. So there is maximum flexibility. Depending on the user choices,

'the selection will be temporarily removed during execution of the script and restored after calculations.

'If ordinary kriging is chosen, one or more user selected methods are used to calculate the corresponding

'semivariograms. After the calculations have finished, all semivariograms are displayed on a layout for inspection.

'Optionally, the user can print this layout or export the variogram data to a dBASE, INFO or text file for

'inspection in another program like Excel. When inspection has finished, the user again selects

'one or more models for interpolating the point theme.

'If universal kriging is chosen, no semivariograms will be calculated and displayed, because this is not possible using universal kriging. Instead these steps will be skipped and after selecting the drift type, radius and barrier, the interpolated surface will be created. A barrier theme and radius (fixed or variable) can be set for both ordinary and universal kriging and optionally a variance grid is calculated. The interpolated grid and variance theme(s) are added to the active view.

'Part of: VIEW DOC GUI, menu

'Needs: Spatial analyst extension loaded and a point or multipoint theme as the active theme

'Update script: Spatial.SurfaceUpdate

'Self:

'Results:

```
theProject = av.GetProject
theWorkDir = theProject.GetWorkDir
theWorkDir.SetCWD
```

```
theView = av.GetActiveDoc
```

```
theT = "Kriging"
```

```
'Make sure that the map units of the current view are set
```

```
if (theView.GetUnits = #UNITS_LINEAR_UNKNOWN)
```

```
  then
```

```
    MsgBox.Error("No map units set for the current view." + NL +
```

```
      "Map units must be set before calculating a semivariogram" + NL +
```

```
      "Set map units first and try again", theT)
```

```
  return Nil
```

```
end
```

```
theActiveThs = theView.GetActiveThemes
```

```
'Check if there are any active themes in the view
```

```
if ((theActiveThs = Nil) Or (theActiveThs.Count = 0))
```

```
  then
```

```
    MsgBox.Error("There is no active theme in the current view...", theT)
```

```
  return Nil
```

```
end
```

```
'Get the first active theme
```

```
theActiveTh = theActiveThs.Get(0)
```

```
'Check if theme is of correct type
```

```
if (theActiveTh.Is(FTHEME).Not)
```

```
  then
```

```

    MsgBox.Error("The active theme" ++ theActiveTh.GetName ++ "is not a feature
theme." + NL +
                "Can not analyse data...", theT)
    return Nil
end

'Check if theme is of correct type
theThTab = theActiveTh.GetFTab

if (theThTab.HasError)
    then
        MsgBox.Error("Could not create feature table", theT)
        return Nil
    end

theShapeF = theThTab.FindField("Shape")
theValue = theThTab.ReturnValue(theShapeF, 0)
if ((theValue.GetDimension = 0).Not)
    then
        MsgBox.Error("The first active theme is not a point theme!" + NL +
                    "Need a point or multi point theme for interpolation.", theT)
        return Nil
    end

'Initialise fieldlist for temporarily storing all fields
theTempFieldList = theThTab.GetFields

'Remove shapefield, area and perimeter fields from list
theFieldList = {}
for each theField in theTempFieldList
    if (((theField.GetName = "Shape") Or (theField.GetName = "Area") Or
(theField.GetName = "Perimeter")).Not)
        And ((theField.IsTypeNumber) Or (theField.IsTypeString))
        then
            theFieldList.Add(theField)
        end
    end
end

'Check if any fields have been added to list
if ((theFieldList.Count = 0) or (theFieldList.Count = Nil))
    then
        MsgBox.Error("There are no appropriate fields in theme.", theT)
        return Nil
    end

'Give opportunity for selecting the field containing the z values
zField = MsgBox.Choice(theFieldList, "Choose the field containing the Z-values.",
theT)

```

```

'Check if a field has been chosen, if not, give second chance
if (zField = Nil)
  then
    theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen a field from the list, continue?",
theT, TRUE)
    if (theContinue.Not)
      then
        return Nil
      end
    'Give second chance to chose a field
    zField = MsgBox.Choice(theFieldList,"Choose the field containing the Z-values.",
theT)
    if (zField = Nil)
      then
        MsgBox.Error("You haven't chosen a field from the list" + NL + NL + "Bailing...",
theT)
        return Nil
      end
    end
end

```

```

theSelOption1 = TRUE
theSelOption1.SetName("Use selected records")
theSelOption2 = FALSE
theSelOption2.SetName("Use all records")

```

```

theSelOptions = {theSelOption1, theSelOption2}

```

```

if (theThTab.GetNumSelRecords > 0)
  then

```

```

    theThHasSelection = TRUE
    theUseSelection = MsgBox.Choice(theSelOptions, "The point theme contains a
selection." + NL + "Choose option for INTERPOLATION:", theT)

```

```

    'Check if an option has been chosen, if not, give second chance
    if (theUseSelection = Nil)
      then
        theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen an option from the list,
continue?", theT, TRUE)
        if (theContinue.Not)
          then
            return Nil
          end
        'Give second chance to chose a field
        theUseSelection = MsgBox.Choice(theSelOptions,"Choose option for
INTERPOLATION:", theT)
        if (theUseSelection = Nil)
          then

```

```

    MsgBox.Error("You haven't chosen an option from the list" + NL + NL +
"Bailing...", theT)
    return Nil
end
end

else
theThHasSelection = FALSE

end

'Store current selection for later use
theSaveBitMap = theThTab.GetSelection.Clone

'Ask user whether to use a barrier theme to control kriging calculations
theYesUseBarrier = MsgBox.YesNo("Use a line theme as barrier theme?" + NL +
"Note: using barriers significantly" + NL +
"extends processing time", theT, FALSE)

if (theYesUseBarrier)
then

'Get all feature themes
theFThemes = {}
for each theTheme in theView.GetThemes
if (theTheme.Is(FTHEME)) then
theFThemes.Add(theTheme)
end
end

'Select the line themes from the list of feature themes
theLineThemes = {}
for each theTheme in theFThemes
theFTab = theTheme.GetFTab
theShapeF = theFTab.FindField("Shape")
theValue = theFTab.ReturnValue(theShapeF, 0)
if (theValue.GetDimension = 1)
then
theFTab.SetName(theTheme.GetName)
theLineThemes.Add(theFTab)
end
end

if ((theLineThemes <> Nil) And (theLineThemes.Count > 0))
then

theBarrier = MsgBox.Choice(theLineThemes, "Choose barrier theme:", theT)
if (theBarrier = Nil)
then

```

```

    MsgBox.Error("You haven't chosen a barrier theme." + NL + NL + "Bailing...",
theT)
    return Nil
end

else
    MsgBox.Info("No line themes in the current view" + NL +
        "Barrier option set to: No Barriers", theT)
    theBarrier = Nil
end

else
    theBarrier = Nil

end

'Ask user whether to use ordinary kriging or universal kriging
theOrd = "Ord"
theOrd.SetName("Ordinary kriging")
theUni = "Uni"
theUni.SetName("Universal kriging")
theTypes = {theOrd, theUni}

theType = MsgBox.Choice(theTypes, "Choose kriging type:", theT)
if (theType = Nil)
    then
        MsgBox.Error("You haven't chosen a type for kriging" + NL + NL + "Bailing...", theT)
        return Nil
    end

if (theType = "Ord")
    then

        enum1 = #KRIGING_SPHERICAL
        enum1.SetName("Spherical")

        enum2 = #KRIGING_CIRCULAR
        enum2.SetName("Circular")

        enum3 = #KRIGING_EXPONENTIAL
        enum3.SetName("Exponential")

        enum4 = #KRIGING_GAUSSIAN
        enum4.SetName("Gaussian")

        enum5 = #KRIGING_LINEAR
        enum5.SetName("Linear with sill")

        theEnumList = {enum1, enum2, enum3, enum4, enum5}

```

```

    theChoiceList = MsgBox.MultiList (theEnumList, "Choose model(s) for creating
semivariogram", theT)

    'Check if user selected any value
    if ((theChoiceList = Nil) Or (theChoiceList.Count = 0))
        then
            theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen any value from the list,
continue?", theT, TRUE)
            if (theContinue.Not)
                then
                    return Nil
                end
            'Give second chance to make a selection
            theChoiceList = MsgBox.MultiList (theEnumList, "Choose model(s) for creating
semivariogram", theT)
            if ((theChoiceList = Nil) Or (theChoiceList.Count = 0))
                then
                    MsgBox.Error("You haven't chosen any value from the List" + NL + NL +
"Bailing...", theT)
                    return Nil
                end
            end
        end

    'Ask whether the user wants to use all records, or only the selection of records for
estimating the
'semivariogram
    if (theThHasSelection)
        then
            theUseSelForSVG = MsgBox.Choice(theSelOptions.DeepClone, "The point
theme contains a selection." + NL + "Choose option for ESTIMATING
SEMIVARIOGRAM:", theT)

            'Check if an option has been chosen, if not, give second chance
            if (theUseSelForSVG = Nil)
                then
                    theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen an option from the list,
continue?", theT, TRUE)
                    if (theContinue.Not)
                        then
                            return Nil
                        end
                    'Give second chance to chose a field
                    theUseSelForSVG = MsgBox.Choice(theSelOptions.DeepClone, "Choose
option for ESTIMATING SEMIVARIOGRAM:", theT)
                    if (theUseSelForSVG = Nil)
                        then
                            MsgBox.Error("You haven't chosen an option from the list" + NL + NL +
"Bailing...", theT)

```

```

        return Nil
    end
end

end

if (theThHasSelection)
    then
        if (theUseSelForSVG.Not)
            then
                theThTab.GetSelection.ClearAll
                theThTab.UpdateSelection
                theView.GetDisplay.Flush
            end
        end
    end

'Ask user an interval(lag) for creating the semivariogram
theIntCh = MsgBox.Input("Enter an interval (lag) for calculating" + NL +
                        "the semivariogram in" ++ theView.GetUnits.AsString, theT, "1")

'Check if user chose anything
if (theIntCh = Nil)
    then
        MsgBox.Error("You haven't entered anything, bailing...", theT)
        return Nil

    elseif (theIntCh.IsNumber.Not)
        then
            MsgBox.Error("You haven't entered a numeric value, bailing...", theT)
            return Nil

        elseif (theIntCh.AsNumber <= 0)
            then
                MsgBox.Error("Value must be bigger than 0, bailing...", theT)
                return Nil

            else
                theInterval = theIntCh.AsNumber
            end
        end

'Create a layout to display all semivariograms and set properties of the layout
theLayout = Layout.Make
theLayout.SetName("Semivariogram of" ++ theActiveTh.GetName)

'Get display and margins of layout for later use
thePageDisp = theLayout.GetDisplay
theMarginRect = thePageDisp.ReturnMarginExtent
theMarginOrigin = theMarginRect.ReturnOrigin
theMarginWidth = theMarginRect.GetWidth

```

```

theMarginHeight = theMarginRect.GetHeight

'Create rectangle for first semivariogram
theOrigin = Point.Make(theMarginOrigin.GetX + 0.75, theMarginOrigin.GetY +
8.75)
theSize = Point.Make(2.75, 2)
theExt = Rect.Make(theOrigin, theSize)

'Add rectangle of first semivariogram to layout
theGLList = theLayout.GetGraphics
theGrapRect = GraphicShape.Make(theExt)
theGLList.Add(theGrapRect)

'Check if semivariogram table already exists, if so, remove table doc
theTableDocs = theProject.GetDocsWithGUI(theProject.FindGUI("Table"))
for each theTableDoc in theTableDocs
  if (theTableDoc.GetVtab.GetBaseTableFileName <> Nil)
  then
    if (theTableDoc.GetVtab.GetBaseTableFileName.GetBaseName =
"svgram1.svg")
      then
        theProject.RemoveDoc(theTableDoc)
      end
    end
  end
end

'Get projection of view for creating semivariogram and grid
thePrj = theView.GetProjection

'Create info dir object and check if already an info file exists containing
semivariogram data
theInfoDir = INFODir.Make((theWorkDir.GetFullName + "\info").AsFileName)

'Check if info directory did exist, if so empty svgram1.svg file if necessary
if ((theInfoDir = Nil).Not)
  then

'If semivariogram file exists and it contains data from a former session, delete
data first
theFList = theInfoDir.GetFiles
for each theFile in theFList
  if(theFile.GetBaseName = "svgram1.svg")
  then
    theInfoTab = VTab.Make (theFile, TRUE, FALSE)
    'Check if table has records
    if ((theInfoTab.GetNumRecords = Nil) Or (theInfoTab.GetNumRecords = 0))
    then
      else
        'Check if table is editable

```

```

    if (theInfoTab.IsEditable)
    then
    'Remove all data from info file
    theBitmap = theInfoTab.GetSelection
    theBitmap.SetAll
    theInfoTab.UpdateSelection
    theInfoTab.RemoveRecords(theBitmap)
    end
end

    if (theInfoTab.IsEditable)
    then
    theInfoTab.SetEditable(FALSE)
    end

end
end

else

    'Create an empty info directory for storage of the semivariogram info file.
    Because it
    'is, to my knowledge, not possible to create an empty info file straight from
    Avenue, first
    'create a temporary grid dataset, and delete this dataset afterwards, leaving the
    empty info
    'directory behind
    theTempGrid = Grid.MakeFromFTab(theThTab, thePrj, Nil, {1, Rect.Make(0@0,
1@1)})
    theTempGrid.Rename("Temp".AsFileName)
    if (Grid.DeleteDataSet("Temp".AsFileName).Not)
    then
    MsgBox.Error("Could not delete temporary dataset", theT)
    return Nil
    end

    'Create info dir object
    theInfoDir = INFODir.Make((theWorkDir.GetFullName + "\info").AsFileName)

end

'Initialise counter for the no. of models drawn
theModelCount = 1

thePenList = av.GetSymbolWin.GetPalette.GetList(#PALETTE_LIST_PEN)

'Initiliasse list for storing all parameters needed to create a semivariogram,
'except the model to use.
theSVMMakeParameters = {theThTab,thePrj,zField,theInterval}

```

```

'For each model chosen, create semivariogram and graph on layout
theFirstTime = TRUE
for each theModel in theChoiceList
  theSVGram = SVGram.Make(theThTab,thePrj,zField,theModel,theInterval)

  if(theFirstTime)
    then
      theGList = theLayout.GetGraphics
      theExt = Rect.Make(theOrigin, theSize)
      theFirstTime = FALSE

    else
      theRemainder = (theModelCount / 2).Round - (theModelCount / 2)
      if ((theRemainder = 0) Or (theRemainder = Nil))
        then
          theOrigin = ((theOrigin.GetX - 3.75)@(theOrigin.GetY - 2.75))
        else
          theOrigin = ((theOrigin.GetX + 3.75)@(theOrigin.GetY))
        end
      theModelCount = theModelCount + 1
      theExt = Rect.Make(theOrigin, theSize)

    end

  theGrapRect = GraphicShape.Make(theExt)
  theGList.Add(theGrapRect)

  'Get bounds and size of rectangle / graph for later use
  theExtMinX = theExt.GetLeft
  theExtMinY = theExt.GetBottom
  theExtMaxX = theExt.GetRight
  theExtMaxY = theExt.GetTop
  theExtOrigin = theExt.ReturnOrigin
  theExtHeight = theExt.GetHeight
  theExtWidth = theExt.GetWidth
  sp = Point.Make(theExt.GetLeft, theExt.GetTop + 0.15)

  'Add a title stating which model has been used to create semivariogram
  theTitle = theModel.GetName
  theGTitle = GraphicText.Make(theTitle, sp)
  theGTitle.GetSymbol.GetFont.SetStyle("Bold")
  theGTitle.GetSymbol.SetSize(12)
  theGList.Add(theGTitle)

  'Get the Actual values for the variance from the semivariogram file
  theSVtab = theSVGram.GetVTab
  theBitMap = theSVtab.GetSelection
  theMethodF = theSVtab.FindField("Method")

```

```

theTypeF = theSVtab.FindField("Type")
theDistanceF = theSVtab.FindField("Distance")
theSemiVarF = theSVtab.FindField("Semivariance")

if (theModel = #KRIGING_SPHERICAL)
  then
  theMethod = 1
  elseif (theModel = #KRIGING_CIRCULAR)
  then
  theMethod = 2
  elseif (theModel = #KRIGING_EXPONENTIAL)
  then
  theMethod = 3
  elseif (theModel = #KRIGING_GAUSSIAN)
  then
  theMethod = 4
  elseif (theModel = #KRIGING_LINEAR)
  then
  theMethod = 5
end

theQuery = "([Method] = " + theMethod.AsString + ") And ([Type] = " +
34.AsChar + "ACTUAL" + 34.AsChar + ")"
theSVtab.Query (theQuery, theBitMap, #VTAB_SELTYPE_NEW)
theSVtab.UpdateSelection

'Initialise lists for storing distances and semivariances
theADXList = {}
theAZList = {}
theFDXList = {}
theFZList = {}

'Add zero the actual list because these are not part of the semivariogram file
theADXList.Add(0)
theAZList.Add(0)

for each rec in theBitMap
  theActDistX = theSVtab.ReturnValue(theDistanceF, rec)
  theActualZ = theSVtab.ReturnValue(theSemiVarF, rec)
  theADXList.Add(theActDistX)
  theAZList.Add(theActualZ)
  theAZList.SetName("ActualZ")
end

theQuery = "([Method] = " + theMethod.AsString + ") And ([Type] = " +
34.AsChar + "FITTED" + 34.AsChar + ")"
theSVtab.Query (theQuery, theBitMap, #VTAB_SELTYPE_NEW)
theSVtab.UpdateSelection

```

```

for each rec in theBitMap
  theFitDistX = theSVtab.ReturnValue(theDistanceF, rec)
  theFittedZ = theSVtab.ReturnValue(theSemiVarF, rec)
  theFDXList.Add(theFitDistX)
  theFZList.Add(theFittedZ)
  theFZList.SetName("FittedZ")
end

theDistances = {theADXList, theFDXList}
theZvalues = {theAZList, theFZList}

theStoreList = {} 'a list of lists of Z-values

firstZ = true

for each theZVals in theZvalues
  'Determine the min and max z values for the semivariogram
  tmpList = theZvals.Clone
  tmpList.Sort(true)
  if (firstZ) then
    minZ = tmpList.Get(0)
    maxZ = tmpList.Get(tmpList.Count - 1)
    firstZ = false
  else
    tmpMin = tmpList.Get(0)
    tmpmax = tmpList.Get(tmpList.Count - 1)
    minZ = tmpMin Min minZ
    maxZ = tmpMax Max maxZ
  end

  'Add theZvals to a list-object
  theStoreList.Add(theZvals)
end

csListLine = {}

'Create actual and fitted graph - lines
for each theZvals in theStoreList

  ' initialize the xz point coordinate list
  xzListLine = {}

  ' create a line to represent the trend in the variance
  xzListLine.Add(theExtOrigin)

  if (theZvals.GetName = "ActualZ")
    then
      theDist = theDistances.Get(0)
    else

```

```

    theDist = theDistances.Get(1)
end

for each index in 0..(theZvals.Count - 1)
    x = theExtMinX + ((theDist.Get(index) / theDist.Get(theDist.Count - 1)) *
theExtWidth)
    z = theZvals.Get(index)
    xzListLine.Add(Point.Make(x,z))
end

' store the name of the theme as the name of the list

'Set Name by using name of zvals object
xzListLine.SetName(theZvals.GetName)

' add this x-z data to the semivariogram list
csListLine.Add(xzListLine)
end

' determine the scale factor for drawing the z values as y coordinates
theZRange = maxZ - minZ
sf = theExtHeight / theZRange

' create each of the semivariogram - graphics
csNum = 0
for each cs in csListLine
    theGList.UnselectAll

    ' scale the z values to fit into the semivariogram
    pntList = {}
    pntList.Add(cs.Get(0))
    zVal = cs.Get(1).GetY
    for each pnt in 1..(cs.Count-1)
        x = cs.Get(pnt).GetX
        z = cs.Get(pnt).GetY
        y = theExtMinY + ((z - minZ) * sf)
        zVal = z Max zVal
        pntList.Add(Point.Make(x, y))
    end
    theSemivar = PolyLine.Make({pntList})
    theGSemivar = GraphicShape.Make(theSemivar)
    if (cs.GetName = "ActualZ")
        then
            theGSemivar.GetSymbol.SetColor(Color.GetRed)
        end
        theGSemivar.GetSymbol.SetSize(0.5)
        theGList.Add(theGSemivar)
        csNum = csNum + 1
    end
end

```

```

' add a scale for the z values to the left hand side of the semivariogram
theGLList.UnSelectAll
theYstep = theZRange / 5
x0 = theExtMinX - 0.07
x1 = theExtMinX
textX = theExtMinX - 0.4
for each y in 0..5
  theZval = minZ + (y * theYstep)

  ' create the tick mark
  y1 = theExtMinY + ((y * theYstep) * sf)
  theLine = Line.Make(Point.Make(x0, y1), Point.Make(x1, y1))
  theGLLine = GraphicShape.Make(theLine)
  theGLLine.SetSelected(true)
  theGLList.Add(theGLLine)

  ' create the label
  if (theZRange <= 10)
    then
      theText = theZval.SetFormat("d.dd").AsString
    elseif (theZRange <= 50)
      then
        theText = theZval.SetFormat("d.d").AsString
      else
        theText = theZval.SetFormat("dd").AsString
    end

  theGText = GraphicText.Make(theText, Point.Make(textX, (y1 - 0.02)))
  theGText.GetSymbol.SetSize(8)
  theGText.SetSelected(true)
  theGLList.Add(theGText)

  ' add light gray lines across the cross-section as elevation reference
  if (y <> 0) then
    zRefLine = Line.Make(theExtMinX@y1, theExtMaxX@y1)
    zRefGLLine = GraphicShape.Make(zRefLine)
    zRefGLLine.SetSymbol(thePenList.Get(1).Clone)
    zRefGLLine.GetSymbol.SetColor(Color.GetGray)
    zRefGLLine.GetSymbol.SetSize(0.5)
    zRefGLLine.SetSelected(true)
    theGLList.Add(zRefGLLine)
  end

end

' add a scale for the x values at the underside of the cross-section
thePlinlength = theFDXList.Get(theFDXList.Count - 1) - theFDXList.Get(0)
theGLList.UnSelectAll

```

```

theFac = (theExtMaxX - theExtMinX)/(theExtMaxY - theExtMinY)

if (theFac >= 2)
  then
    theStep = 10
  else
    theStep = 5
end

theXstep = (theExtMaxX - theExtMinX) / theStep
theXsf = thePlineLength / (theExtMaxX - theExtMinX)
y0 = theExtMinY
y1 = theExtMinY - 0.07

for each x in 0..theStep
  theXval = x * theXstep * theXsf
  ' create the tick mark
  x = theExtMinX + (x * theXstep)
  theLine = Line.Make(Point.Make(x, y0), Point.Make(x, y1))
  theGLine = GraphicShape.Make(theLine)
  theGLine.SetSelected(true)
  theGList.Add(theGLine)

  ' create the label
  if (thePlineLength <= 10)
    then
      theText = theXval.SetFormat("d.dd").AsString
    elseif (thePlineLength <= 50)
      then
        theText = theXval.SetFormat("d.d").AsString
      else
        theText = theXval.SetFormat("dd").AsString
    end
    theGText = GraphicText.Make(theText, Point.Make(x, (y0 - 0.2)))
    theGText.GetSymbol.SetSize(8)
    theGText.SetSelected(true)
    theGList.Add(theGText)
end

' group the tick marks and their labels
theGList.GroupSelected

'Deselect all records
theBitMap.ClearAll
theSVtab.UpdateSelection

end

'Unselect all graphic objects on layout

```

```

theGlist.UnselectAll

'Restore original selection
if (theThHasSelection)
  then
  if (theUseSelForSVG.Not)
    then
    theCurrentBM = theThTab.GetSelection
    theCurrentBM.Copy (theSaveBitMap)
    theThTab.UpdateSelection
    theView.GetDisplay.Flush
  end
end

'Create Table Doc
theTabDoc = Table.Make (theSVtab)
theTabDoc.SetName(theSVtab.GetBaseTableFileName.GetBaseName)

'Ask user whether to write all semivariogram data to a file
theYesWriteFile = MsgBox.YesNo("Write all variogram data to a file?" + NL +
                                "Note: the file svgram1.svg that is added to the project" + NL
+
                                "is overwritten each time this script is run.", theT, FALSE)
if (theYesWriteFile)
  then
  formats = {"dBASE", "INFO", "Delimited Text"}

  format = MsgBox.ListAsString(formats, "Export Format:", "Export Table")
  if (format = "dBASE") then
    theClass = DBASE
    theFilter = "*.dbf"
    theExt = ".dbf"
  elseif (format = "Delimited Text") then
    theClass = DTXT
    theFilter = "*.txt"
    theExt = ".txt"
  elseif (format = "INFO") then
    theClass = INFO
    theFilter = "arcldr9"
    theExt = ""
  else
    return nil
  end

  if (theClass.IsSubClassOf(INFO))
    then
    theInfoDirName = FileName.Make(theWorkDir.GetFullName + "\info")
    theTempFN = theInfoDirName.MakeTmp("table", theExt)
  else

```

```

    theTempFN = av.GetProject.MakeFileName("table", theExt)
end

    theFileName=FileDialog.Put(theTempFN,      theFilter,"Export Semivariogram
to Table")
    theWorkDir.SetCWD

    if (theFileName = NIL) then return nil end

    ext  = theFileName.GetExtension
    if (((theClass.IsSubclassOf(DTXT)) or (theClass.IsSubClassOf(DBASE))) and
(ext <> theExt)) then
        theFileName.SetExtension(theExt)
    end

    if (theSVTab.GetSelection.Count=0)
    then
        theSVTab.Export(theFileName, theClass, FALSE)
        MsgBox.Report("All records written to"++theFileName.GetBaseName + NL +
NL +
        "Method 1 = Spherical" + NL +
        "Method 2 = Circular" + NL +
        "Method 3 = Exponential" + NL +
        "Method 4 = Gaussian" + NL +
        "Method 5 = Linear with sill", theT)

        av.ShowMsg("All records written to"++theFileName.GetBaseName)

    else
        theSVTab.Export(theFileName, theClass, TRUE)
        MsgBox.Report("Selected records written to"++theFileName.GetBaseName +
NL + NL +
        "Method 1 = Spherical" + NL +
        "Method 2 = Circular" + NL +
        "Method 3 = Exponential" + NL +
        "Method 4 = Gaussian" + NL +
        "Method 5 = Linear with sill", theT)

        av.ShowMsg("Selected records written to"++theFileName.GetBaseName)
    end

    if ((System.GetOS = #SYSTEM_OS_MAC) and ((format = "INFO").not)) then
        Script.Make("MacClass.SetDocInfo(SELF, Table)").DoIt(theFileName)
    end

    if ((theClass.IsSubClassOf(INFO)) or (theClass.IsSubClassOf(DBASE))) then

        'Add table to project
        theNewTab = VTab.Make(theFileName, FALSE, FALSE)

```

```

    theNewTabDoc = Table.Make(theNewTab)
    theNewTabDoc.SetName(theFileName.GetBaseName)
end
end

theLWin = theLayout.GetWin
theLWin.Open
theLWin.Maximize
theLayout.GetDisplay.Flush

MsgBox.Info("A layout has been created containing all semivariograms", theT)

'Ask user whether to print layout
theYesPrint = MsgBox.YesNo("Print layout before continuing?", theT, TRUE)
if (theYesPrint)
    then
        theLayout.Print
    end

theLayout.Invalidate

theYesKrig = MsgBox.YesNo("Interpolate via kriging using semivariogram?" + NL
    + "No = quit", theT, TRUE)
if (theYesKrig.Not)
    then
        'End script
        av.GetProject.SetModified(TRUE)
        av.PurgeObjects
        return Nil
    end

'Give opportunity for selecting the field containing the z values
theModels = MsgBox.MultiList(theChoiceList,"Choose the method(s) to use for
interpolation.", theT)

'Check if a field has been chosen, if not, give second chance
if ((theModels = Nil) Or (theModels.Count = 0))
    then
        theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen a method from the list,
continue?", theT, TRUE)
        if (theContinue.Not)
            then
                return Nil
            end
        'Give second chance to chose a field
        theModels = MsgBox.MultiList(theChoiceList,"Choose the method(s) to use for
interpolation.", theT)
        if ((theModels = Nil) Or (theModels.Count = 0))
            then

```

```

    MsgBox.Error("You haven't chosen a method from the list." + NL + "Bailing...",
theT)
    return Nil
end
end

MsgBox.Report("The next step involves defining a radius:" + NL +
    "A Radius defines the search radius for those interpolators that are based
on a local moving average," + NL +
    "such as IDW and Kriging." + NI +
    "The search radius can be fixed or variable." + NL + NL +
    "A fixed search radius has a fixed circular search distance and a
minimum sample count." + NL +
    "Local averaging is limited to samples within the fixed search radius
unless the number of samples" + NL +
    "within the radius is less than the minimum sample requirement. In that
case," + NL +
    "the radius is expanded to include the minimum number of samples." +
NL + NL +

    "A variable search radius has a fixed number of samples and a maximum
search distance." + NL +
    "The variable search radius finds the closest samples within the
maximum search distance" + NL +
    "until the specified number of samples is achieved. If the specified
number of samples" + NL +
    "does not exist within the maximum search distance, then only those
samples found are used." + NL + NL +
    "NOTE: if you get error messages like:" + NL + NL +
    "Error in estimating semivariogram" + NL + "Or" + NL +
    "Unable to estimate semivariogram" + NL + NL + "be aware that a
minimum no. of samples is needed" ++
    "to calculate a semivariogram and interpolate a surface." + NL + "Adjust
search distance and/or sample count and try again!", theT)

'Give oppurtunity for selecting the field containing the z values
fixed = "Fixed"
variable = "Variable"
fixed.SetName("Fixed")
variable.SetName("Variable")
theRadiusType = MsgBox.Choice({fixed, variable}, "Choose type of radius to
use:", theT)

'Check if a field has been chosen, if not, give second chance
if (theRadiusType = Nil)
then
theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen a radius type from the list,
continue?", theT, TRUE)
if (theContinue.Not)

```

```

    then
    return Nil
end
'Give second chance to chose a field
theRadiusType = MsgBox.Choice({fixed, variable}, "Choose type of radius to
use:", theT)
if (theRadiusType = Nil)
then
    MsgBox.Error("You haven't chosen a radius type from the list." + NL +
"Bailing...", theT)
    return Nil
end
end

'Obtain extent and cell size if not set
ae = theView.GetExtension(AnalysisEnvironment)
box = Rect.Make(0@0,1@1)
cellSize = 1
if ((ae.GetExtent(box) <> #ANALYSENV_VALUE) or (ae.GetCellSize(cellSize)
<> #ANALYSENV_VALUE)) then
    ce = AnalysisPropertiesDialog.Show(theView, TRUE, "Output Grid
Specification")
    if (ce = NIL) then return NIL end
    ce.GetCellSize(cellSize)
    ce.GetExtent(box)
end

'Create default search distance for creating radius
theTempDef = 10 * cellSize
if (box.GetWidth <= box.GetHeight)
then
    if (theTempDef <= box.GetWidth)
    then
        theDefault = theTempDef.AsString
    else
        theDefault = box.GetWidth.AsString
    end
end

else
if (theTempDef <= box.GetHeight)
then
    theDefault = theTempDef.AsString
else
    theDefault = box.GetHeight.AsString
end
end

end

```

```
theChoices = MsgBox.MultiInput("Enter radius parameters", theT, {"Search distance", "Sample count"}, {theDefault, "12"})
```

```
if ((theChoices = Nil) Or (theChoices.Count = 0))  
  then  
    return Nil  
  end
```

```
theSearchD = theChoices.Get(0)
```

```
'Check if input is OK  
if (theSearchD = Nil)  
  then  
    MsgBox.Error("No search distance entered.", theT)  
    return Nil  
  elseif (theSearchD.IsNumber.Not)  
    then  
      MsgBox.Error("No number entered for search distance.", theT)  
      return Nil  
    elseif (theSearchD.AsNumber <= 0)  
      then  
        MsgBox.Error("Number must be bigger than 0!", theT)  
        return Nil  
      end  
end
```

```
theSearchDno = theSearchD.AsNumber
```

```
theSampleC = theChoices.Get(1)
```

```
'Check if input is OK  
if (theSampleC = Nil)  
  then  
    MsgBox.Error("No sample count entered.", theT)  
    return Nil  
  elseif (theSampleC.IsNumber.Not)  
    then  
      MsgBox.Error("No number entered for sample count.", theT)  
      return Nil  
    elseif (theSampleC.AsNumber <= 2)  
      then  
        MsgBox.Error("Number must be bigger than 2!", theT)  
        return Nil  
      end  
end
```

```
theSampleCNo = theSampleC.AsNumber
```

```
if ((box.GetWidth < theSearchDno) Or (box.GetHeight < theSearchDno))  
  then
```

```

MsgBox.Info("The search distance must be smaller than" + NL +
           "the width and height of the analysis extent", theT)
theYes = MsgBox.YesNo("Enter another search distance?", theT, TRUE)
if (theYes)
  then

  if (box.GetWidth <= box.GetHeight)
    then
      theDefault = box.GetWidth.AsString
    else
      theDefault = box.GetHeight.AsString
    end

  theSearchD = MsgBox.Input("Enter a value for the search distance", theT,
theDefault)

  'Check if input is OK
  if (theSearchD = Nil)
    then
      MsgBox.Error("No search distance entered.", theT)
      return Nil
    elseif (theSearchD.IsNumber.Not)
      then
        MsgBox.Error("No number entered for search distance.", theT)
        return Nil
      elseif (theSearchD.AsNumber <= 0)
        then
          MsgBox.Error("Number must be bigger than 0!", theT)
          return Nil
        end
      end

  theSearchDno = theSearchD.AsNumber

  if ((box.GetWidth < theSearchDno) Or (box.GetHeight < theSearchDno))
    then
      MsgBox.Error("The search distance must be smaller than" + NL +
                 "the width and height of the analysis extent!!!", theT)
      return Nil
    end

  else

  return Nil

  end
end

'Create a radius for calculating the semivariogram
if (theRadiusType = "Fixed")

```

```

then
theRadius = Radius.MakeFixed(theSearchDNo, theSampleCNo)
else
theRadius = Radius.MakeVariable(theSampleCNo, theSearchDNo)
end

theYesCreateVarGr = MsgBox.YesNo("Create output variance grid?", theT,
TRUE)

for each theModel in theModels

'Clear selection if user wishes to use all records for estimating semivariogram
if (theThHasSelection)
then
if (theUseSelForSVG.Not)
then
theThTab.GetSelection.ClearAll
theThTab.UpdateSelection
theView.GetDisplay.Flush
end
end

'Check if semivariogram table already exists, if so, remove table doc
theTableDocs = theProject.GetDocsWithGUI(theProject.FindGUI("Table"))
for each theTableDoc in theTableDocs
if (theTableDoc.GetVtab.GetBaseTableFileName <> Nil)
then
if (theTableDoc.GetVtab.GetBaseTableFileName.GetBaseName =
"svgram1.svg")
then
theProject.RemoveDoc(theTableDoc)
end
end
end

'If semivariogram file exists and it contains data from a former session, delete
data first
theFList = theInfoDir.GetFiles
for each theFile in theFList
if(theFile.GetBaseName = "svgram1.svg")
then
theInfoTab = VTab.Make (theFile, TRUE, FALSE)
'Check if table has records
if ((theInfoTab.GetNumRecords = Nil) Or (theInfoTab.GetNumRecords = 0))
then
else
'Check if table is editable
if (theInfoTab.IsEditable)
then

```

```

        'Remove all data from info file
        theBitmap = theInfoTab.GetSelection
        theBitmap.SetAll
        theInfoTab.UpdateSelection
        theInfoTab.RemoveRecords(theBitmap)
    end
end

if (theInfoTab.IsEditable)
    then
        theInfoTab.SetEditable(FALSE)
    end

end
end

theSVGGram = SVGGram.Make(theThTab,thePrj,zField,theModel,theInterval)

'Create Table Doc
theSVGVTAB = theSVGGram.GetVTab
theTabDoc = Table.Make (theSVGVTAB)
theTabDoc.SetName(theSVGVTAB.GetBaseTableFileName.GetBaseName)

'Restore original selection
if (theThHasSelection)
    then
        if (theUseSelForSVG.Not)
            then
                theCurrentBM = theThTab.GetSelection
                theCurrentBM.Copy (theSaveBitMap)
                theThTab.UpdateSelection
                theView.GetDisplay.Flush
            end
        end
    end

if (theYesCreateVarGr)
    then

        ' create filename objects
        if (theModel = #KRIGING_SPHERICAL)
            then
                aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_sph", "")
            elseif (theModel = #KRIGING_CIRCULAR)
                then
                    aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_cir", "")
            elseif (theModel = #KRIGING_EXPONENTIAL)
                then
                    aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_exp", "")
            elseif (theModel = #KRIGING_GAUSSIAN)

```

```

        then
        aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_gau", "")
        elseif (theModel = #KRIGING_LINEAR)
            then
            aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_lin", "")

        end

    else

        aVarFN = Nil

    end

    'Clear selection if user wishes to use all records in interpolation
    if (theThHasSelection)
        then
        if (theUseSelection.Not)
            then
            theThTab.GetSelection.ClearAll
            theThTab.UpdateSelection
            theView.GetDisplay.Flush
            end
        end

        theInterp = Interp.MakeFromVarioGram(theSVGram, theRadius, theBarrier,
        aVarFN)

        'Interpolate
        theIntGrid = Grid.MakeByInterPolation(theThTab, thePrj, zField, theInterp,
        {cellSize, box})

        'Restore original selection
        if (theThHasSelection)
            then
            if (theUseSelection.Not)
                then
                theCurrentBM = theThTab.GetSelection
                theCurrentBM.Copy (theSaveBitMap)
                theThTab.UpdateSelection
                theView.GetDisplay.Flush
                end
            end

            ' check if output is ok
            if (theIntGrid.HasError) then return NIL end

            ' rename data set
            if (theModel = #KRIGING_SPHERICAL)

```

```

then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_sph", "")
elseif (theModel = #KRIGING_CIRCULAR)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_cir", "")
elseif (theModel = #KRIGING_EXPONENTIAL)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_exp", "")
elseif (theModel = #KRIGING_GAUSSIAN)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_gau", "")
elseif (theModel = #KRIGING_LINEAR)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_lin", "")

end

theIntGrid.Rename(aFN)
' create a theme
theGthm = GTheme.Make(theIntGrid)
' set name of theme
theGthm.SetName("Krig (" + theModel.GetName + ") of" ++
theActiveTh.GetName)
theGthm.SetComments("Interpolated surface derived from " +
theActiveTh.GetName ++ "using the" ++ theModel.GetName ++ "model for the
variance")

if (theYesCreateVarGr)
then
'Create grid object of variance grid in ArcView
theSrcString = aVarFN.GetFullName
theSourceNm = Grid.MakeSrcName(theSrcString)
if (theSourceNm = Nil)
then
MsgBox.Error("Sourcename for variance grid has an error", theT)
return Nil
end

theVarGrid = Grid.Make(theSourceNm)

' check if output is ok
if (theVarGrid.HasError)
then
MsgBox.Error("Variance grid has an error, it will not be added" + NL +
"to the view", theT)
else
' create a theme
theGvthm = GTheme.Make(theVarGrid)

```

```

        ' set name of theme
        theGvthm.SetName("Variance (" + theModel.GetName + ") of" ++
theActiveTh.GetName)
        theGvthm.SetComments("Variance grid from " + theActiveTh.GetName ++
"using the" ++ theModel.GetName ++ "model for the variance")
        ' add theme to the specifiedView
        theView.AddTheme(theGvthm)

    end

end

' add theme to the specifiedView
theView.AddTheme(theGthm)

end

theView.GetThemes.Get(0).SetVisible(TRUE)
theLayout.GetWin.Close
theView.GetWin.Activate

else

enum1 = #KRIGING_UNIVERSAL1
enum1.SetName("Universal kriging with linear drift")

enum2 = #KRIGING_UNIVERSAL2
enum2.SetName("Universal kriging with quadratic drift")

theEnumList = {enum1, enum2}

'Give opportunity for selecting the field containing the z values
theModels = MsgBox.MultiList(theEnumList,"Choose the method(s) to use for
interpolation.", theT)

'Check if a field has been chosen, if not, give second chance
if ((theModels = Nil) Or (theModels.Count = 0))
then
    theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen a method from the list,
continue?", theT, TRUE)
    if (theContinue.Not)
    then
        return Nil
    end
'Give second chance to chose a field

```

```

    theModels = MsgBox.MultiList(theEnumList,"Choose the method(s) to use for
interpolation.", theT)
    if ((theModels = Nil) Or (theModels.Count = 0))
        then
            MsgBox.Error("You haven't chosen a method from the list." + NL + "Bailing...",
theT)
            return Nil
        end
    end
end

```

```

'Clear selection if user wishes to use all records for interpolation
if (theThHasSelection)
    then
        if (theUseSelection.Not)
            then
                theThTab.GetSelection.ClearAll
                theThTab.UpdateSelection
                theView.GetDisplay.Flush
            end
        end
    end
end

```

```

MsgBox.Report("The next step involves defining a radius:" + NL +
    "A Radius defines the search radius for those interpolators that are based
on a local moving average," ++
    "such as IDW and Kriging." + NI +
    "The search radius can be fixed or variable." ++
    "A fixed search radius has a fixed circular search distance and a minimum
sample count." ++
    "Local averaging is limited to samples within the fixed search radius unless
the number of samples" ++
    "within the radius is less than the minimum sample requirement. In that
case," ++
    "the radius is expanded to include the minimum number of samples." + NL +
NL +

```

```

    "A variable search radius has a fixed number of samples and a maximum
search distance." ++
    "The variable search radius finds the closest samples within the maximum
search distance" ++
    "until the specified number of samples is achieved. If the specified number
of samples" ++
    "does not exist within the maximum search distance, then only those
samples found are used." + NL + NL +
    "NOTE: if you get error messages like:" + NL + NL +
    "Error in estimating semivariogram" + NL + "Or" + NL +
    "Unable to estimate semivariogram" + NL + NL + "be aware that a minimum
no. of samples is needed" ++
    "to calculate a semivariogram and interpolate a surface." ++ "Adjust search
distance and/or sample count and try again!", theT)

```

```

'Give opportunity for selecting the field containing the z values
fixed = "Fixed"
variable = "Variable"
fixed.SetName("Fixed")
variable.SetName("Variable")
theRadiusType = MsgBox.Choice({fixed, variable}, "Choose type of radius to
use:", theT)

'Check if a field has been chosen, if not, give second chance
if (theRadiusType = Nil)
then
theContinue = MsgBox.YesNo("You haven't chosen a radius type from the list,
continue?", theT, TRUE)
if (theContinue.Not)
then
return Nil
end
'Give second chance to chose a field
theRadiusType = MsgBox.Choice({fixed, variable}, "Choose type of radius to
use:", theT)
if (theRadiusType = Nil)
then
MsgBox.Error("You haven't chosen a radius type from the list." + NL +
"Bailing...", theT)
return Nil
end
end

'Obtain extent and cell size if not set
ae = theView.GetExtension(AnalysisEnvironment)
box = Rect.Make(0@0,1@1)
cellSize = 1
if ((ae.GetExtent(box) <> #ANALYSISENV_VALUE) or (ae.GetCellSize(cellSize)
<> #ANALYSISENV_VALUE)) then
ce = AnalysisPropertiesDialog.Show(theView, TRUE, "Output Grid
Specification")
if (ce = NIL) then return NIL end
ce.GetCellSize(cellSize)
ce.GetExtent(box)
end

'Create default search distance for creating radius
theTempDef = 10 * cellSize
if (box.GetWidth <= box.GetHeight)
then
if (theTempDef <= box.GetWidth)
then
theDefault = theTempDef.AsString

```

```

    else
        theDefault = box.GetWidth.AsString
    end

    else
        if (theTempDef <= box.GetHeight)
            then
                theDefault = theTempDef.AsString
            else
                theDefault = box.GetHeight.AsString
            end
        end

    end

    theChoices = MsgBox.MultiInput("Enter radius parameters", theT, {"Search
distance", "Sample count"}, {theDefault, "12"})

    if ((theChoices = Nil) Or (theChoices.Count = 0))
        then
            return Nil
        end

    theSearchD = theChoices.Get(0)

    'Check if input is OK
    if (theSearchD = Nil)
        then
            MsgBox.Error("No search distance entered.", theT)
            return Nil
        elseif (theSearchD.IsNumber.Not)
            then
                MsgBox.Error("No number entered for search distance.", theT)
                return Nil
            elseif (theSearchD.AsNumber <= 0)
                then
                    MsgBox.Error("Number must be bigger than 0!", theT)
                    return Nil
                end
            end

    theSearchDno = theSearchD.AsNumber

    theSampleC = theChoices.Get(1)

    'Check if input is OK
    if (theSampleC = Nil)
        then
            MsgBox.Error("No sample count entered.", theT)
            return Nil
        elseif (theSampleC.IsNumber.Not)

```

```

    then
    MsgBox.Error("No number entered for sample count.", theT)
    return Nil
elseif (theSampleC.AsNumber <= 2)
    then
    MsgBox.Error("Number must be bigger than 2!", theT)
    return Nil
end

theSampleCNo = theSampleC.AsNumber

if ((box.GetWidth < theSearchDNo) Or (box.GetHeight < theSearchDNo))
then
MsgBox.Info("The search distance must be smaller than" + NL +
    "the width and height of the analysis extent", theT)
theYes = MsgBox.YesNo("Enter another search distance?", theT, TRUE)
if (theYes)
then

if (box.GetWidth <= box.GetHeight)
then
theDefault = box.GetWidth.AsString
else
theDefault = box.GetHeight.AsString
end

theSearchD = MsgBox.Input("Enter a value for the search distance", theT,
theDefault)

'Check if input is OK
if (theSearchD = Nil)
then
MsgBox.Error("No search distance entered.", theT)
return Nil
elseif (theSearchD.IsNumber.Not)
then
MsgBox.Error("No number entered for search distance.", theT)
return Nil
elseif (theSearchD.AsNumber <= 0)
then
MsgBox.Error("Number must be bigger than 0!", theT)
return Nil
end

theSearchDno = theSearchD.AsNumber

if ((box.GetWidth < theSearchDNo) Or (box.GetHeight < theSearchDNo))
then

```

```

    MsgBox.Error("The search distance must be smaller than" + NL +
        "the width and height of the analysis extent!!!", theT)
    return Nil
end

else

    return Nil

end
end

'Create a radius for calculating the semivariogram
if (theRadiusType = "Fixed")
    then
        theRadius = Radius.MakeFixed(theSearchDNo, theSampleCNo)
    else
        theRadius = Radius.MakeVariable(theSampleCNo, theSearchDNo)
    end

theYesCreateVarGr = MsgBox.YesNo("Create output variance grid?", theT,
TRUE)

for each theModel in theModels
    if (theYesCreateVarGr)
        then

            ' create filename objects
            if (theModel = #KRIGING_UNIVERSAL1)
                then
                    aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_uld", "")
                elseif (theModel = #KRIGING_UNIVERSAL2)
                    then
                        aVarFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("v_uqd", "")
                    end
                end

            else

                aVarFN = Nil

            end

theInterp = Interp.MakeKriging(theModel, theRadius, theBarrier, aVarFN)

'Get projection of view for creating semivariogram and grid
thePrj = theView.GetProjection

'Interpolate

```

```
theIntGrid = Grid.MakeByInterPolation(theThTab, thePrj, zField, theInterp,
{cellSize, box})
```

```
' check if output is ok
if (theIntGrid.HasError) then return NIL end
```

```
' rename data set
' create filename objects
if (theModel = #KRIGING_UNIVERSAL1)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_uld", "")
elseif (theModel = #KRIGING_UNIVERSAL2)
then
aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("k_uqd", "")
end
```

```
theIntGrid.Rename(aFN)
```

```
' create a theme
theGthm = GTheme.Make(theIntGrid)
' set name of theme
theGthm.SetName("Krig (" + theModel.GetName + ") of" ++
theActiveTh.GetName)
theGthm.SetComments("Interpolated surface derived from " +
theActiveTh.GetName ++ "using the" ++ theModel.GetName ++ "model for the
variance")
```

```
if (theYesCreateVarGr)
then
' Create grid object of variance grid in ArcView
theSrcString = aVarFN.GetFullName
theSourceNm = Grid.MakeSrcName(theSrcString)
if (theSourceNm = Nil)
then
MsgBox.Error("Sourcename for variance grid has an error", theT)
return Nil
end
```

```
theVarGrid = Grid.Make(theSourceNm)
```

```
' check if output is ok
if (theVarGrid.HasError)
then
MsgBox.Error("Variance grid has an error, it will not be added" + NL +
"to the view", theT)
else
' create a theme
theGvthm = GTheme.Make(theVarGrid)
```

```

        ' set name of theme
        theGvthm.SetName("Variance (" + theModel.GetName + ") of" ++
theActiveTh.GetName)
        theGvthm.SetComments("Variance grid from " + theActiveTh.GetName ++
"using the" ++ theModel.GetName ++ "model for the variance")
        ' add theme to the specifiedView
        theView.AddTheme(theGvthm)

    end

end

' add theme to the specifiedView
theView.AddTheme(theGthm)

end 'end for each themodel

theView.GetThemes.Get(0).SetVisible(TRUE)

'Restore original selection
if (theThHasSelection)
then
if (theUseSelection.Not)
then
theCurrentBM = theThTab.GetSelection
theCurrentBM.Copy (theSaveBitMap)
theThTab.UpdateSelection
theView.Invalidate
end
end
end

end

'End script
theProject.SetModified(TRUE)
av.PurgeObjects

```

5. SCRIPT PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON LA ECUACIÓN DE CENICAFÉ

```
'CENICAFE
titulo="Cálculo de la Evapotranspiración según Cenicafé"
ventana=av.getactivedoc
if(ventana=nil) then
  msgbox.error("No hay una ventana activa",titulo)
  exit
end

theThemes = ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes
  if(t.Is(Gtheme)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes=nil)then
  MsgBox.Error("No hay un tema MDT raster",titulo)
  exit
end

elevtheme=Msgbox.Choiceasstring(vectthemes,"Seleccione MDE raster de la
cuenca",titulo)
if(elevtheme=nil)then
  exit
end
raster=elevtheme.Getgrid

Cenicafegrid = ((raster)*(-0.0002)).Exp*4.658*365.AsGrid
ETPCenicafe = GTheme.Make(Cenicafegrid)
ETPCenicafe.SetName("ETP según método de Cenicafé")
ventana.addtheme(ETPCenicafe)
```

6. SCRIPT PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON LA ECUACIÓN DE INGEOMINAS – CORPOCESAR 1994

```
'INGEOMINAS - CORPOCESAR
titulo="Cálculo de la Evapotranspiración media anual, según Ingeominas -
Corpocesar"
ventana=av.getactivedoc
if(ventana=nil) then
  msgbox.error("No hay una ventana activa",titulo)
  exit
end

theThemes = ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes
  if(t.Is(Gtheme)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes=nil)then
  MsgBox.Error("No hay un tema MDT raster",titulo)
  exit
end

elevtheme=Msgbox.Choiceasstring(vectthemes,"Seleccione MDE raster de la
cuenca",titulo)
if(elevtheme=nil)then
  exit
end
raster=elevtheme.Getgrid

IngeominCorpocesgrid = ((raster).Pow(-0.185))*4149.27.AsGrid
ETPIngeominCorpoces = GTheme.Make(IngeominCorpocesgrid)
ETPIngeominCorpoces.SetName("ETP según método de Ingeominas - Corpocesar -
1994")
ventana.addtheme(ETPIngeominCorpoces)
```

7. SCRIPT PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL

CALCULO DEL BALANCE HIDRICO (Autor: Jorge Alberto Armenta Jiménez)

```
titulo = "Proceso de cálculo del balance hídrico superficial"
Ventana = av.getactivedoc
if(Ventana = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay una ventana activa", titulo)
  exit
end

theThemes = Ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes 'despliega unicamente los temas Grid
  if(t.Is(GTHEME)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay un tema MDT raster", titulo)
  exit
end

preciptheme = MsgBox.Choiceasstring(vectthemes, "Seleccione Modelo raster de
precipitación de la cuenca", titulo)
if(preciptheme = nil)then
  exit
end
rasterprecip = preciptheme.Getgrid

etptheme = MsgBox.Choiceasstring(vectthemes, "Seleccione Modelo raster de
evapotranspiración de la cuenca", titulo)
if(etptheme = nil)then
  exit
end
rasteretp = etptheme.Getgrid

balancegrid = ((rasterprecip) - (rasteretp))*1.AsGrid
Balance = GTheme.Make(balancegrid)
Balance.SetName("Balance hídrico (mm) --->" ++ preciptheme.GetName++ " -
" ++ etptheme.GetName)
Ventana.addtheme(Balance)
```

8. SCRIPT PARA EL CALCULO DE DEPRESIONES (CELDAS BAJAS) EN EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

```
titulo="Proceso de cálculo de depresiones"

ventana=av.getactivedoc
if(ventana=nil) then
  msgbox.error("No hay una ventana activa",titulo)
  exit
end

theThemes = ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes
  if(t.Is(Gtheme)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes=nil)then
  MsgBox.Error("No hay un tema MDT raster",titulo)
  exit
end

filltheme=Msgbox.Choiceasstring(vectthemes,"Seleccione MDE raster de la
cuenca.",titulo)
if(filltheme=nil)then
  exit
end
raster=filltheme.Getgrid

sinkCount=0
numSinks=0
while(TRUE)
  DirFlujoGrid=raster.FlowDirection(FALSE)
  SinkDirFlujoGrid=DirFlujoGrid.Sink
  if(SinkDirFlujoGrid.GetVTab=NIL)then
    if(SinkDirFlujoGrid.HasError)then
      return NIL
    end
    SinkDirFlujoGrid.BuildVAT
  end
end

if(SinkDirFlujoGrid.GetVTab<>NIL)then
  Tabla=SinkDirFlujoGrid.GetVTab
  numclases = Tabla.GetNumRecords
  newSinkCount = Tabla.ReturnValue(Tabla.FindField("count"),0)
else
  numclases=0
end
```

```
newsSinkCount=0
end

if(numClases<1)then
  break
elseif((NumSinks=NumClases) and (SinkCount=NewSinkCount))then
  break
end
output=(SinkDirFlujoGrid.IsNull).Con(0.AsGrid,1.AsGrid)
numSinks=numclases
sinkCount=NewSinkCount
end

theGTheme=GTheme.Make(output)
theGTheme.SetName("Sumideros")
Ventana.AddTheme(theGTheme)
```

9. SCRIPT PARA EL CORTE (“QUEMADO”) DE LA RED DE FLUJO SOBRE EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

```
titulo = "Proceso de corte de la red de drenaje"
Ventana = av.getactivedoc
if(Ventana = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay una ventana activa",titulo)
  exit
end

theThemes = Ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes 'despliega unicamente los temas Grid
  if(t.Is(GTHEME)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay un tema MDT raster",titulo)
  exit
end

burntheme = MsgBox.Choiceasstring(vectthemes,"Seleccione MDE raster de la
cuenca",titulo)

if(burntheme = nil)then exit end
raster = burntheme.Getgrid

Polilinea = list.make
for each tem in theThemes
  if(tem.canselect = true) then
    if(tem.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPELINE) then
      if(tem.getftab.CanEdit) then
        Polilinea.add(tem)
      end
    end
  end
end

Red = MsgBox.ChoiceAsString(Polilinea,"Seleccione la red de drenaje",Titulo)

if (Red = nil) then exit end

Bmapa = Red.GetFtab.GetSelection

Bmapa.ClearAll

Celda = raster.GetCellSize
```

```
Extencion = raster.GetExtent
GridRed = Grid.MakeFromFTab(Red.GetFtab, ventana.GetProjection, nil,{celda,
extencion})

RedCero = GridRed*0.AsGrid

Output = (RedCero.IsNull).Con(raster,0.AsGrid)

ThemeCortado = GTheme.Make(Output)
ThemeCortado.SetName("Corte de la Red de flujo")
ventana.addtheme(ThemeCortado)
```

10. SCRIPT PARA EL PROCESO DE LLENADO DE DEPRESIONES EN EL MODELO DIGITAL DE ELEVACION

```
titulo = "Proceso llenado de depresiones"
Ventana = av.getactivedoc
if(Ventana = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay una ventana activa", titulo)
  exit
end

theThemes = Ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes 'despliega unicamente los temas Grid
  if(t.Is(GTHEME)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay un tema MDT raster", titulo)
  exit
end

filltheme = MsgBox.Choiceasstring(vectthemes, "Seleccione MDE raster con el corte de la red", titulo)

if(filltheme = nil)then exit end
raster = filltheme.Getgrid
sinkCount = 0
numSinks = 0
while(TRUE)
  DirFlujoGrid = raster.FlowDirection(FALSE)
  SinkDirFlujoGrid = DirFlujoGrid.Sink

  if(SinkDirFlujoGrid.GetVTab = NIL) then
    if(SinkDirFlujoGrid.HasError) then return NIL
    end
    SinkDirFlujoGrid.BuildVAT
  end

  if (sinkDirFlujoGrid.HasError) then return NIL
  end

  if (SinkDirFlujoGrid.GetVTab <> NIL) then
    Tabla = SinkDirFlujoGrid.GetVTab
    numclases = Tabla.GetNumRecords
    newSinkCount = Tabla.ReturnValue(Tabla.FindField("count"),0)
  else
    numclases = 0
  end
end
```

```

    newSinkCount = 0
end

if (numclases < 1) then
    break
elseif((numSinks = numClases) and (sinkCount = newSinkCount))then
    break
end

watergrid = DirFlujoGrid.WaterShed(SinkDirFlujoGrid)
zonalFillGrid = watergrid.ZonalFill(raster)
fillGrid
=(raster<(zonalFillGrid.IsNull.Con(0.AsGrid,zonalFillGrid))).Con(zonalFillGrid,raster)
raster=fillGrid
numSinks=numclases
sinkCount=newSinkCount
end

theGTheme = GTheme.Make(raster)
theGTheme.SetName("MDE Lleno")
Ventana.AddTheme(theGTheme)

```

11. SCRIPT PARA EL PROCESO DE GENERACIÓN DE LA RED DE DRENAJE Y DE LA DELINEACIÓN DE MICROCUENCAS

```
titulo = "Proceso de cálculo de la red de drenaje y de las subcuencas"
Ventana = av.getactivedoc
if(Ventana = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay una ventana activa", titulo)
  exit
end

theThemes = Ventana.getthemes
vectthemes = list.make
for each t in theThemes 'despliega unicamente los temas Grid
  if(t.Is(GTHEME)) then
    vectthemes.add(t)
  end
end

if(vectthemes = nil)then
  MsgBox.Error ("No hay un tema MDT raster", titulo)
  exit
end

filltheme = MsgBox.Choiceasstring(vectthemes, "Seleccione el MDE llenado para
calcular la Direccion de flujo.", titulo)

if(filltheme = nil)then exit end
raster = filltheme.GetGrid

'Cálculo de la Dirección de Flujo
grdFlow = raster.FlowDirection(false)
'Cálculo de flujo acumulado
accumGrid = grdFlow.FlowAccumulation(nil)
'Creación de un grid con valor único de 1 en las celdas que tengan más de 150
flujos acumulados
Red_Drenaje = (accumGrid < 150.AsGrid).SetNull(1.AsGrid)
'Creación de un grid vínculo con un valor único para cada segmento de corriente
linkgrid = Red_drenaje.StreamLink(grdFlow)
'Delineación de subcuencas para cada uno de los segmentos de corriente
cuencas = grdFlow.Watershed(linkgrid)

'Crear los diversos temas generados
Direcciones = GTheme.Make(grdFlow)
Direcciones.SetName("Direccion de Flujo")
FlujoAcumulado = GTheme.Make(accumGrid)
FlujoAcumulado.SetName("Flujos acumulados")
RedDrenaje = GTheme.Make(Red_Drenaje)
RedDrenaje.SetName("Red de Drenaje")
```

```
Links = GTheme.Make(linkgrid)
Links.SetName("Links de la red")
Subcuencas = GTheme.Make(cuencas)
Subcuencas.SetName("Subcuencas")
```

```
'Adicionar los temas creados, a la vista
Ventana.AddTheme(Direcciones)
Ventana.AddTheme(FlujoAcumulado)
Ventana.AddTheme(RedDrenaje)
Ventana.AddTheme(Links)
Ventana.AddTheme(Subcuencas)
```

12. SCRIPT PARA EL PROCESO DE CORTE DE UN POLÍGONO SOBRE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO

*****Script para cortar un Grid a partir de un poligono

```
Ventana = av.GetActiveDoc  
temalist = Ventana.getthemes  
Distancia = "Extraer raster a partir de un polígono."
```

```
if(Ventana.is(View).not)then  
  MsgBox.Error("No hay activada una ventana!", "Alerta!!!")  
  return nil  
else  
  aProjeccion = Ventana.GetProjection  
end
```

```
theThemeslist = Ventana.getthemes
```

*****Seleccionar un tema Grid

```
GridList = List.Make  
for each atema in theThemeslist  
  if(atema.GetClass.GetClassName = "Gtheme")then  
    Gridlist.add(atema)  
  end  
end
```

```
Temagrid = MsgBox.ChoiceAsString(GridList, "Seleccione el tema raster a  
cortar.", distancia)  
if(Temagrid = Nil) then Exit end  
GridInterpolado = Temagrid.GetGrid
```

*****Selecciona el poligono

```
temashp = list.make  
for each tema in theThemeslist  
  if(tema.canselect = true) then  
    if(tema.getftab.findfield("Shape").gettype = #FIELD_SHAPEPOLY)then  
      temashp.add(tema)  
    end  
  end  
end
```

```
limite = MsgBox.list(temashp, "Seleccione el limite de la cuenca para el  
corte.", Distancia)  
if (limite = Nil) then exit end
```

*****Este parte de Avenue es del sistema ArcView para generar los cortes*****

```
'Consigue la extension (area) como un rectangulo
```

```

thePolyThmExtent = limite.getselectedextent
if (thePolyThmExtent.IsEmpty) then thePolyThmExtent = limite.ReturnExtent end
'Consigue parametros para un nuevo Grid
theFtab = limite.GetFTab
'del grid interpolado****
theCell = GridInterpolado.GetCellSize
theExtent = GridInterpolado.GetExtent
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSISENV_VALUE, thePolyThmExtent)
ae.SetCellSize(#ANALYSISENV_VALUE, theCell)
ae.Activate
'la extracion actual ocurre aqui
tempGrid = Grid.MakeFromFtab(theFtab,aProjeccion,nil,{theCell,theExtent})
newGrid = (tempGrid.IsNull).Con (tempGrid, GridInterpolado)
'Resetea el analisis "environment" de las parametros de entrada
aRect = Nil
ae = Ventana.GetExtension(AnalysisEnvironment)
ae.SetExtent(#ANALYSISENV_MAXOF, aRect)
ae.SetCellSize(#ANALYSISENV_MAXOF, aRect)
*****Hasta Aqui proceso de cortar la cuenca

if (newGrid.HasError) then return NIL end
theGTheme = Gtheme.Make(newGrid)

theGtheme.SetName("Area de "++TemaGrid.GetName++" dentro del polígono")
Ventana.AddTheme(theGTheme)

```

13. SCRIPT PARA LA OPERACIÓN (EVENTUAL) DE CÁLCULO DE MAPAS (OPERACIONES ENTRE MODELOS DIGITALES)

```
' Spatial.Calculator
```

```
theView = av.GetActiveDoc
```

```
GTheme.MakeCalculationMap(theView, "Cálculo de Mapas ")
```