



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

**DINÁMICA DE USO DEL SUELO Y SU EFECTO EN EL ESCURRIMIENTO
SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, TLALCHAPA, GUERRERO**

LILIANA MIRANDA ARAGÓN

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2008

La presente tesis titulada "Dinámica de uso del suelo y su efecto en el escurrimiento superficial en la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero" realizada por **Liliana Miranda Aragón**, bajo la dirección del **Consejo Particular** indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
FORESTAL**

CONSEJO PARTICULAR

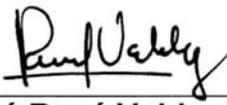
Consejera:


Dra. Patricia Hernández de la Rosa

Directora de tesis:


Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

Asesor:


Dr. José René Valdez Lazalde

Montecillo, Texcoco, México, febrero de 2008

DINÁMICA DE USO DEL SUELO Y SU EFECTO EN EL ESCURRIMIENTO EN LA
CUENCA DEL RÍO GRANDE, TLALCHAPA, GUERRERO

Liliana Miranda Aragón, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2008

Esta tesis presenta los resultados obtenidos en la investigación sobre la dinámica de uso del suelo y su efecto en el escurrimiento en la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero. La metodología consistió en obtener los usos del suelo mediante: (1) técnicas de clasificación supervisada en imágenes de satélite Landsat (1973, 1986, 2001) y (2) digitalización en monitor sobre una imagen de muy alta resolución espacial QuickBird (2006). El proceso lluvia-escurrimiento se modeló con el sistema HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) para los escenarios: 1973, 1986, 2001 y 2006. Entre los principales parámetros empleados en el modelo fueron: (1) la tormenta sintética tipo II (SCS) y (2) la curva numérica ponderada por subcuenca (SCS). El modelo calculó los hidrogramas en cada subcuenca y a la salida de la cuenca. A pesar de que se observó un cambio visible en las coberturas (arboladas a pastizal), no se tuvo un efecto estadísticamente significativo (prueba de Duncan) en la curva numérica y el escurrimiento en los diferentes escenarios estudiados.

Palabras clave: Landsat, QuickBird. HEC-HMS, curva numérica.

LAND USE DYNAMICS AND ITS EFFECT ON RUNOFF IN THE RIO GRANDE
WATERSHED, TLALCHAPA, GUERRERO

Liliana Miranda Aragón, M.Sc
Postgraduate College, 2008

This thesis presents the results obtained in the research on land-use dynamics and its effect on runoff in the Río Grande watershed, located in Tlalchapa, Guerrero, Mexico. The methodology consisted in obtaining land use data using: (1) supervised classification techniques applied to satellite imagery Landsat (1973, 1986, 2001) and (2) on-screen digitizing over a very high spatial resolution satellite QuickBird image (2006). Then, the rainfall-runoff process was modeled using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) system for the 1973, 1986, 2001 and 2006 scenarios. The main used variables were: (1) SCS design storm type II and (2) subwatershed-weighted curve number (SCS-CN). The model calculated hydrographs for each subwatershed and for the watershed outlet. Despite of a visible change in land cover (forest to grassland) was detected, there was not a statistically significant effect (Duncan's test) on curve number and runoff for the several studied scenarios.

Key words: Landsat, QuickBird, HEC-HMS, curve number.

Agradezco:

Al CONACYT y al Colegio de Postgraduados por la confianza brindada al apoyarme económica y académicamente para realizar y culminar esta fase importante de mi formación.

A la Dra. Patricia Hernández de la Rosa, mi profesora consejera, por inspirarme confianza y ánimo para seguir siempre adelante; también por su apoyo generoso y desinteresado en la logística de esta investigación.

A la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por la valiosa y fructífera dirección de ésta tesis; por su amplia disponibilidad siempre en cada momento; por compartir generosamente su apreciable conocimiento y experiencias que me guiaron y enriquecieron en esta etapa de mi formación académica.

Al Dr. J. René Valdez Lazalde, por su sincera confianza, constante motivación, sus consejos y valiosos aportes a esta tesis y por supuesto por ser parte de mi formación académica en este maravilloso Colegio.

A todos mis profesores que fueron parte de mi formación con sus valiosas y diversas enseñanzas.

A los tíos Ernesto Alvarado y Ariadna Aguirre, Andrómeda Aguirre y Eduardo Alcalde por su invaluable apoyo incondicional en todo momento y ser un ejemplo de tenacidad y superación para todos los sobrinos.

Sincero y profundo, a mi esposo Carlos Arturo Aguirre Salado quien ha sido la luz de mi formación académica, llevándome de la mano sin cesar hasta la meta que juntos recorrimos en esta maestría, donde conocimos el camino de la ciencia y que podremos disfrutar para siempre.

A los Sres. Ignacia y Tuto Bravo Hernández por apoyarnos en la logística de las salidas de campo. A mis suegros los Sres. Bertha Salado Morales y Margarito Aguirre Bravo por apoyarnos en los momentos difíciles de esta maestría.

Especialmente a la Ing. Olimpia Talya Aguirre Salado quien concibió la idea inicial de éste tema de investigación como un interesante aporte al conocimiento de los recursos naturales del municipio de Tlalchapa, Guerrero.

Dedico esta tesis:

A mi esposo a quien amo intensamente, Carlos Arturo Aguirre Salado que me ha acompañado hasta el momento.

A mi mamá Alicia Aragón Barreto por ser especial, al igual que mis hermanas Dalia y Sara.

A mi hijo Carlos Adrián y sobrinos: Magda Alicia, María Fernanda, Ángel de Jesús e Ithan Carlos para que muy pronto los vea por éste camino y más lejos aún.

A mis cuñados Olimpia Talya y su esposo Carlos Solano, y Alejandro Iván quienes se encuentran en la lucha constante hacia la superación.

A los abuelitos paternos de mi esposo, los Sres. Clicerio Aguirre e Ignacia Bravo, ejemplo de excelencia hacia la vida, por inculcarnos metas más allá del horizonte y ser una pieza clave del éxito de la familia.

CONTENIDO

	Página
Resumen	iii
Abstract	iv
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	
1.1. Presentación.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos particulares.....	3
1.3. Revisión de literatura.....	3
1.3.1. Agua y bosques (cobertura vegetal y/o uso del suelo)	3
1.3.2. El cambio de uso del suelo en México.....	5
1.3.3. Análisis de cambio de uso del suelo mediante percepción remota.....	6
1.3.4. La cuenca y el ciclo hidrológico.....	8
1.3.5. La modelación en cuencas.....	11
1.3.6. El modelo HEC-HMS.....	14
1.4. Literatura citada.....	15
CAPÍTULO II. DINÁMICA DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, TLALCHAPA, GUERRERO	
RESUMEN	20
ABSTRACT	20
2.1 Introducción.....	21
2.2 Materiales y métodos.....	22
2.2.1. Área de estudio.....	22
2.2.2. Materiales.....	23

2.2.3.	Generación de los mapas de cobertura.....	26
2.2.4.	Dinámica de uso del suelo.....	27
2.3.	Resultados y discusión.....	28
2.3.1.	Mapas temáticos obtenidos y validación.....	28
2.3.2.	Análisis de cambio.....	31
2.5.	Conclusiones.....	37
2.6.	Literatura citada.....	37

CAPÍTULO III. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE CONSIDERANDO DIFERENTES ESCENARIOS DE USO DEL SUELO

RESUMEN	41
ABSTRACT	41
3.1.	Introducción.....	42
3.2.	Materiales y métodos.....	43
3.2.1.	Área de estudio.....	43
3.2.2.	Materiales.....	46
3.2.3.	Tormenta diseño.....	46
3.2.4.	Hidrograma unitario.....	48
3.2.5.	Hidrograma unitario sintético (HUS-SCS).....	50
3.2.6.	Método de la curva numérica (CN-SCS).....	52
3.2.7.	Tránsito de avenidas en cauces (Muskingum).....	53
3.2.8.	Preparación del modelo HEC-GeoHMS.....	54
3.2.9.	El modelo HEC-HMS.....	55
3.2.9.1.	Modelación del escurrimiento.....	56
3.2.9.2.	Especificaciones de la simulación.....	57
3.3.	Resultados y discusión.....	57
3.3.1.	Procesamiento en el SIG: HEC-GeoHMS.....	57
3.3.2.	Tormenta diseño y precipitación máxima seleccionada.....	58
3.3.3.	Modelación del escurrimiento en HEC-HMS.....	59

3.3.3.1.	Curva numérica, tiempo de retraso y valores del método Muskingum.....	59
3.3.4.	Escorrentía superficial.....	61
3.3.5.	Análisis estadístico.....	64
3.4.	Conclusiones.....	65
3.5.	Literatura citada.....	66
 CAPÍTULO IV. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES.....		71
4.1.	Literatura citada.....	73

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

Cuadro 1.1.	Algunos modelos empleados en el estudio de cuencas en diferentes partes del mundo.....	12
-------------	--	----

CAPÍTULO II

Cuadro 2.1.	Características de las imágenes de satélite empleadas.....	24
Cuadro 2.2.	Indicadores de cambio empleados.....	28
Cuadro 2.3.	Tasas de cambio anual por tipo de cobertura para los periodos considerados en el estudio.....	32
Cuadro 2.4.	Matrices de cambio (%) para los periodos P_1 , P_2 , P_3 y P_4	33
Cuadro 2.5.	Tasas de deforestación anual (%) para cada periodo de análisis.....	35

CAPÍTULO III

Cuadro 3.1.	Estaciones pluviométricas para la cuenca Río Grande.....	47
Cuadro 3.2.	Tipos de tormenta diseño del US SCS (1986).....	48
Cuadro 3.3.	Curva numérica empleada por cada tipo de vegetación y grupo de suelo y condición de humedad antecedente tipo II.....	53
Cuadro 3.4.	Parámetros principales de la cuenca Río Grande.....	58
Cuadro 3.5.	Precipitaciones máximas calculadas para las diferentes estaciones meteorológicas empleadas.....	58
Cuadro 3.6.	Curva numérica ponderada por subcuenca y tiempo de retraso para los cuatro escenarios.....	60
Cuadro 3.7.	Tránsito de avenidas mediante el método Muskingum.....	60
Cuadro 3.8.	Gastos máximos por subcuenca en el HEC-HMS.....	62
Cuadro 3.9.	Valores de $F_{calculada}$ y F_{tabla} para la prueba de hipótesis de homogeneidad de varianzas.....	65

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO I

Figura 1.1.	Análisis de cambio de uso del suelo mediante cadenas de Markov (Briceño, 2003).....	7
Figura 1.2.	El ciclo hidrológico (USDA, 1997).....	9

CAPÍTULO II

Figura 2.1.	Ubicación del área de estudio.....	23
Figura 2.2.	Imágenes de satélite empleadas en el estudio. A) Imágenes Landsat preparadas en falso color con las bandas 2-4-1. B) Mosaico de imágenes QuickBird para la cuenca del Río Grande.	25
Figura 2.3.	Mapas de vegetación y uso del suelo para cada fecha de análisis: A) imágenes clasificadas, B) mapas temáticos de referencia.....	30
Figura 2.4.	Porcentaje de área por cada tipo de vegetación y uso del suelo para las fechas de análisis.	31
Figura 2.5.	Diagrama de flujo que explica el proceso de deforestación para el periodo P ₄ (1973-2006).....	34
Figura 2.6.	Indicadores de cambio para el periodo 1973-2006.....	35
Figura 2.7.	Mapa de indicadores de cambio para el periodo 1973-2006.....	36

CAPÍTULO III

Figura 3.1.	Localización del área de estudio en su contexto hidrológico.....	44
Figura 3.2.	Detalle tridimensional de la cuenca del Río Grande.....	45
Figura 3.3.	Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service. A) Hidrograma unitario triangular. B) Hidrograma adimensional o curvilíneo.....	50
Figura 3.4.	Modelo hidrológico generado mediante la extensión HEC-GeoHMS e importado al HEC-HMS.....	55
Figura 3.5.	Hidrogramas a la salida de la cuenca para los años 1973, 1986, 2001, y 2006.....	63

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Presentación

Los cambios de uso del suelo tienen consecuencias preocupantes, ya que cuando se agregan globalmente afectan significativamente, muchas veces de manera negativa, los aspectos clave del funcionamiento del sistema terrestre; impactan directamente en la biodiversidad, en el cambio climático local y regional, en la degradación del suelo, alteran los servicios de los ecosistemas y afectan la capacidad de los sistemas biológicos para soportar las necesidades humanas (Lambin *et al.*, 2001).

La dinámica de uso del suelo dentro de una cuenca está determinada por las actividades de la población que habita en ella y repercute de manera directa y casi inmediata en el comportamiento de los escurrimientos superficiales. El cambio de uso puede ser de forestal a agrícola, de agrícola a urbano o de forestal a ganadero, etc. El estado de la cobertura vegetal dentro de la cuenca, especialmente en la parte alta, es de gran relevancia porque de ello depende el comportamiento y disponibilidad temporal del recurso hídrico en la parte baja.

Durante los últimos 20 años ha existido un avance considerable en el desarrollo de herramientas computacionales orientadas al estudio de los recursos naturales, desde técnicas estadísticas para el modelado de fenómenos, captación de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores satelitales, desarrollo de software para el procesamiento de dichas imágenes en el estudio de la cobertura, hasta el desarrollo e implementación de algoritmos que modelan el ciclo hidrológico en cuencas (Aspinall y Pearson, 2000).

Todas estas herramientas juegan un rol importante en el estudio de los recursos naturales, especialmente, en los incluidos en la cuenca: vegetación, suelo, y agua. Destacan las técnicas geomáticas, particularmente la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG), herramientas que resultan imprescindibles para llevar

a cabo el análisis espacio-temporal de los procesos de cambio de uso del suelo (Moizo-Marrubio, 2004).

En años anteriores, en la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero ha existido el problema de inundación ocasionado por eventos de precipitación extraordinarios en corto tiempo. Dentro de la problemática generada se encuentra la recurrente destrucción del puente que comunica dicha localidad con la región. Se cree que ha existido un cambio de uso del suelo en las partes altas de la cuenca modificando la capacidad de amortiguamiento a los efectos de la precipitación. En este sentido resulta importante el análisis de la cobertura a través del tiempo.

El trabajo que se reporta en esta tesis tiene como propósito analizar, espacial y temporalmente, la dinámica de uso del suelo en la cuenca del Río Grande, además de su impacto en el escurrimiento superficial. Está organizada en cuatro capítulos. Los Capítulos 1 y 4 aportan el marco conceptual y las conclusiones relevantes a la investigación realizada, mientras que los Capítulos 2 y 3 se presentan en formato de artículos científicos:

El Capítulo 1, “Introducción general” donde se aborda la temática general teórica referente a hidrología y bosques, el cambio de uso del suelo en México, el ciclo hidrológico y la modelación hidrológica.

El Capítulo 2, “Análisis de la dinámica de uso del suelo en la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero” reporta el estudio de la dinámica de uso del suelo en los años de 1973, 1986, 2001 y 2006: utilizando técnicas de clasificación supervisada de imágenes de satélite.

El Capítulo 3, “Modelación hidrológica de la cuenca del Río Grande considerando diferentes escenarios de uso del suelo” analiza el gasto pico de la cuenca utilizando el modelo HEC-HMS.

El Capítulo 4, “Discusión general y conclusiones” aborda y analiza las principales conclusiones de esta tesis.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Analizar la dinámica de uso del suelo en la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero a través del tiempo y su impacto en el escurrimiento superficial.

1.2.2. Objetivos particulares

- Analizar la dinámica de cambio de uso del suelo en los años 1973, 1986, 2001 y 2006.
- Modelar el proceso lluvia-escurrimiento para los escenarios seleccionados de uso del suelo.

1.3. Revisión de Literatura

1.3.1. Agua y bosques (cobertura vegetal y/o uso del suelo)

A inicios del siglo XXI, el agua del mundo se encuentra bajo más presión que en cualquier otro tiempo durante la existencia de este planeta (Rodda, 2001). El agua es considerada como un elemento crítico en el desarrollo de las naciones, y quizá sea el recurso que define los límites del desarrollo sustentable; no sólo es indispensable para el desarrollo económico y social de la humanidad sino también para el funcionamiento de los ecosistemas del planeta.

Desde la antigüedad el hombre ha tratado de entender el impacto de la cubierta del suelo, particularmente del bosque en el ciclo hidrológico. En el siglo I a.C Plinio El Viejo descubrió que la corta de árboles en primavera provocaba inundaciones en el verano. Durante la revolución francesa hubo un fuerte debate sobre el análisis del agua y bosque entre los científicos, donde tuvo gran relevancia la deforestación y las inundaciones (Andréassian, 2004). Desde entonces la relación entre el agua y el bosque tiene diversos enfoques en relación a los diferentes efectos que se presentan en la deforestación y reforestación. Por un lado la deforestación incrementa la “producción de agua” superficial, disminuye el flujo base, incrementa picos en el gasto y provee volúmenes para inundaciones. Contrariamente, la reforestación disminuye la producción de agua superficial, aumenta el flujo base, evita inundaciones y desgajamiento de montañas. Entonces analizar qué situación es la deseada en la cuenca será primordial para poder enfocar el estudio hacia una relación específica de cobertura arbórea flujo-hídrico. En el caso particular de evaluar un cambio en la cuenca respecto al uso del suelo se tendría que establecer la relación entre la lluvia-escurrimiento (Calder, 2002).

Hornbeck *et al.* (1993) mostraron que el impacto de tratamientos al bosque en inundaciones grandes fue diferente de acuerdo a la estación: cortar durante la estación de crecimiento, incrementó la inundación pico de 15 a 60% y la redujo de 2 a 40% durante la estación de invierno. Sin embargo, este efecto fue mucho más variable que el efecto del flujo total y podría incluso invertirse en algunos años o en algunas estaciones. La deforestación de un bosque incendiado y un bosque cortado no tiene el mismo impacto. El fuego desnuda completamente el suelo y la temperatura extrema puede generar cambios en su superficie, mientras que cortar el bosque crea una protección a partir de los árboles derribados para que las condiciones apenas sean favorables para el escurrimiento superficial.

El comportamiento hidrológico en una cuenca depende en gran medida de la variabilidad del clima (Cosandey *et al.*, 2005), ya que éste permite que el ciclo hidrológico esté en constante reproducción, por lo que existe una dependencia natural

entre el agua y el bosque. Así las actividades que se realicen en la cuenca tendrán respuesta en lo que se produce en ella. De las diversas coberturas del suelo que existen en la cuenca una de las principales es la del bosque.

Para el manejo eficiente del agua es imprescindible demostrar y pronosticar cómo los diversos usos de la tierra afectan el recurso agua (Jewitt *et al.*, 2004). El uso de la tierra en su función hidrológica permite analizar a la lluvia que cae dentro de la cuenca en dos componentes principales: (1) la lluvia que cae en forma líquida y es afectada por su proceso fisiológico ya sea en escurrimiento a través del flujo superficial y la que eventualmente corre fuera de la cuenca, y (2) el agua que se pierde por el proceso de evapotranspiración a través de la intercepción por la vegetación y luego esta se evapora fuera de los cuerpos de agua y otras superficies y finalmente escapa de la cuenca en forma gaseosa (Falkenmark, 2003).

1.3.2. El cambio de uso del suelo en México

El cambio de uso del suelo es un elemento básico en el cambio climático global, ya que altera ciclos biogeoquímicos como el del agua o el del carbono y provoca pérdida de la biodiversidad, entre otras cosas. En México ha existido un gran proceso de cambio de uso del suelo, donde los ecosistemas más afectados son los bosques y las selvas (Lambin *et al.*, 2001).

Velázquez *et al.* 2002 consultan diversos estudios de cambio de uso del suelo donde sostienen que la tasa de deforestación oscila entre 1 y 10.4% anual; sin embargo, también analizan los patrones y tasas de cambio de uso del suelo y encuentran que los bosques de coníferas tienen la mayor probabilidad de cambio a otros usos del suelo (80%) siguiéndole las selvas (10%).

1.3.3. Análisis de cambio de uso del suelo mediante percepción remota

La disponibilidad de archivos de imágenes de satélite a través del tiempo hace posible la investigación o detección de coberturas en diferentes fechas de análisis. Lo anterior se realiza mediante técnicas de clasificación supervisada, donde básicamente se trata de documentar espectralmente cada cobertura o uso de la tierra mediante campos de entrenamiento definidos previamente, de tal manera que se tenga la información estadística por cada banda espectral y poder hacer una clasificación definitiva de los píxeles de la imagen (Eastman, 2006).

Existen varios métodos de clasificación supervisada como el del paralelepípedo, la mínima distancia a la media, la distancia de Mahalanobis, no obstante el más utilizado y que mejores resultados arroja es el de máxima probabilidad. Este clasificador calcula la probabilidad de que un píxel pertenezca a cada clase; utiliza el vector de medias y la matriz de varianzas – covarianzas, y asigna cada píxel a la clase que maximice la función de probabilidad (Briceño, 2003; King *et al.*, 2005; Kandrika y Venkataratnam 2005; Dutta *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

Cuando las imágenes de satélite multiespectrales se han clasificado, se puede determinar el grado de error mediante datos de validación levantados en áreas conocidas.

Una manera clara de mostrar las tasas de conversión es comparar las tasas de cambio entre las diferentes coberturas. Las que muestran valores negativos indican que están perdiendo superficies, y viceversa (Velázquez *et al.*, 2002).

Los valores de probabilidad de cambio pueden ser explicados como un proceso estocástico (basado en probabilidades que cambian a través del tiempo) y expresados en cadenas de Markov, que describen de manera confiable la tasa de cambio entre las diversas formaciones en un periodo de tiempo equiparable (20 años), no obstante, para

estimar la probabilidad de cambio en periodos de cambio menores (anual) resulta poco confiable (Velázquez *et al.*, 2002).

Si se denota a la probabilidad de cambio de uso de la clase i a la j durante el intervalo de tiempo $(t, t+1)$ con el símbolo $p_{ij}(t, t+1)$, la Figura 1.1 muestra todas las posibilidades con sus propias probabilidades (probabilidades de transición) y las probabilidades condicionales, condicionadas por el estado previo o estado inicial.

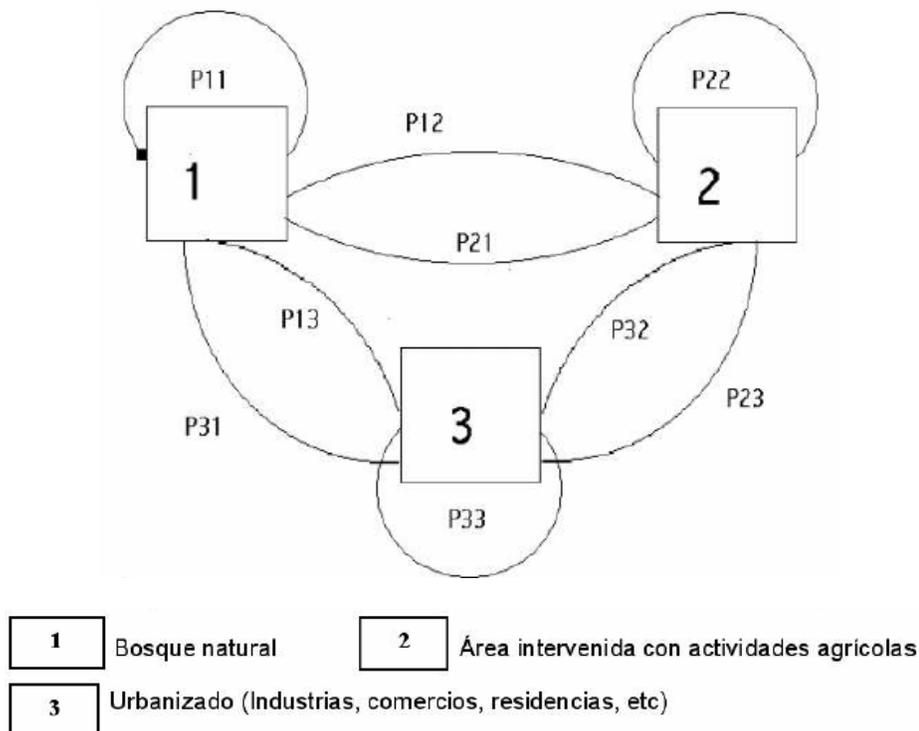


Figura 1.1. Análisis de cambio de uso del suelo mediante cadenas de Markov (Briceño, 2003).

Finalmente, los productos espaciotemporales obtenidos mediante técnicas de percepción remota (imágenes de satélite) son una herramienta muy útil en la parametrización de modelos ecológicos e hidrológicos (Bach *et al.*, 2003).

1.3.4. La cuenca y el ciclo hidrológico

Una cuenca es un área delineada por límites topográficos bien definidos y con una salida del agua. Es una región geográfica dentro de la cual las condiciones hidrológicas son tales que el agua se concentra en una ubicación particular (por ejemplo, un río o un reservorio) a donde la cuenca es drenada. A lo largo de la cuenca se pueden encontrar diversos tipos de suelo, formas de relieve, y usos del suelo los cuales son factores que determinan su comportamiento hidrológico. En otros términos, la cuenca es la unidad del análisis donde se llevan a cabo los procesos físicos que controlan la distribución y el movimiento del agua (ciclo hidrológico). En inglés los términos utilizados para nombrar a la cuenca - *watershed*, *catchment* y *basin* - son frecuentemente utilizados intercambiabilmente (Lal, 2000; McCuen, 2005).

Aunque no existe realmente un punto de partida o final en el ciclo hidrológico, se puede comenzar por la precipitación (McCuen, 2005); ésta cae primeramente en forma de lluvia o nieve. La cantidad, el tipo y la distribución estacional de la precipitación son los factores dominantes en la determinación del rendimiento y disponibilidad del agua en cualquier área, aunque no se descartan otro tipo de factores (Satterlund y Adams, 1992; Aparicio-Mijares, 2005).

Parte de la precipitación que cae, es retenida en la superficie y regresada a la atmósfera en forma de evaporación. El remanente puede escurrir sobre la superficie a los arroyos o infiltrarse al subsuelo. Parte o toda el agua que entra al suelo es retenida por las fuerzas capilares y puede ser evaporada directamente o absorbida por las raíces de las plantas y regresada a la atmósfera en forma de transpiración. Si mas agua entra al suelo y no puede ser retenida por las fuerzas capilares, el exceso se percola a través del suelo, y tarde que temprano llega a los arroyos en forma de escurrimiento subterráneo o llega como recarga al acuífero, donde posteriormente puede aflorar en forma de manantiales o mantener vivos a los arroyos en época de estiaje (Satterlund y Adams, 1992; Aparicio-Mijares, 2005) (Figura 1.2).

El ciclo hidrológico se puede dividir simplemente en cuatro partes: precipitación (P), escurrimiento superficial (ES), evapotranspiración (ET) y almacenamiento (A) en la atmósfera, o en el suelo y en los océanos. En forma de ecuación se tiene de la siguiente manera (Satterlund y Adams, 1992): $P = ES + ET + \Delta A$. Los cambios en almacenamiento pueden ser ignorados quedando la fórmula como sigue: $P = ES + ET$.

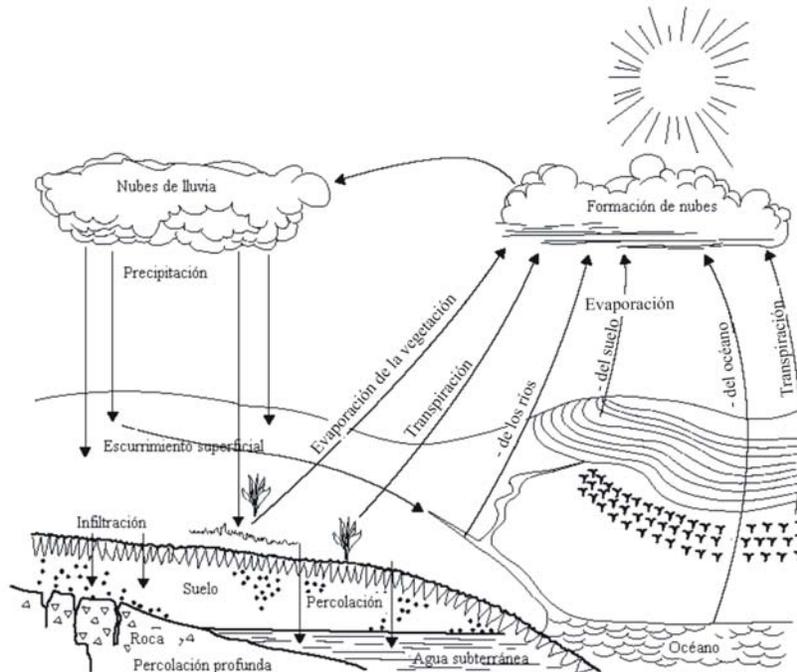


Figura 1.2. El ciclo hidrológico (USDA, 1997).

McCuen (2005) menciona que aunque aparentemente el ciclo hidrológico de un ambiente natural es estático, resulta importante reconocer que el paisaje está en constante cambio. Las tormentas de gran intensidad pueden causar erosión en la superficie terrestre. El escurrimiento proveniente de tormentas de gran volumen causa desbordamientos de los ríos y con un gran potencial de arrastre de sedimentos. Los incendios forestales causados por tormentas eléctricas o por el descuido del hombre se traducen en importantes decrementos en almacenamiento disponible y en la rugosidad de la superficie (Manning n) y por otro lado contribuyen a incrementar el escurrimiento y la erosión hídrica.

Con el aumento de la población, los cambios en la cubierta vegetal han sido significativos y como resultado de ello, un efecto en las características del escurrimiento de las cuencas. El cambio de uso del suelo con fines agrícolas incrementa la cantidad de suelo desnudo, con un obvio decremento en la cubierta protectora de la vegetación natural y por ende un decremento en el potencial de infiltración, así como un incremento en el escurrimiento superficial y producción de sedimento (Velázquez *et al.*, 2002; Valera-Venegas, 2006; Li *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007). La urbanización también ha tenido efectos significativos en el comportamiento del escurrimiento superficial, ya que al reducir el coeficiente de rugosidad aumenta la velocidad del flujo y disminuye el tiempo de concentración (Shi *et al.*, 2007).

Haddeland *et al.* (2007) analizaron el efecto de uso del suelo en el escurrimiento mediante un modelo hidrológico en escala macro para Norteamérica y Asia durante el periodo 1700-1992 y encontraron que para algunas regiones intracontinentales, las actividades humanas han alterado los regímenes hidrológicos profundamente. Por ejemplo, la construcción de presas en la parte oeste de los Estados Unidos y México ha resultado en un decremento del 25% en el escurrimiento en junio y un decremento del 9% en el escurrimiento promedio anual, que llega al Océano Pacífico. Mientras que en el área del sureste asiático que drena al Océano Pacífico, el cambio de uso del suelo ha causado un incremento en los volúmenes escurridos promedio anuales en un 12%.

En un intento por compensar esta pérdida de retención de agua por la cuenca, el hombre ha construido obras de conservación de agua y suelo, dentro de las que destacan las presas de almacenamiento, zanjas de infiltración, terrazas, etc. (McCuen, 2005).

Todo lo anterior forma parte del manejo integral de cuencas especialmente del recurso hídrico. Una herramienta fundamental es la modelación de cuencas que entre otras cosas, requiere de un equipo multidisciplinario, un profundo estudio de las características del área y el planteamiento de escenarios que describan *a priori* el impacto de las actividades del hombre (Zacharias *et al.*, 2003). Esto con el objetivo final

de proponer alternativas de manejo a la cuenca y desarrollar instrumentos para administrar racionalmente el recurso hídrico (Bormann *et al.*, 2005).

1.3.5. La modelación en cuencas

En general, la modelación en cuencas está diseñada principalmente para cumplir dos objetivos principales. El primero es entender mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca y cómo los cambios en ésta pueden afectar estos comportamientos. El segundo objetivo es la generación de datos hidrológicos sintéticos para facilitar entre otras cosas, la planeación del manejo de los recursos hídricos, la protección contra las inundaciones, la mitigación de contaminantes, los derechos de consumo de agua para la agricultura o uso industrial, etc. En este contexto, la modelación lluvia-escurrimiento resulta una herramienta trascendental para la investigación en hidrología aplicada (Hong, 2006). Sin embargo, dada la alta heterogeneidad en las cuencas y un comportamiento hidrológico dinámico y no lineal, la cuantificación del escurrimiento no resulta sencilla. La modelación adecuada requiere de un cierto nivel de entendimiento de las características físicas de la cuenca. No obstante, el problema se complica cuando no existe disponibilidad de mediciones del escurrimiento en la cuenca, lo que comúnmente se refiere a una cuenca sin datos (*ungauged catchment*) (Sivapalan *et al.*, 2003).

La unidad de análisis hidrológico es la cuenca; sin embargo, el área general se puede dividir en sub-unidades, típicamente llamadas unidades de respuesta hidrológica (URH). Este método de análisis es común y es empleado para reducir la complejidad del modelo. Una vez que las URH's se han definido, los procesos lluvia-escurrimiento dentro de cada unidad pueden ser parametrizados y modelados (Beighley *et al.*, 2005).

En el Cuadro 1.1 se presentan algunas referencias que muestran las aplicaciones de modelación en cuencas, esencialmente se centran en modelar el proceso lluvia escurrimiento y erosión, aunque algunos autores también han optado por analizar el tema desde el enfoque de cambio de uso del suelo y su efecto en estas variables.

Recientemente ha crecido el interés por integrar modelos hidrológicos con los de predicción de uso del suelo, para que los manejadores de los recursos puedan examinar los impactos de uso del suelo sobre las características de respuesta de una cuenca específica (McColl y Aggett, 2006).

Cuadro 1.1. Algunos modelos empleados en el estudio de cuencas en diferentes partes del mundo.

Modelo	País de creación	País de aplicación	Aplicación	Información relevante	Referencia
PROMET	Alemania	Italia	Balance hídrico	Parametrización Landsat-TM	Bach <i>et al.</i> (2003)
WaterGAP 2	Alemania	Alemania	Balance hídrico global	150 países: análisis de disponibilidad y consumo	Alcamo <i>et al.</i> (2003)
HEC-HMS / HEC-GeoHMS SWBM (Spatial Water Budget Model)	USA - US Army Corps of Engineers	Jordan	Cuenca del Río Zarga	Comparación de modelos, recomendando HEC-HMS. Ambos fueron calibrados.	Al-Abed <i>et al.</i> (2005)
	University of Florida CIAT – Colombia				
HEC-HMS / HEC-RAS	USA - US Army Corps of Engineers	USA	Proceso lluvia-escurrimiento y tormenta de inundación	Datos de precipitación: RADAR	Knebl <i>et al.</i> (2005)
HEC-HMS / HEC-GeoHMS	USA - US Army Corps of Engineers	WA, USA	Efecto del cambio de uso del suelo en el escurrimiento		McColl y Aggett (2006)
SWMM (Storm Water Management Model)	EPA - USA	Italia	Efecto del cambio de uso del suelo en el escurrimiento	Fechas de análisis: 1955-1980-1992	Camorani <i>et al.</i> (2005)
Curva Numérica (CN) y Cuantificación de sedimento (MUSLE) implementados en un SIG	USA (Wischmeier y Smith, 1978) (USDA, 1964)	India	Escurrecimiento y Sedimento		Kandrika y Venkataratnam (2005)
Curva Numérica (CN) y Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) implementados en un SIG	USA (Wischmeier y Smith, 1978) (USDA, 1964)	India	Efecto del cambio de uso del suelo en el escurrimiento		Chakraborty <i>et al.</i> (2005)
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	USA - USDA	Alemania	Efecto del cambio de uso del suelo en el escurrimiento	Aumento en flujo pico por cambio de bosque a pastizal	Fohrer <i>et al.</i> (2001)
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	USA - USDA	Corea	Efecto del clima, consumo de agua y proporción de área urbana en el escurrimiento en época de sequía		Lee y Chung (2007)
USLE (Universal Soil Loss Equation) WEPP (Water Erosion Prediction Project) TOPOG (Physically Based Hydrologic Modelling Package)	USA (Wischmeier y Smith, 1978)	Australia	Modelación del escurrimiento y erosión en bosques cosechados	Comparación de los tres modelos	Croke y Nethery (2006)
	USA (Purdue University)				
	Australia - CSIRO Land and Water y Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology				
STREAM-TED (Runoff and erosion model)	Francia – BRGM Research Programme	Francia	Modelación del escurrimiento y erosión en terrenos agrícolas	Incorpora el uso de imágenes de satélite	King <i>et al.</i> (2005)

Beven (2000) comenta textualmente: “*es virtualmente imposible para cualquier persona estar al tanto de todos los modelos que se han reportado en la literatura*” y Hong (2006) lo interpreta como la existencia de un gran esfuerzo encaminados al desarrollo de este tema.

Hong (2006) menciona que los modelos lluvia-escorrentamiento se pueden clasificar en tres tipos principales:

- Físicos o de caja blanca (“*Physically-based, white box*”): Se basan en leyes físicas que incluyen un conjunto de ecuaciones de conservación de la masa, momento, y energía para describir la física del mundo real que gobierna a la naturaleza.
- Conceptuales o de caja gris (“*Conceptually-based, grey box*”): Consideran leyes físicas pero en una forma simplificada y son capaces de explicar el comportamiento hidrológico mediante expresiones empíricas.
- Empíricos o de caja negra (“*Empirically-based, black box*”): Estos contienen parámetros que toman en cuenta características físicas permitiendo el modelado entrada-salida basados en empirismo. Ejemplo de ello son, el hidrograma unitario, el método racional, los cuales son explicados en detalle por Chow *et al.*, (1994).

Desde el punto de vista espacial, los modelos pueden clasificarse como agregados (“*lumped*”) y distribuidos. El modelo hidrológico tradicional es el modelo agregado (“*lumped basin model*”), que asume que cada subcuenca (dentro de la cuenca) puede estar representada adecuadamente por un número de parámetros hidrológicos. Estos parámetros son una representación promedio ponderada de la subcuenca entera. El modelo hidrológico distribuido (“*grid or distributed based model*”) permite el análisis a un nivel de detalle de píxel o grid (Jonhson *et al.*, 2001). En la actualidad, este sistema de clasificación es muy popular porque la subdivisión del sistema no es difícil mediante algunas técnicas modernas como los Sistemas de Información Geográfica o datos de alta resolución espacial como la Percepción Remota (Triviño y Ortiz, 2004).

1.3.6. El modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS por sus siglas en inglés "Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System" fue desarrollado por el United States Army Corps of Engineers (USACE) y está disponible libremente. Éste es un modelo hidrológico diseñado para simular el proceso lluvia-escorrentía en sistemas de cuenca dendríticos, es decir, está basado en eventos de lluvia e integra una variedad de métodos en la simulación del escurrimiento directo, flujo base, tránsito de avenidas y pérdidas por infiltración. El usuario puede seleccionar diferentes métodos basados según los datos existentes y generar estimaciones de la respuesta de la cuenca basadas en la forma de los hidrogramas de tormenta en ubicaciones específicas dentro de las subcuencas. La mayoría de los modelos hidrológicos no ofrecen este nivel de flexibilidad en los datos (Knebl *et al.*, 2005; McColl y Aggett, 2006).

HEC-HMS es un modelo de parámetros agregados con distribución espacial donde se puede subdividir el área de la cuenca en subcuencas que son aproximadamente homogéneas en uso de tierra, tipo de suelo y grupo hidrológico de suelo. El modelo proporciona numerosas opciones de modelación, básicamente enfocadas en la determinación de hidrogramas de escurrimiento de las subcuencas y el tránsito de hidrogramas a través de canales a la salida del área de estudio (McColl y Aggett, 2006).

Este sistema viene acompañado de una herramienta para el manejo de la información geográfica llamada GeoHMS desarrollada como una extensión del software ArcView 3.x. Dicha extensión sirve para generar el modelo de la red de drenaje y determinar las características físicas de la cuenca mediante el uso del modelo digital de elevación en formato raster, es decir, realiza el estudio topográfico automatizado del área de estudio, mediante el cálculo de las pendientes del terreno, la detección de la dirección de los cauces para la posterior delineación de las unidades de respuesta hidrológica (Olivera, 2001).

El modelo hidrológico resultante (*.basin) se parametriza posteriormente en el HEC-HMS con los datos de precipitación y uso del suelo ponderados a nivel de subcuenca. Finalmente, habiendo especificado todos los parámetros para dicho modelo, se puede correr el sistema y analizar los hidrogramas a la salida de las subcuencas.

Adicionalmente, este sistema permite al usuario escoger entre diversos parámetros de pérdida por infiltración. Sin embargo, solamente la técnica de la curva numérica en formato grid arroja cálculos de infiltración espacialmente distribuidos. La capacidad de infiltración se cuantifica con un parámetro derivado del Soil Conservation Service (SCS) llamado Curva Numérica (CN). El método CN es para determinar el escurrimiento de una tormenta sobre un área basado en el uso del suelo, tipo de suelo y grupo de suelo hidrológico (Knebl *et al.*, 2005).

1.4. Literatura citada

- Al-Abed, N., Abdulla, F. and Abu, K.A. 2005. GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environmental Geology*, 47:405–411.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T. and Siebert, S. 2003. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future “business-as-usual” conditions. *Hydrological Sciences*, 48(3):339-348.
- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291:1–27.
- Aparicio-Mijares, F. J. 2005. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa. México, D.F. 303 p.
- Aspinall, R. and Pearson, D. 2000. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: Linking landscape ecology, environmental modeling and GIS. *Journal of Environmental Management*, 59:299-319.
- Bach, H., Braun, M., Lampart, G. and Mauser, W. 2003. Use of remote sensing for hydrological parametrisation of Alpine catchments. *Hydrology and Earth Systems*, 7(6):862-876.
- Beven, K. 2000. *Rainfall - runoff modeling: The Primer*. John Wiley and Sons, 360 p.

- Beighley, R.E., Dunne, T. and Melack, J.M. 2005. Understanding and modeling basin hydrology: interpreting the hydrogeological signature. *Hydrological Processes*, 19:1333-1353.
- Bormann, H., Fab, T., Giertz, S., Junge, B., Diekkrüger, B., Reichert, B. and Skowronek, A. 2005. From local hydrological process analysis to regional hydrological model application in Benin: Concept, results and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 347–356.
- Briceño, F. 2003. Cambios de cobertura de la tierra en el valle del río Momboy, Estado Trujillo. *Geoenseñanza*, 8(1):91-100.
- Calder, I.R. 2002. Forests and hydrological services: Reconciling public and science perceptions. *Land Use and Water Resources Research*, 2:2.1–2.12.
- Camorani, G., Castellarin, A. and Brath, A. 2005. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30:561–574.
- Chakraborty, D., Dutta, D. and Chandrasekharan, H. 2005. Spatial modeling for hydrological response behaviour of an arid watershed, India - remote sensing and GIS approach. *Journal of Spatial Hydrology*, 5(1):47-66.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Ed. McGRAW-HILL Interamericana. Colombia. 584 p.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J. Folton, N., Mathys, N., and Richard, D. 2005. The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301:235–249.
- Croke, J. and Nethery, M. 2006. Modeling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models, *Catena*, 67:35–49.
- Dutta, S., Mishra, A., Kar, S. and Panigrahy, S. 2006. Estimating spatial curve number for hydrologic response analysis of a small watershed. *Journal of Spatial Hydrology*, 6(2): 57-67.
- Eastman, R.J. 2006. *Idrisi Andes, Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs. 327 p.
- Falkenmark, M. 2003. Water cycle and people: water for feeding humanity. *Land Use and Water Resources Research*, 3:3.1–3.4.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K. and Frede, G. 2001. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26 (7-8):577-582.

- Haddeland, I., Skaugen, T., and Lettenmainer, D.P. 2007. Hydrologic effects of land and water management in North America and Asia: 1700-1992. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11:1035-1045.
- Hong, Q.N. 2006. Rainfall-Runoff Modeling in the ungauged Can Le Catchment, Saigon River Basin. MSc Thesis in Geoinformation Science and Earth Observation. ITC. The Netherlands. 108 p.
- Hornbeck, J.W., Adams, M.B., Corbett, E.S., Verry, E.S., and Lynch, J.A. 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 150(2-4):323-344.
- Jewitt, G.P.W., Garrat, J.A., Calder, I.R. and Fuller, L. 2004. Water resources planning and modeling tools for the assessment of land use change in the Luvuvhu Catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29:1233-1241.
- Jonhson, C.A., Yung, A.C., Nixon, K.R. and Legates, D.R. 2001. The Use of HEC-GeoHMS and HEC-HMS To Perform Grid-based Hydrologic Analysis of a Watershed. Dodson & Associates, Inc. Computational Geosciences, Inc. Houston, Texas, USA. 4p.
- Kandrika, S. and Venkataratnam, L. 2005. A spatially distributed event-based model to predict sediment yield. *Journal of Spatial Hydrology*, 5(1):1-19.
- King, C., Lecomte, V., Le Bissonnais, Y., Baghdadi, N., Souchere, V. and Cerdan, O. 2005. Remote-sensing data as an alternative input for the 'STREAM' runoff model. *Catena*, 62:125-135.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K. and Maidment, D.R. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75:325-336.
- Lal, R. 2000. Integrated watershed management in the Global Ecosystem. Soil and Water Conservation Society. CRC Press. 211 p.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T.A., Vogel, C. and Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11:261-269.

- Lee, K.S. and Chung, E.S. 2007. Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and land use in a small Korean watershed. *Hydrological Processes*, in press.
- Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N. and De Jong, R. 2007. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 337:258-268.
- McColl, C. and Aggett, G. 2006. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, in press.
- McCuen, R. H. 2005. *Hydrologic analysis and design*. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Maryland. 3rd Edition. Prentice Hall. 859 p.
- Moizo-Marrubio, P. 2004. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. *Geofocus*, 4:1-24.
- Olivera, F. 2001. Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(6):524–530.
- Rodda, J.C. 2001. Water under pressure. *Hydrological Sciences*, 46(6):841-854.
- Satterlund, D.R. and Adams, P.W. 1992. *Wildland Watershed Management*. John Wiley & Sons. 2nd Edition. 224 p.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S. and Zehe, E. 2003. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences*, 48(6): 857- 880.
- Shi, P.J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J., Ge, Y. and Qiu, G.Y. 2007. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69:31–35.
- Tate, K.W. 1996. *Streamflow*. Rangeland Watershed Program. Fact Sheet. U.C. Cooperative Extension. U.S.D.A. Natural Resources Conservation Service. No. 38.
- Triviño, P.A. y Ortiz, R.S. 2004. Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos. Instituto Universitario de Geografía Universidad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 35:67-83.
- USDA. 1997. *National Engineering Handbook*. Part 630, Hydrology. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Chapter 1, Introduction. 7 p.

- Valera-Venegas, G. 2006. Dinámica del cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca del río Chico, Tulancingo, Hgo. Tesis. Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. UACH. 145 p.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J.L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, Instituto Nacional de Ecología, 62:21-37.
- Wang, G., Liu, J. Kubota, J., and Chen, L. 2007. Effects of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China. *Hydrological Processes*, 21:1370-1382.
- Wu, W., Hall, C.A.S., and Scatena, F.N. 2007. Modeling the impact of recent land-cover changes on the stream flows in northeastern Puerto Rico. *Hydrological Processes*, in press.
- Zacharias, I., Dimitriou, E., Koussouris, Th. 2003. Developing sustainable water management scenarios by using thorough hydrologic analysis and environmental criteria. *Journal of Environmental Management*, 69:401–412.

CAPÍTULO II. DINÁMICA DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, TLALCHAPA, GUERRERO

RESUMEN

Se presenta la metodología y los resultados obtenidos que documentan la dinámica de uso del suelo en una cuenca localizada en la región de Tierra Caliente en el municipio de Tlalchapa, Guerrero. Los usos del suelo fueron obtenidos mediante técnicas de clasificación supervisada en imágenes de satélite Landsat (1973, 1986, 2001) y digitalización en monitor sobre una imagen de alta resolución espacial QuickBird (2006). Los mapas temáticos obtenidos mediante imágenes Landsat no pudieron ser validados satisfactoriamente, mientras que el mapa digitalizado sobre la imagen QuickBird fue validado mediante visitas de campo. Las tasas anuales (%) de deforestación estimadas fueron: -0.47 (1973-1986), -0.11 (1986-2001), -0.99 (2001-2006) y -0.38 (1973-2006) siendo consideradas más bajas que las tendencias nacionales. Los resultados indican que existe una predisposición al cambio de la selva baja caducifolia y el bosque de encino con vegetación secundaria a pastizal producto de las actividades de ganadería caprina.

Palabras clave: Landsat, QuickBird, recursos naturales, Geomática.

ABSTRACT

This work studies land use change dynamics in a watershed located in the region named "Tierra Caliente" of Guerrero State, Mexico. Land use data were obtained using supervised classification techniques with Landsat imagery (1973, 1986 and 2001) and digitizing on screen by photointerpreting a QuickBird image (2006). Landsat based thematic maps were not sufficiently validated while the QuickBird based one was validated by field survey. The estimated deforestation rates (%) were as follows: -0.47 (1973-1986), -0.11 (1986-2001), -0.99 (2001-2006) and for the whole period -0.38 (1973-2006) which are smaller than national estimates. The results suggested a change trend from tropical deciduous and oak forest with secondary vegetation to grassland due to goat breeding.

Key words: Landsat, QuickBird, natural resources, Geomatics.

2.1. Introducción

El fuerte incremento en la degradación de los recursos naturales, durante los últimos 20 años ha provocado un marcado interés en analizar y modelar los efectos del cambio de uso del suelo. Se han desarrollado investigaciones enfocadas al ciclo del carbono (Hese *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006; Tan *et al.*, 2007; Woodbury *et al.*, 2007), a la modelación del paisaje (Gómez-Mendoza *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2006), a la degradación de tierra y a la desertificación (Cotler y Ortega-Larrocea, 2006; Sivakumar, 2007) y recientemente, como parte de la modelación hidrológica en cuencas (Thanapakpawin *et al.*, 2006; Valera-Venegas, 2006; Henríquez *et al.*, 2006; Shi *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007).

Estos esfuerzos de investigación recaen en analizar la dinámica de uso del suelo con el propósito de responder diversas interrogantes: ¿dónde y cuándo ocurre el cambio de uso del suelo?, ¿cuáles recursos y en cuánta extensión son afectados?, y finalmente una pregunta no menos fácil de responder, ¿Cuál ha sido la causa de dicho cambio?. Estas interrogantes fundamentales han sido abordadas mediante metodologías apoyadas en el uso de técnicas de percepción remota y análisis estadístico espacial (Sandoval y Oyarzum, 2004).

El bosque de encino (BQ) (*Quercus spp*) es uno de los ecosistemas que se puede encontrar en gran parte del territorio mexicano y generalmente se comporta como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas. Por su parte, la selva baja caducifolia (SBC) también es un ecosistema importante representando aproximadamente el 60% de la vegetación tropical existente en México. Ambos tipos de vegetación tienden a sus formas secundarias debido a la fuerte presión ejercida sobre ellos, ya sea por (1) un interés bioenergético o (2) por el cambio de uso del suelo para agricultura o pastoreo (Márquez-Linares *et al.*, 2005). Según Mas (1995), en 1980 casi la mitad de la superficie original de la SBC se había perdido debido a los cambios en el uso del suelo. Esta situación y sus efectos han sido ampliamente documentados en literatura diversa (Trejo y Dirzo, 2000; García-Romero *et al.*, 2005).

Dada la problemática actual de deterioro de las áreas arboladas, se presume que en la cuenca de estudio también se ha dado lugar a cambios en el uso del suelo con tendencia a la degradación de los recursos naturales dentro de los últimos 30 años. Para averiguar tal hipótesis se plantearon los siguientes objetivos: (1) producir mapas temáticos de vegetación y uso del suelo para los años 1973 (t_1), 1986 (t_2), 2001 (t_3), 2006 (t_4) mediante imágenes de satélite, (2) analizar la dinámica de cambio durante los periodos 1973-1986 (P_1), 1986-2001 (P_2), 2001-2006 (P_3) y 1973-2006 (P_4).

2.3. Materiales y métodos

2.2.1. Área de estudio

La cuenca bajo estudio pertenece al localmente denominado “Río Grande”. Se ubica al este de la cabecera municipal de Tlalchapa, en el estado de Guerrero (Figura 2.1); cuenta con un área de 11567.87 ha. El relieve se distribuye altitudinalmente con promedio de 866 m.s.n.m, en la zona baja es plano mientras que en la parte media y alta se presentan topofomas accidentadas con pendiente media de 30% (MDE-INEGI). La salida de la cuenca se localiza adyacente a la localidad de Villa Madero a una altitud de 400 m.s.n.m, mientras que los puntos más altos se ubican en los parajes denominados “El Mortero” y “Las Piñas” a una altitud aproximada de 1600 m.s.n.m. El tipo de suelo varía de fluvisol en las partes bajas de la cuenca hasta cambisol y litosol en las partes serranas. El clima es $Aw_0(w)$ que equivale a un cálido subhúmedo, con lluvias en verano; la temperatura media anual es de 28.3°C, registrándose una mínima de 24.2°C, la precipitación pluvial media anual alcanza los 1,300 mm (Trejo-Vázquez, 1999). Existen diferentes tipos de vegetación y uso del suelo variando respecto al gradiente altitudinal: bosque de encino, pastizal, selva baja caducifolia (Zepeda-Gómez y Velázquez-Montes, 1999) y agricultura de temporal.

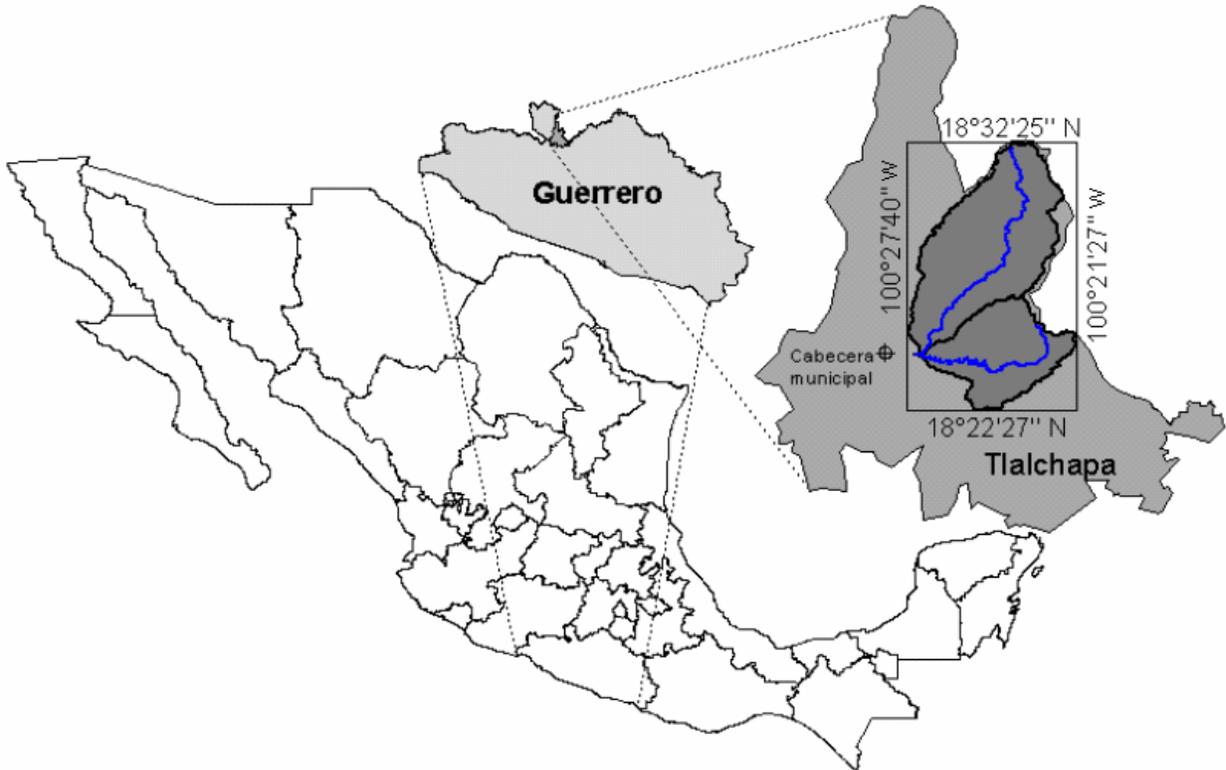


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.

2.2.2. Materiales

Se emplearon tres imágenes de satélite multiespectrales Landsat correspondientes a los años de análisis 1973, 1986, 2001 las cuales fueron obtenidas de los archivos digitales del Arizona Regional Image Archive (ARIA) <http://aria.arizona.edu/>, del Institute for Advanced Computer Studies de la University of Maryland <http://www.landcover.org/index.shtml>. Mientras que para el uso del suelo correspondiente al 2006 se emplearon imágenes de satélite QuickBird obtenidas del archivo <http://earth.google.es/> (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Características de las imágenes de satélite empleadas.

Año	Sensor	Bandas	ColumnasxRenglones	Ruta/Hilera	Fecha
1973	Landsat MSS 60 m BSQ	5	4058x3833	27/47	1973/11/23
1986	Landsat 5 TM 28.5 m Geotiff	6	7846x7420	27/47	1986/03/14
2001	Landsat 7 ETM+ 28.5 m Geotiff	6	8640x7753	27/47	2001/11/10
2006	QuickBird 2.5m JPG	3			2006/01/31

Las imágenes de 1986 y 2001 se encontraban a un nivel de procesamiento (2A), es decir corregidas geométricamente y registradas al sistema de coordenadas UTM-14n datum WGS84, mientras que la imagen 1973 tenía un nivel de procesamiento menor (1g). Esto implicó georeferenciar la imagen 1973 mediante el método imagen a imagen respecto a aquella tomada en 1986, para propiciar la correspondencia espacial de la base de datos en los diferentes periodos de análisis. Para ello se seleccionaron 24 puntos de control terrestre en una función polinómica de 2^{do} grado obteniendo con ello un RMSE de 0.2554 es decir menor a un píxel siendo suficiente para efecto de la sobreposición cartográfica de los mapas temáticos. Como método de remuestreo se empleó el del vecino más cercano (nearest neighbor). Dado que la metodología empleada para la detección de cambios en este estudio fue “post-clasificación”, no existió la necesidad de estandarizar radiométricamente las imágenes Landsat (Figura 2.2).

A)

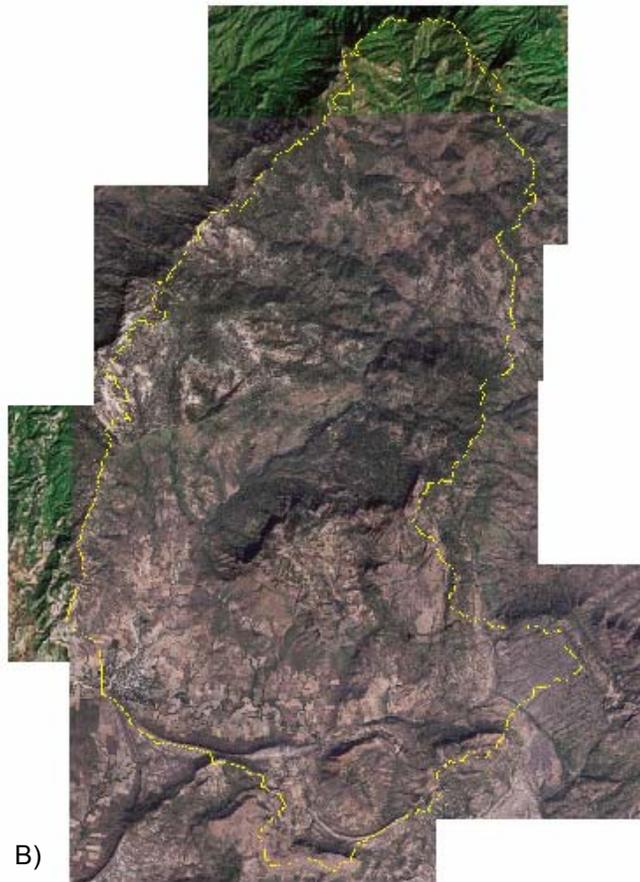
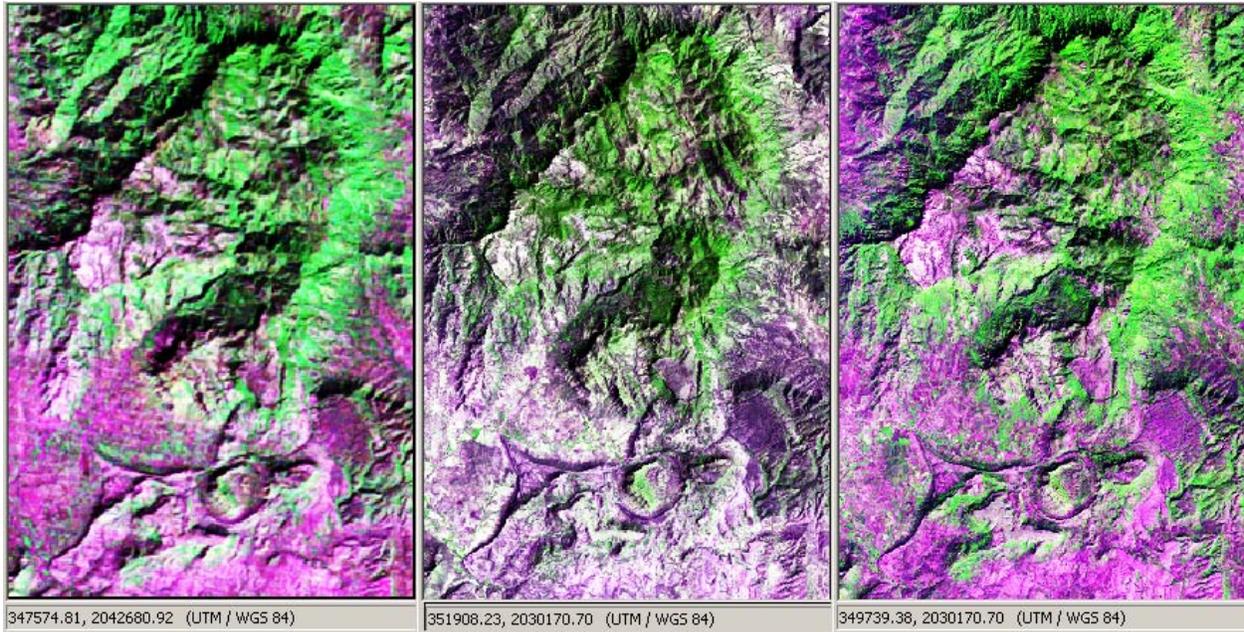


Figura 2.2. Imágenes de satélite empleadas en el estudio
A) Imágenes Landsat preparadas en falso color con las bandas 2-4-1,
B) Mosaico de imágenes QuickBird para la cuenca del Río Grande.

La imagen 2006 recibió un tratamiento diferente. Dado que no estaban disponibles los archivos para su descarga como tal, se construyó un mosaico mediante la impresión digital de pantalla a escala 1:20,000 y se georeferenciaron las imágenes de la cuenca en el mismo sistema de referencia. Para ello se emplearon 12 puntos de control terrestre por mosaico, una función polinómica de 2^{do} grado obteniendo un RMSE de 5 m y como método de remuestreo el del vecino más cercano.

2.2.3. Generación de los mapas de cobertura

Las imágenes de satélite Landsat 1973, 1986 y 2001 fueron clasificadas mediante el software ERDAS Imagine 8.4 con el procedimiento de máxima verosimilitud. Se realizó un recorrido de campo para la creación de campos de entrenamiento para cada cobertura: (1) bosque de encino (BQ), (2) bosque de encino con vegetación secundaria (BQVS), (3) selva baja caducifolia (SBC), (4) selva baja caducifolia con vegetación secundaria (SBCVS), (5) pastizal (PZ) y (6) agricultura de temporal (AT).

La imagen QuickBird 2006 fue procesada de manera diferente. Una resolución espacial mejorada (2.5 m) y el aumento en el nivel de detalle captado por este sensor sugieren utilizar el enfoque orientado a objetos ya que las técnicas de clasificación basadas en la caracterización estadística de píxeles unitarios no funcionan en este tipo de casos (Lewinski y Zaremski, 2004; Oruc *et al.*, 2004); por lo que las coberturas presentes en la imagen fueron digitalizadas en monitor y retroalimentadas con datos obtenidos mediante salidas de campo.

Dada la alta resolución espacial de esta imagen, se pudo detectar el área correspondiente a la localidad de Villa Madero, quedando desequilibrada la leyenda respecto a la de las clasificaciones supervisadas en donde no fue posible detectar este tipo de uso del suelo. Para abordar dicho problema, se segregó esta área en todas las imágenes para tener una misma superficie de referencia en todas las fechas de análisis.

Los mapas temáticos obtenidos de la clasificación de las imágenes Landsat y la digitalización en monitor fueron validados mediante cartografía digital existente de INEGI (1980) y del Inventario Nacional Forestal (2000). Para ello se crearon matrices de confusión a partir de una muestra al 5% de intensidad (25640 unidades) en toda el área de estudio (Valera-Venegas, 2006). En estas matrices se evaluó el error de comisión que representa la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase, pero que en realidad pertenece a otra categoría; mientras que el error de omisión se refiere a la proporción de sitios de verificación correspondiente a una categoría que fue cartografiada en otra (Mas *et al.*, 2003).

2.2.4. Dinámica de uso del suelo

El análisis de cambios se realizó para cuatro periodos parciales: P₁ 1973-1986, P₂ 1986-2001, P₃ 2001-2006 y para el periodo completo P₄ 1973-2006. Para tal propósito se estimó lo siguiente: (1) Tasa de cambio. Este indicador revela el porcentaje de cambio porcentual anual para cada categoría en ambas fechas de análisis. (2) Matriz de cambio. Es una matriz que indica la cantidad de cambio entre dos fechas para cada categoría y resulta de la tabulación cruzada de las clasificaciones de uso del suelo. La diagonal de la matriz indica la superficie que se mantuvo en ambas fechas mientras que los demás valores representan la superficie que sí cambió. (3) Tasa de deforestación. Es un indicador porcentual de cambio anual de una cobertura leñosa a una situación diferente: agricultura, pastizal, urbano, suelo desnudo, etc. Se calculó con la fórmula propuesta por Palacio-Prieto *et al.* (2004): $Td = ((S_2/S_1)^{(1/n)} - 1) * 100$ donde Td= tasa de deforestación anual en porcentaje, S₂= área arbolada en el año final, S₁= área arbolada en el año inicial, n = número de años del periodo de análisis. (4) Mapa de indicadores de cambio. Este mapa se elaboró de acuerdo a la metodología de Palacio-Prieto *et al.* (2004), donde mencionan que las áreas se pueden recategorizar con los siguientes criterios: (1) área conservada, (2) área deforestada, (3) área revegetada, (4) área degradada, (5) área por actividad productiva, (6) área en descanso, (7) área sin cambio y (8) falso cambio.

En el Cuadro 2.2 se muestra la codificación de los indicadores sugeridos por Palacio-Prieto *et al.*, 2004 y empleados en la calificación del tipo de cambio específico por cobertura.

Cuadro 2.2. Indicadores de cambio empleados.

	AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS
AT	SIN CAMBIO	FALSO CAMBIO	FALSO CAMBIO	DESCANSO	FALSO CAMBIO	REVEGETADA
BQ	DEFORESTADA	CONSERVADA	DEGRADADA	DEFORESTADA	FALSO CAMBIO	FALSO CAMBIO
BQVS	DEFORESTADA	CONSERVADA	CONSERVADA	DEFORESTADA	FALSO CAMBIO	FALSO CAMBIO
PZ	PRODUCCION	REVEGETADA	REVEGETADA	SIN CAMBIO	FALSO CAMBIO	FALSO CAMBIO
SBC	DEFORESTADA	CONSERVADA	CONSERVADA	DEFORESTADA	CONSERVADA	DEGRADADA
SBCVS	DEFORESTADA	FALSO CAMBIO	FALSO CAMBIO	DEFORESTADA	FALSO CAMBIO	CONSERVADA

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Mapas temáticos obtenidos y validación

En la Figura 2.3 se presentan los mapas temáticos obtenidos a partir de las imágenes de satélite MSS 1973, TM 1986, ETM 2001 y QuickBird 2006; para propósito de comparación y validación se presenta la cartografía existente para los años 1980 de INEGI (INEGI, 1980), 1994 y 2000 del Inventario Forestal Nacional las cuales fueron elaboradas a una escala 1:250,000.

Para que un mapa temático sea validado satisfactoriamente se debe tener una exactitud superior a 0.8, sin embargo, ese valor a nivel general (en todas las clases) no fue posible de obtener debido a la baja calidad de los mapas de referencia, ocasionada principalmente por la alta inconsistencia (error de etiquetado y pobre detalle de las bases de datos disponibles). Esto se reflejó en la baja exactitud obtenida (0.50) a nivel general mediante las matrices de confusión entre los mapas elaborados y los mapas de referencia generados por instancias oficiales. No obstante, la exactitud obtenida a nivel cobertura varió considerablemente, donde la más alta (0.94) fue alcanzada por la agricultura de temporal (AT) digitalizada en la imagen QuickBird 2006; mientras que en las fechas anteriores para la misma categoría la exactitud estuvo ligeramente arriba de 0.6. Ordenando de manera descendente las coberturas con base en su exactitud, el

bosque de encino (BQ) figuró en segundo lugar con un valor cercano a 0.7 en todas las fechas de análisis; mientras que el pastizal (PZ) obtuvo una exactitud superior al 0.6 en los dos mapas temáticos generados, de fecha más recientes: 2001 y 2006.

A pesar de la pobre validación alcanzada en el estudio, sustentada en la comparación con mapas temáticos oficiales, el mapa de cobertura (2006) elaborado mediante la digitalización en pantalla de la imagen QuickBird fue el más confiable, dado que fue corroborado mediante visitas de campo, reduciendo con ello el error al mínimo.

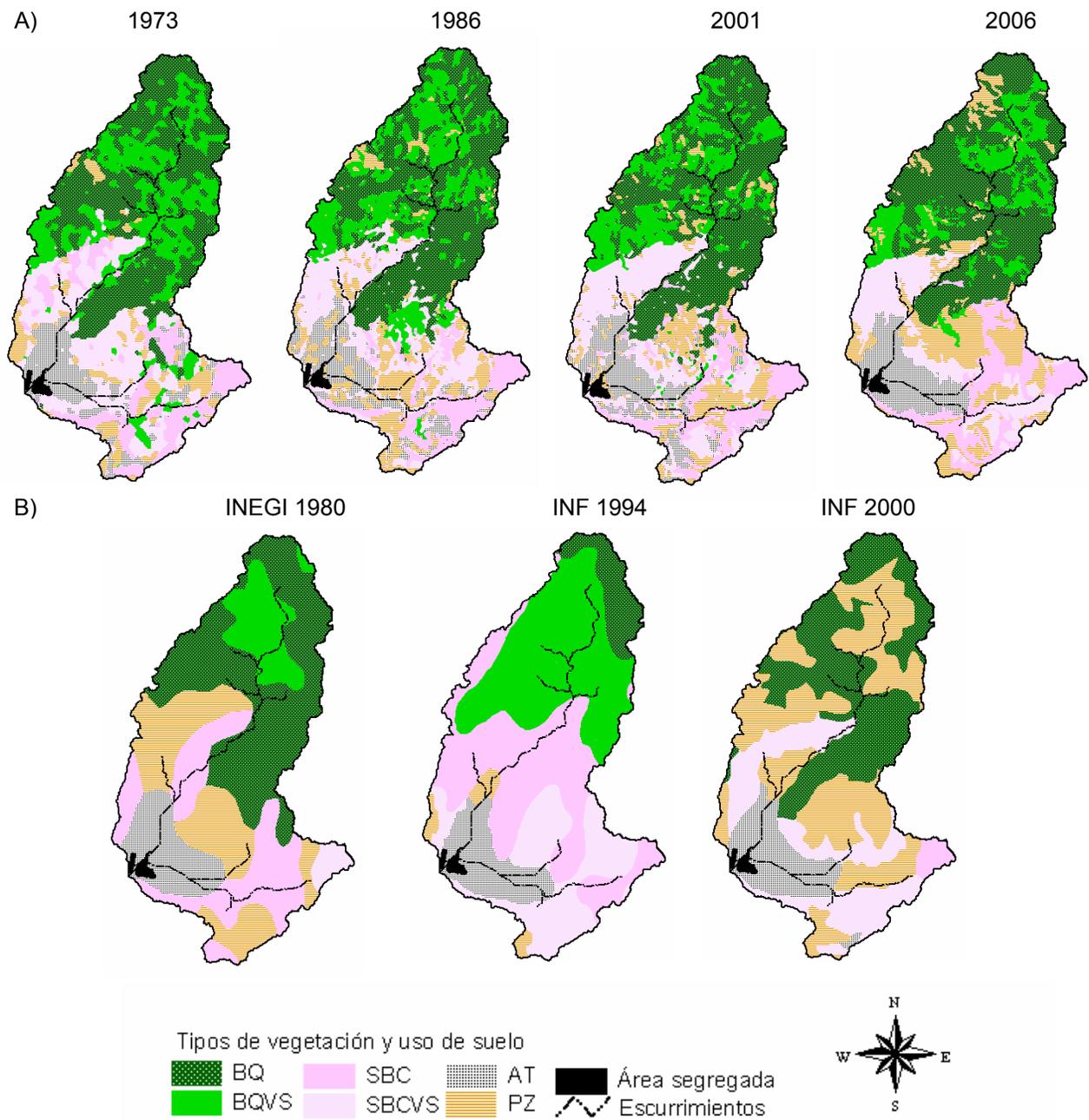


Figura 2.3. Mapas de vegetación y uso del suelo para cada fecha de análisis: A) imágenes clasificadas, B) mapas temáticos de referencia.

2.4.2. Análisis de cambio

Dado que el área de estudio se encuentra localizada en una zona de transición entre la vegetación propia de la cuenca del Medio Balsas y la región Neovolcánica Central, fue posible encontrar coberturas pertenecientes al clima templado (BQ) y calido (SBC) y sus respectivas formas perturbadas (con vegetación secundaria). El tipo de cobertura predominante en todas las fechas de análisis fue el bosque de encino (BQ), siguiéndole el bosque de encino con vegetación secundaria (BQVS) y en un menor grado la selva baja caducifolia con vegetación secundaria (SBCVS). Estos tipos de vegetación responden a la eminente aptitud forestal de la cuenca y con un sensible impacto antropogénico reflejado en la presencia de vegetación secundaria. Mientras que en las partes bajas y cercanas al núcleo poblacional se evidenció la presencia de agricultura de temporal (AT) (Figura 2.4).

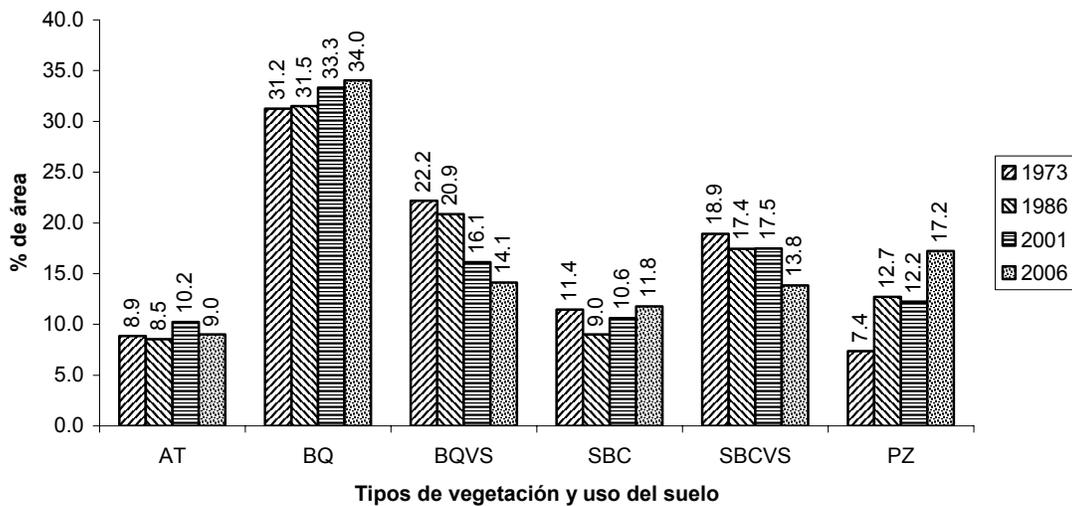


Figura 2.4. Porcentaje de área por cada tipo de vegetación y uso del suelo para las fechas de análisis. Área total: 11567.87 ha.

En la Figura 2.4 también se puede observar la tendencia de cada cobertura a través del tiempo. El bosque de encino registró un ligero incremento en superficie desde un 31% hasta un 34% respecto al total en las cuatro fechas de análisis. La agricultura de temporal se mantuvo constante en las cuatro fechas de análisis. Por otro lado el pastizal fue la cobertura que registró los incrementos más altos (7.4 – 17.2%). Otras

coberturas con vegetación secundaria como el bosque de encino y la selva baja caducifolia tuvieron una disminución en su superficie.

En el Cuadro 2.3 se presentan las tasas de cambio correspondientes a los diferentes periodos de análisis. La cobertura que ganó más superficie fue el pastizal, pasando de 4 a 7%. Las coberturas arbóreas con vegetación secundaria mostraron una tasa negativa, es decir, una disminución en su superficie. Mientras que las coberturas arbóreas sin vegetación secundaria revelaron un ligero aumento según su tasa de cambio anual.

Cuadro 2.3. Tasas de cambio anual por tipo de cobertura para los periodos considerados en el estudio. (Área total: 11567.87 ha).

Año	Tasas de cambio anual (%)			
	1973-1986	1986-2001	2001-2006	1973-2006
Vegetación	(P ₁)	(P ₂)	(P ₃)	(P ₄)
AT	-0.29	1.22	-2.49	0.06
BQ	0.06	0.38	0.43	0.26
BQVS	-0.47	-1.69	-2.62	-1.36
SBC	-1.82	1.09	2.11	0.08
SBCVS	-0.63	0.02	-4.56	-0.94
PZ	4.27	-0.24	7.05	2.60

Las matrices de cambio de uso del suelo para cada periodo de análisis (P₁, P₂, P₃, P₄) se presentan en el Cuadro 2.4. En ellas se indica de manera detallada la dinámica observada en la Figura 2.4 por cada tipo de coberturas. La diagonal de la matriz representa el porcentaje de cobertura que se mantuvo sin cambio. En los cuatro periodos se encontraron los valores más altos en la diagonal, interpretándose ya sea como (1) una tendencia a la permanencia y/o (2) una consistencia entre los pares de mapas de cobertura en cada fecha de análisis.

El proceso de deforestación se explica mediante el cambio de las coberturas de selva baja caducifolia a agricultura de temporal y pastizal, mientras que para el bosque de encino sólo se dio el cambio hacia pastizal. Ello explica la alta ganancia de superficie del pastizal, detectada en la Figura 2.4 para el periodo P₁. No obstante, también se

detectó un cambio de sentido con el binomio pastizal-agricultura registrándose la apertura de terrenos de cultivo en áreas que se encontraban en descanso.

Cuadro 2.4. Matrices de cambio (%) para los periodos P₁, P₂, P₃ y P₄. (Área total: 11567.87 ha).

P ₁		Después 1986						
Antes		AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS	Total
1973	AT	4.91	0.01	0.05	1.00	0.67	1.89	8.53
	BQ	0.00	20.57	9.66	0.08	0.58	0.59	31.49
	BQVS	0.05	8.67	8.94	0.71	0.26	2.21	20.85
	PZ	2.54	0.70	0.69	4.08	0.69	4.01	12.69
	SBC	0.46	0.23	0.68	0.21	5.93	1.49	9.01
	SBCVS	0.89	1.07	2.14	1.29	3.31	8.73	17.43
	Total	8.85	31.25	22.17	7.37	11.44	18.92	100.00

P ₂		Después 2001						
Antes		AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS	Total
1986	AT	5.18	0.02	0.10	3.40	0.37	1.13	10.21
	BQ	0.00	26.39	5.65	0.30	0.12	0.89	33.35
	BQVS	0.00	3.11	11.10	1.21	0.00	0.69	16.11
	PZ	1.55	0.59	2.91	4.69	0.76	1.73	12.23
	SBC	0.69	0.57	0.22	0.64	6.34	2.15	10.61
	SBCVS	1.06	0.81	0.89	2.44	1.41	10.88	17.49
	Total	8.49	31.50	20.87	12.68	9.00	17.46	100.00

P ₃		Después 2006						
Antes		AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS	Total
2001	AT	6.29	0.00	0.07	0.91	0.42	1.31	9.01
	BQ	0.00	25.51	6.27	1.01	0.17	1.09	34.05
	BQVS	0.00	5.28	7.18	1.28	0.20	0.20	14.14
	PZ	1.85	1.55	2.29	5.77	1.92	3.80	17.20
	SBC	1.01	0.79	0.15	1.60	5.55	2.66	11.77
	SBCVS	1.04	0.22	0.20	1.65	2.32	8.41	13.84
	Total	10.19	33.36	16.16	12.24	10.58	17.47	100.00

P ₄		Después 2006						
Antes		AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS	Total
1973	AT	6.02	0.00	0.00	0.20	0.17	2.61	9.00
	BQ	0.00	21.67	10.50	0.54	0.67	0.69	34.07
	BQVS	0.00	5.57	7.74	0.15	0.05	0.62	14.13
	PZ	1.45	2.64	1.80	3.55	2.10	5.70	17.23
	SBC	0.74	1.21	1.31	1.26	4.93	2.29	11.74
	SBCVS	0.64	0.15	0.81	1.68	3.53	7.03	13.83
	Total	8.85	31.24	22.16	7.37	11.44	18.93	100.00

En la Figura 2.5 se explican diferentes procesos de degradación detectados en los diferentes periodos de análisis. Para el P₄ (1973-2006) se presenta lo siguiente: (1) conversión de coberturas arboladas de bosque de encino y selva baja, natural y con vegetación secundaria a pastizal. (2) Otro cambio detectado fue de selva baja, natural y con vegetación secundaria, a agricultura de temporal. Es en esta parte donde se encuentra la dinámica del proceso de deforestación del periodo completo. Es posible mencionar que dadas las condiciones de baja humedad y difícil acceso al bosque de encino sólo se registró su cambio a pastizal.

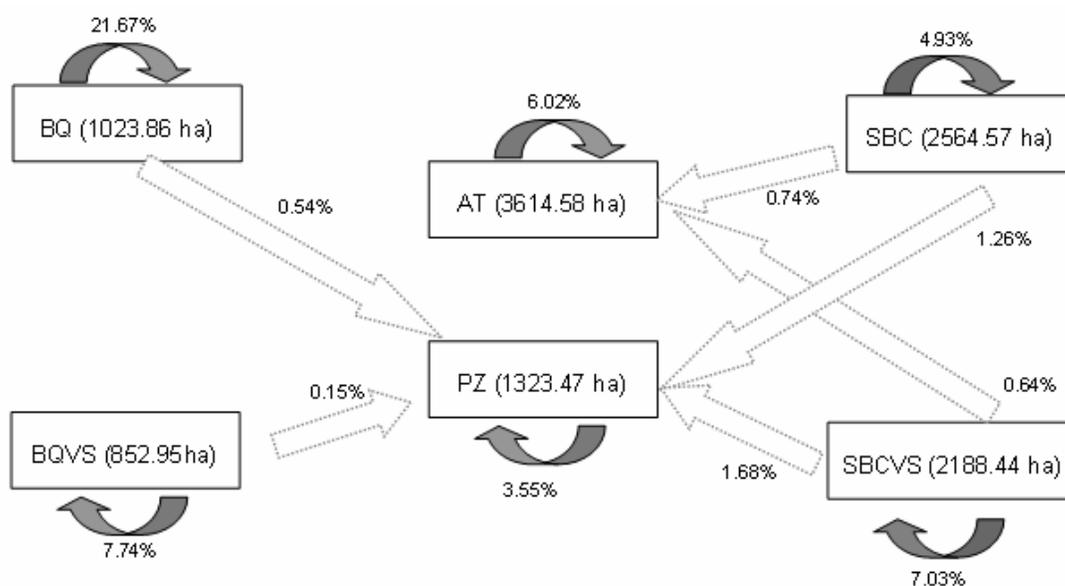


Figura 2.5. Diagrama de flujo que explica el proceso de deforestación para el periodo P₄ (1973-2006).

Por otro lado, las tasas de deforestación anual (Cuadro 2.5) estimadas con base en las matrices de cambio muestran un incremento en cada periodo de análisis. Velázquez *et al.* (2002) señalan que la existencia de inconsistencias en la amplitud temporal de los periodos de análisis tiene un efecto negativo en la estimación de la tasa de deforestación, alterando demasiado los resultados y volviéndolas incomparables entre sí. No obstante, en contexto con el estudio de los mismos investigadores, las tasas

aquí estimadas son relativamente pequeñas respecto a reportes para otras partes de la Republica Mexicana que oscilan entre el 1 y el 10 % anual.

Cuadro 2.5. Tasas de deforestación anual (%) para cada periodo de análisis.

Años de análisis	1973-1986	1986-2001	2001-2006	1973-2006
Amplitud temporal (años)	13	15	5	33
Periodo	(P ₁)	(P ₂)	(P ₃)	(P ₄)
Tasa de deforestación	-0.47	-0.11	-0.99	-0.38

Según el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2000) el municipio de Tlalchapa es considerado exportador de mano de obra a otras regiones, nacionales e internacionales. Este Consejo estimó con base en datos del XII Censo General de Población y Vivienda realizado en el 2000, que el municipio se ubica en un grado alto de intensidad migratoria hacia los Estados Unidos. Sin embargo, aunque buena parte de la población ha migrado hacia el norte, la gente restante sigue viviendo de los recursos naturales vía pastoreo ocasionando las tasas de deforestación anual obtenidas, que aunque son bajas sí tienen un efecto en el balance total de las superficies por cobertura

En las Figuras 2.6 y 2.7 se presenta la situación del cambio para el periodo más amplio (P₄) mediante el mapa de indicadores en la cuenca señalado en la metodología propuesta por Palacio-Prieto *et al.* (2004) y su cuantificación en porcentaje. Los resultados obtenidos indican un 52.65% del área total conservada corresponden a 6090.48 ha, un 15.03% de superficie deforestada en 33 años es decir 1738.65 ha, entre otros.

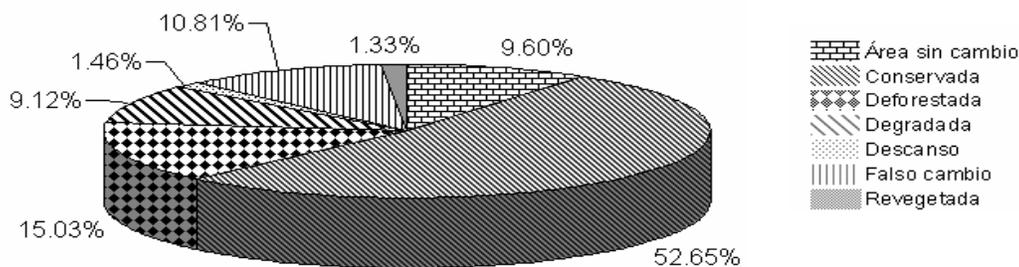


Figura 2.6. Indicadores de cambio para el periodo 1973-2006. Área total: 11567.87 ha.

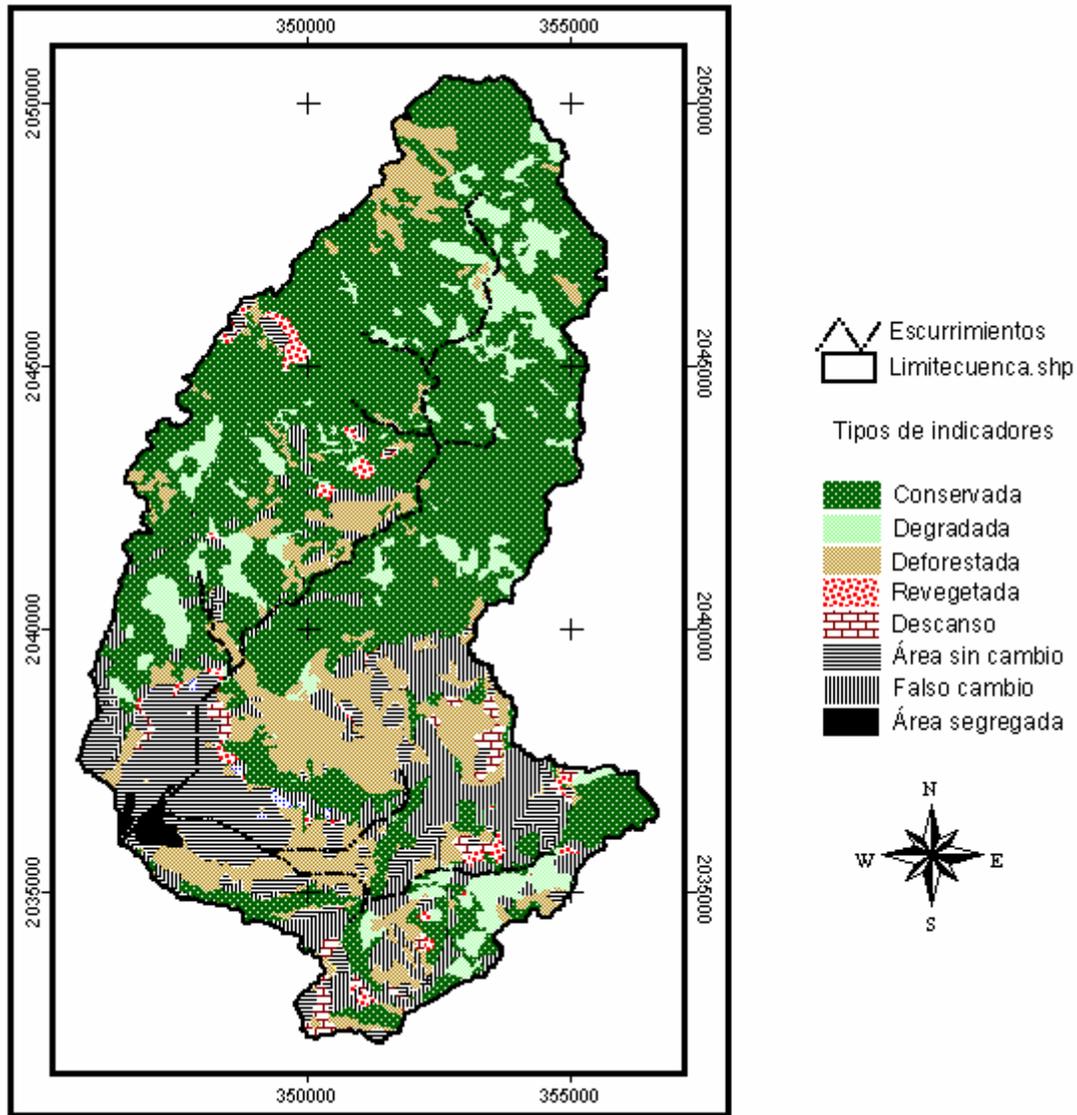


Figura 2.7. Mapa de indicadores de cambio para el periodo 1973-2006.

La deforestación podría explicarse por la conversión de áreas arboladas a zonas de pastoreo de ganado caprino. La distribución espacial de las coberturas conservadas obedece a las partes más alejadas coincidiendo con la escasa red caminera de la cuenca.

2.5. Conclusiones

Las coberturas obtenidas mediante las imágenes Landsat no fueron validadas satisfactoriamente debido a dos razones fundamentales: escaso nivel de detalle y errores detectados en el etiquetado en los mapas oficiales de referencia (escala 1:250,000). Mientras que el mapa obtenido de la imagen QuickBird fue digitalizado con el apoyo de visitas de campo. Los procesos de degradación detectados fueron: (1) la conversión de bosques de encino y selva baja, sin y con vegetación secundaria a pastizal y (2) conversión de selva baja, sin y con vegetación secundaria a agricultura de temporal. Dichos cambios explicaron el proceso de deforestación ocurrido a 1738.65 ha (15.03%) de la superficie total durante 33 años (1973-2006). Las condiciones de baja humedad y difícil acceso al bosque de encino determinaron el uso posterior de la cría extensiva de ganado caprino; mientras que en el caso de la selva baja caducifolia, una mejor disponibilidad de humedad y cercanía a las vías de acceso predispuso su cambio a agricultura de temporal.

2.6. Literatura citada

- CONAPO. 2000. Índice de intensidad migratoria México-Estados Unidos, por municipio. Consultado: 15-sep-2007. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/intensidadmig/CUA_AB_IIM2000.XLS
- Cotler, H. and Ortega-Larrocea, M.P. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico. *Catena*, 65:107–117.
- García-Romero, A., Mendoza-Robles, K.I., Galicia-Sarmiento, L. 2005. Valoración del paisaje de la selva baja caducifolia en la cuenca baja del río Papagayo (Guerrero), México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 56:77-100.
- Gómez-Méndoza, L., Vega-Peña, E., Ramírez, M.I. Palacio-Prieto, J.L. and Galicia, L. 2006. Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. *Applied Geography*, 26:276–290.

- Henríquez, C., Azócar, G., Aguayo, M. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36:61-74.
- Hese, S., Lucht, W., Schmullius, C., Barnsley, M., Dubayah, R., Knorr, D., Neumann, K., Riedel, T. and Schröter, K. 2005. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance — the Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment*, 94:94–104.
- INEGI. 1980. Carta de uso del suelo y vegetación. Mexico. Escala 1:1'000,000. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. Secretaria de Programación y Presupuesto.
- Lewinski, S., & Zaremski, K. 2004. Examples of object-oriented classification performed on high resolution satellite images. *Miscellanea Geographica*, 11:349-358.
- Liu, J., Liu, S., Loveland, T.R. 2006. Temporal evolution of carbon budgets of the Appalachian forests in the U.S. from 1972 to 2000. *Forest Ecology and Management*, 222:191–201.
- Márquez-Linares, M.A., Treviño-Garza, E.J. and Jurado, E. 2005. Reemplazo de áreas arboladas por chaparrales y comunidades herbáceas en el periodo 1970-2000 en una microcuenca de Durango, México. *Investigaciones Geográficas*, 58:54-65.
- Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Pérez-Vega, A. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 51:53-72.
- Mas, J.F. 1995. Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. In; Bullock, S.H., Mooney, H.A. and Medina, E. *Seasonally dry forest*. Cambridge University Press. Great Britain. 9-32.
- Oruc, M., Marangoz, A.M., & Buyuksalih, G. 2004. Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands. *XXth ISPRS Congress Proceedings. Istanbul, Turkey. Commission*, 4:1118-1122.
- Palacio-Prieto, J.L., Sánchez-Salazar, M.T., Casado-Izquierdo, J.M., Propin-Frejomil, E., Delgado-Campos, J., Velázquez-Montes, A., Chias-Becerril, L., Ortiz-Alvarez, M.I., González-Sánchez, J., Negrete-Fernández, G., Gabriel-Morales, J. y Márquez-Huitzil, R. 2004. Indicadores para la caracterización y ordenamiento

- territorio. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México. 161 pp.
- Sandoval, V. and Oyarzum, V. 2004. Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Revista de Ciencias Forestales–Quebracho*, 11:9-21.
- Shi, P.J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J., Ge, Y. and Qiu, G.Y. 2007. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*. 69:31–35.
- Sivakumar, M.V.K. 2007. Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142:143–155.
- Tan, K., Piao, S., Peng, C. and Fang, J. 2007. Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. *Forest Ecology and Management*, 240:114–121.
- Tang, Z., Engel, B.A., Pijanowski, B.C., and Lim, K.J. 2005. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 76:35–45.
- Thanapakpawin, P., Richey, J., Thomas, D., Rodda, S., Campbell, B. and Logsdon, M. 2006. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *Journal of Hydrology*, 334:215–230.
- Trejo, I. and Dirzo, R. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*, 94:133-142.
- Trejo-Vázquez, I. 1999. El clima de la selva baja caducifolia en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 39:40-52.
- Valera-Venegas, G. 2006. Dinámica del cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca del río chico, Tulancingo, Hgo. Tesis. Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. UACH. 145 p.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J.L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología*, 62:21-37.

- Wang, G., Liu, J., Kubota, J. and Chen, L. 2007. Effects of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China. *Hydrological Processes*, 21:1370-1382.
- Woodbury, P.B., Smith, J.E. and Heath, L.S. 2007. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 241:14–27.
- Wu, Q., Li, H., Wang, R., Paulussen, J., He, Y., Wang, M., Wang, B., and Wang, Z. 2006. Monitoring and predicting land use change in Beijing using remote sensing and GIS. *Landscape and Urban Planning*, 78(4):322-333.
- Zepeda-Gómez, C. y Velázquez-Montes, E. 1999. El bosque tropical caducifolio de la vertiente sur de la sierra de Nanchititla, Estado de México: la composición y la afinidad geográfica de su flora. *Acta Botánica Mexicana*, 46:29-55.

CAPÍTULO III. MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE CONSIDERANDO DIFERENTES ESCENARIOS DE USO DEL SUELO

RESUMEN

El presente estudio se realizó en la cuenca del Río Grande, ubicada en Tlalchapa, Guerrero. Se modeló el proceso lluvia escurrimiento mediante el sistema HEC-HMS para los escenarios de uso del suelo presentes en los años 1973, 1986, 2001 y 2006. La cuenca fue dividida en 16 subcuencas con la herramienta HEC-GeoHMS del módulo de ArcView 3.1. Entre los principales parámetros empleados en el modelo se encontraron: (1) la tormenta sintética tipo II (SCS) y (2) la curva numérica ponderada por subcuenca (SCS). Posteriormente, el modelo calculó el tiempo de retraso, gasto pico para cada subcuenca. A pesar de que la dinámica de uso del suelo indica cambios en las coberturas (arboladas a pastizal), estos no tuvieron un efecto estadísticamente significativo (prueba de Duncan) en la curva numérica y el escurrimiento en los diferentes escenarios.

Palabras clave: Modelación hidrológica, HEC-HMS, curva numérica, tormenta diseño tipo II.

ABSTRACT

This work was carried out at the Rio Grande's watershed, located in the municipality of Tlalchapa, Guerrero. It was involved on modeling rainfall-runoff process using HEC-HMS model for 1973, 1986, 2001 and 2006 scenarios. The study area was divided into 16 subwatersheds using HEC-GeoHMS Arcview's 3.1 extension. Among the main parameters used were: (1) SCS design storm type II and (2) weighted curve number for subwatershed (SCS-CN). After that, the model calculated some parameters such as lag time, peak flow and routing channels. Despite of the identified land use changes (forested to grassland), these had not a statistically significant effect (Duncan's test) on curve number and runoff in the different evaluated scenarios.

Key words: Hydrologic modeling, HEC-HMC, curve number, design storm type II.

3.1. Introducción

La evapotranspiración, el almacenamiento de agua en la tierra, el flujo base, la recarga de los mantos acuíferos y la dinámica del escurrimiento superficial, todos componentes del ciclo hidrológico, están ligados a los cambios de uso del suelo. Cuando el escurrimiento superficial se presenta de manera errática en cantidades máximas y mínimas, afecta la integridad de una población con inundaciones o sequías (Manson, 2004). Ejemplo de ello, el poblado de Villa Madero, Tlalchapa, Guerrero, mismo que según datos históricos ha venido presentando inundaciones que se reflejan en el derrumbe constante del puente construido para un periodo de retorno corto.

Afortunadamente, en la actualidad es posible prever con cierta certeza este tipo de fenómenos mediante el manejo de información hidrológica, empleando datos espaciales manejados con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y programas de modelación de cuencas; herramientas más eficaces y exactas que los métodos tradicionales (Jonhson, 2001; Melesse, *et al.*, 2003; Triviño y Ortiz, 2004; Chakraborty *et al.*, 2005; Al-Abed, 2005; McColl y Agget, 2006; Melesse, *et al.*, 2006). En este trabajo el empleo de la herramienta HEC-GeoHMS resultó imprescindible para obtener un modelo de cuenca agregado (Lumped Basin Model). El HEC-GeoHMS asume que cada subcuenca de la cuenca está representada por un número de parámetros hidrológicos en donde el valor medio obtenido por subcuenca puede ser empleado en el proceso. El modelo resultado del cálculo automático de parámetros hidrológicos se importó al HEC-HMS listo para ser usado (Triviño y Ortiz, 2004; Sang-Ho *et al.*, 2007; Jeniček, 2007)

En este trabajo se empleó la herramienta HEC-GeoHMS para obtener un modelo de cuenca agregado (Lumped Basin Model) que estimó diversos parámetros morfométricos de la cuenca a partir del modelo digital de elevación. Posteriormente en HEC-HMS se modeló el proceso lluvia-escurrimiento para los escenarios de usos del suelo (1973, 1986, 2001 y 2006) dados por los usos de suelo obtenidos mediante los mapas temáticos generados en el Capítulo 2.

Se determinaron las curvas numéricas a partir de la vegetación obtenida de imágenes Landsat y Quickbird para los escenarios de 1973, 1986, 2001 y 2006 previamente validadas con cartografía disponible del INEGI (1980) y del Inventario Nacional Forestal 2000.

Los objetivos del estudio fueron: (1) modelar el proceso lluvia-escorrimento para los escenarios de uso del suelo 1973, 1986, 2001 y 2006. (2) comparar las diferencias de curva numérica y tiempo de retraso para los diferentes escenarios de uso del suelo.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Área de estudio

La cuenca se enmarca en el área de influencia de la comunidad de Villa Madero municipio de Tlalchapa, Guerrero. Tiene como coordenadas geográficas extremas $18^{\circ}22'27''$ y $18^{\circ}32'25''$ de latitud norte, y $100^{\circ}27'40''$ y $100^{\circ}21'27''$ de longitud oeste. En el poblado de Puerto de Allende, surge una corriente causada por las lluvias, además de un manantial que surte de agua durante todo el año. Esta corriente se une con el agua que desciende de las montañas que se encuentran al norte, por los lugares nombrados “El Mortero” y “Las Piñas” constituyendo una vertiente caudalosa que se denomina Río Grande (INAFED, 2005). Posteriormente, este caudal es afluente del río Poliutla y a su vez del río Balsas. La cuenca se encuentra en la parte central norte de la región hidrológica 18 del río Balsas en la subregión 18C: Balsas-Zirándaro, colindando con el estado de México aunque también muy cercana con los límites del estado de Michoacán (Perevochtchikova y García-Jiménez, 2006) (Figura 3.1).

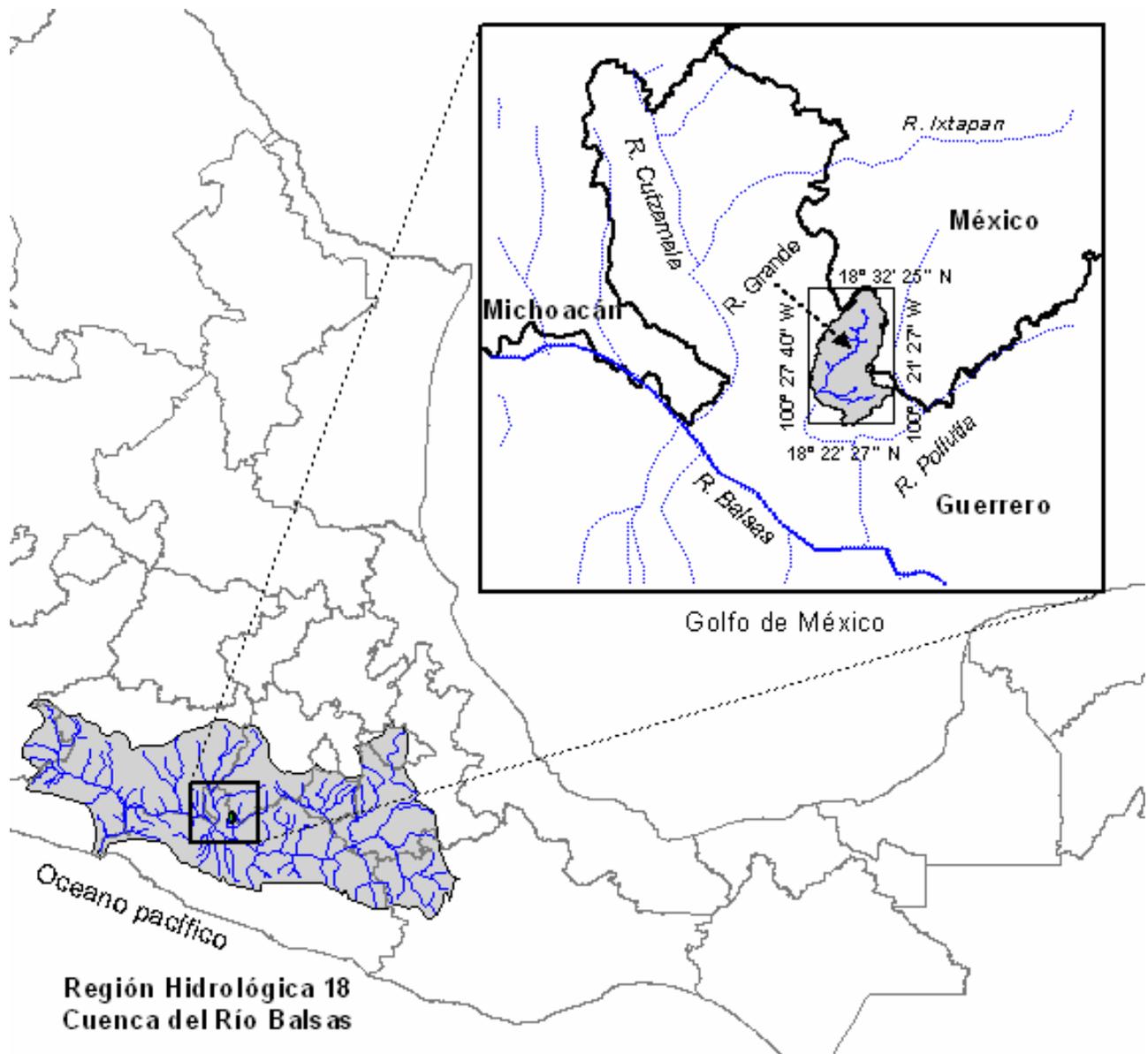


Figura 3.1. Localización del área de estudio en su contexto hidrológico.

Los parámetros físicos de la cuenca proporcionan una idea general de su morfometría. Entre éstos destacan los siguientes: (1) área de drenaje: 11567.87 ha; (2) forma de la cuenca: hoja de álamo; (3) factor de forma adimensional (Horton): 0.2806; (4) orden de las corrientes: 5; (5) densidad de drenaje: 26.87 m de cauce/ha; (6) densidad de corrientes: 0.034 cauces/ha; (7) longitud promedio del flujo superficial: 18.65 km; (8) pendiente media de la cuenca: 30.27%; (9) elevación de la cuenca: media, máxima y mínima 866.84, 1604 y 397 m.s.n.m., respectivamente; pendiente del cauce principal: 4.33% (Figura 3.2). Para una revisión detallada de las fórmulas de cálculo de los parámetros se recomienda revisar el trabajo de Tetumo-García (1993).

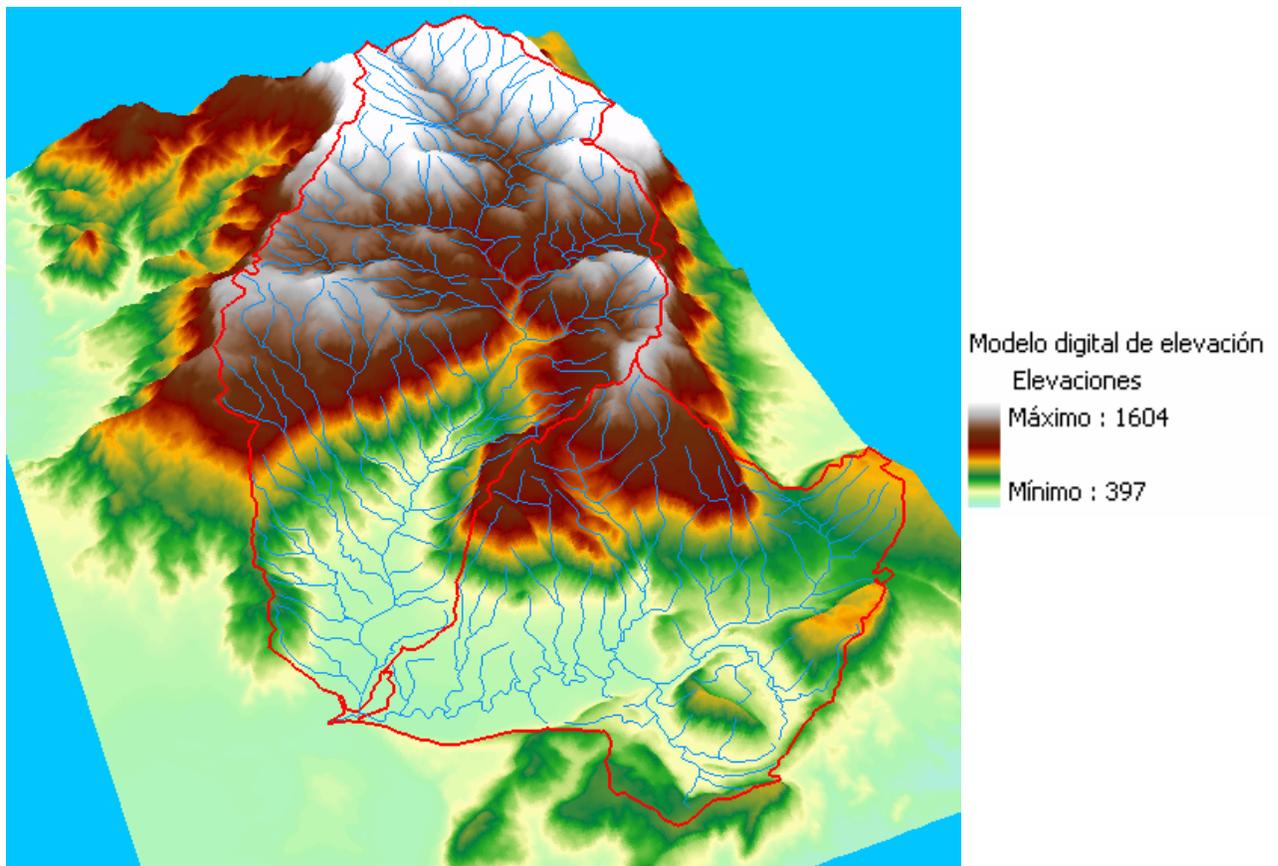


Figura 3.2. Detalle tridimensional de la cuenca del Río Grande

3.2.2. Materiales

Se emplearon los siguientes materiales: curvas de nivel en formato vectorial (20 m) y la carta edafológica a escala 1:50,000: E14A65 Ciudad Altamirano y E14A75 Palmar Chico. Para definir el tirante máximo de la lluvia se emplearon datos históricos de tormentas máximas provenientes del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III). Como método de pérdida del sistema hidrológico se emplearon las capas temáticas de vegetación y uso del suelo generadas en el Capítulo 2 de esta tesis.

3.2.3. Tormenta diseño

La tormenta diseño es un patrón de precipitación definido que se utiliza en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente ésta conforma la entrada al sistema y los caudales resultantes, que se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentamiento y tránsito de avenidas. Una tormenta diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta. De acuerdo con Daniil *et al.* (2005) ésta debe considerar el análisis de eventos de tormenta observados. La tormenta diseño puede basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes (Chow *et al.*, 1994; Triviño y Ortiz, 2004).

Inicialmente, se seleccionaron las estaciones pluviométricas circundantes al área de la cuenca (Cuadro 3.1). Se emplearon las series de precipitaciones máximas en 24 horas de los años registrados en el ERIC III para cada estación. A estos datos se les hizo un análisis de frecuencia y se ajustó a una distribución probabilística. Las funciones probabilísticas probadas fueron: Normal, Log-Normal, Gama de III parámetros, Log-Gama de III parámetros y Gumbel. Posteriormente, se analizaron las frecuencias para determinar a que distribución probabilística se ajustó, mediante la prueba de bondad de ajuste llamada Kolgomorov-Smirnoff. Finalmente, se realizó una estimación de cuantiles que indica que los datos son para 24 horas con un periodo de retorno de 100

años. La lámina máxima estimada se asignó a las 16 subcuencas por medio de polígonos de Thiessen obteniéndose una precipitación para cada subcuenca (Melesse *et al.*, 2006).

Cuadro 3.1. Estaciones pluviométricas para la cuenca del Río Grande.

Estación	Nombre	Año	Total de años
12063	Arcelia	1962-2003	42
12090	Tlalchapa	1966-2003	38
15200	Palmar grande	1974-1989	16

Triviño y Ortiz (2004) se basan en un ajuste de la ley de distribución de frecuencias para valores extremos de Gumbel y presentan resultados satisfactorios a series homogéneas de precipitaciones máximas diarias. Sugieren que se debe hacer un análisis de las tormentas de al menos los últimos 30 años. Koutsoyiannis (2004) menciona que la distribución Gumbel es una de las funciones de probabilidad teórica que ha predominado para cuantificar el riesgo asociado con una lluvia extrema.

Sivakumar (2005) realizó un análisis sobre el número de datos requeridos en series de tiempo para estudios hidrológicos y concluyó que finalmente el número de datos obligados es meramente un mito y más bien la precisión de las correlaciones dependen de otros factores como la misma calidad de los datos.

Para distribuir temporalmente, la lámina máxima seleccionada mediante los procedimientos anteriormente descritos (distribuciones de probabilidad y polígonos de Thiessen), se seleccionó una tormenta diseño (hietograma). El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos (1986) generó hietogramas de tormentas de 24 horas basadas en diversas investigaciones anteriores. Estos sirven para distribuir temporalmente la lámina máxima calculada para una tormenta determinada en una región específica. Los cuatro tipos de tormenta que generaron, los clasificaron en tipo I, IA, II y III que corresponden a ciertas condiciones climáticas específicas. Los tipos I y IA corresponden al clima marítimo del pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El tipo III corresponde al Golfo de México y las áreas

costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes. El tipo II corresponde al resto del país. Estas tormentas diseño vienen dadas mediante factores de multiplicación acumulados en decimales donde el valor máximo es 1 y así se distribuye temporalmente la lámina máxima seleccionada (cada 15, 30 minutos o 1 hora). Para esta investigación se seleccionó la tormenta diseño tipo II en intervalos de 15 minutos (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Tipos de tormenta diseño del US SCS (1986).

Hora t	Tormentas de 24 horas				
	t/24	I	IA	II	III
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0	0.0830	0.0350	0.0500	0.0220	0.0200
4.0	0.1670	0.0760	0.1160	0.0480	0.0430
6.0	0.2500	0.1250	0.2060	0.0800	0.0720
7.0	0.2920	0.1560	0.2680	0.0980	0.0890
8.0	0.3330	0.1940	0.4250	0.1200	0.1150
8.5	0.3540	0.2190	0.4800	0.1330	0.1300
9.0	0.3750	0.2540	0.5200	0.1470	0.1480
9.5	0.3960	0.3030	0.5500	0.1630	0.1670
9.8	0.4060	0.3620	0.5640	0.1720	0.1780
10.0	0.4170	0.5150	0.5770	0.1810	0.1890
10.5	0.4380	0.5830	0.6010	0.2040	0.2160
11.0	0.4590	0.6240	0.6240	0.2350	0.2500
11.5	0.4790	0.6540	0.6450	0.2830	0.2980
11.8	0.4890	0.6690	0.6550	0.3570	0.3390
12.0	0.5000	0.6820	0.6640	0.6630	0.5000
12.5	0.5210	0.7060	0.6830	0.7350	0.7020
13.0	0.5420	0.7270	0.7010	0.7720	0.7510
13.5	0.5630	0.7480	0.7190	0.7990	0.7850
14.0	0.5830	0.7670	0.7360	0.8200	0.8110
16.0	0.6670	0.8300	0.8000	0.8800	0.8860
20.0	0.8330	0.9260	0.9060	0.9520	0.9570
24.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

3.2.4. Hidrograma unitario

Un hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Aunque el principio de linealidad no es exactamente cierto, el hidrograma es una aproximación que se

considera satisfactoria en muchos casos prácticos (Chow *et al.*, 1994). En otros términos, un hidrograma unitario es la respuesta de una cuenca a una precipitación uniforme, efectiva (es decir lluvia que cae con igual intensidad en toda la cuenca y produce solo escurrimiento rápido) y que además su lámina es de valor unitario (1mm), (TRAGSA *et al.*, 1998). Consiste en separar el flujo base del escurrimiento directo, después se procede a determinar el volumen del escurrimiento directo, y las ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo se dividen por la profundidad de escurrimiento observado (Linsley, 1977).

Este tipo de hidrograma tiene su origen en los trabajos de Sherman (1932), quien clasificó el escurrimiento en escurrimiento superficial y escurrimiento de agua subterránea, y definió el hidrograma unitario para ser usado únicamente con el escurrimiento superficial.

Las hipótesis que asume el modelo del hidrograma unitario son: (1) la precipitación efectiva o exceso de lluvia, se distribuye uniformemente durante el tiempo de duración del aguacero, (2) la precipitación efectiva se distribuye uniformemente a lo largo de toda la superficie de la cuenca y (3) el tiempo de duración del escurrimiento superficial (tiempo base) debido a una precipitación de duración unitaria, es constante, (4) las ordenadas (caudales) de un conjunto de hidrogramas unitarios con el mismo tiempo de duración del escurrimiento superficial (tiempo base), son directamente proporcionales a la respectiva cantidad total de escurrimiento neto (o lluvia neta) representada por cada hidrograma, (5) para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca.

Estas hipótesis no satisfacen plenamente la realidad, pero proporcionan resultados válidos a efectos prácticos. El método del hidrograma unitario es aplicable a cuencas medianas y pequeñas (entre 2.5 y 250 km²), (TRAGSA *et al.*, 1998). La información hidrológica real no es verdaderamente lineal; cuando se aplica a ésta, el hidrograma resultante es solamente una aproximación, que es satisfactoria en muchos casos prácticos (Chow *et al.*, 1994).

3.2.5. Hidrograma unitario sintético (HUS-SCS)

En esta investigación se empleó el hidrograma unitario adimensional del SCS. El cual es una forma idealizada o esquemática que aproxima el flujo de una tormenta intensa en una cuenca. Algunas veces es llamado hidrograma sintético. Para desarrollar este hidrograma se debe conocer el gasto pico y el volumen del escurrimiento para una tormenta a un determinado periodo de retorno. El hidrograma diseño final es desarrollado de un hidrograma adimensional mediante el uso de factores aproximados de conversión. Esto permite determinar el hidrograma de diferentes tamaños de tormenta simplemente escalando el hidrograma unitario en espacio y tiempo (USDA, 1972; Caissie *et al.*, 2002; Aparicio, 2005; Jeniček, 2007) (Figura 3.3).

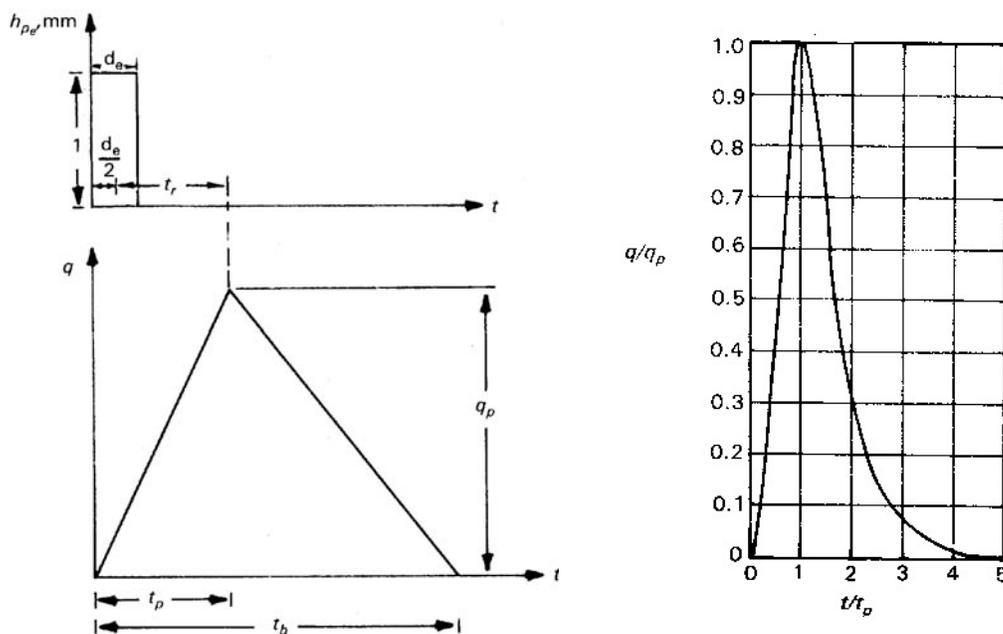


Figura 3.3. Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service. A) Hidrograma unitario triangular. B) Hidrograma adimensional o curvilíneo. (US SCS, 1973).

El hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos fue desarrollado por Víctor Mockus en la década de los años 50, con base en observaciones de numerosas regiones geográficas de los Estados Unidos y se ha aplicado en cuencas de tamaño medio en todo el mundo (Figura 3.3) (TRAGSA *et al.*, 1998).

El hidrograma SCS asume inicialmente la forma del hidrograma triangular (Figura 3.3A) a efectos de calcular el gasto pico como:

$$q_p = \frac{0.555A}{t_b}$$

Donde:
 A = área de la cuenca en km^2
 t_b = tiempo base en horas y
 q_p = gasto pico unitario en $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$

Mockus (1957) al analizar varios hidrogramas concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$t_b = 2.67 t_p$$

Donde:
 t_b = tiempo base

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

t_p = tiempo pico
 d_e = duración en exceso

$$t_r = 0.6t_c$$

t_r = tiempo de retraso, el cual se estima mediante el tiempo de concentración t_c .

La duración exceso a falta de mejores datos, se puede calcular para cuencas grandes como: $d_e = 2\sqrt{t_c}$, o bien $d_e = t_c$ para las pequeñas. Todos los tiempos y la duración en exceso en las fórmulas están en horas.

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p}$$

donde: $t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$, de tal manera que con esta última ecuación y las de t_b y t_p arriba descritas se calcula el diagrama unitario triangular.

En muchos casos, es suficiente con las características de un hidrograma unitario triangular para propósitos prácticos. Sin embargo, si la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta el diseño, puede usarse un hidrograma curvilíneo.

Para obtener un hidrograma para una cuenca en particular, basta con multiplicar las ordenadas por el gasto pico q_p de la ecuación $q_p = \frac{0.208 A}{t_p}$ y las abscisas por el

tiempo pico de la ecuación $t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$.

3.2.6. Método de la curva numérica (CN-SCS)

A inicio de los 1950's, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos desarrolló un método para estimar el volumen del escurrimiento directo proveniente de la precipitación. Este método es frecuentemente nombrado como el método de la curva numérica. El análisis de registros de eventos de tormenta y escurrimiento indican que antes de que exista escurrimiento primero se deben satisfacer los volúmenes de intercepción, almacenamiento en depresiones e infiltración. La lluvia requerida para satisfacer los volúmenes anteriormente mencionados se le llama abstracción inicial.

Finalmente, es un índice que representa la combinación del grupo de suelo hidrológico, el uso del suelo y la clasificación del tratamiento. Análisis empíricos sugirieron que la curva numérica está en función de tres factores: grupo de suelo, cobertura y condiciones de humedad antecedente (Melesse *et al.*, 2003; USDA, 2004; McCuen, 2005; Chakraborty *et al.*, 2005; Oñate-Valdivieso, 2005; Sang-Ho *et al.*, 2007; Shi *et al.*, 2007). La siguiente fórmula es empleada para estimar el escurrimiento máximo de una tormenta:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{Para } (P > 0.2S) \text{ de otra manera } Q = 0$$

Donde: Q = Lámina escurrida en mm; P = Precipitación de la tormenta en mm; S = Parámetro de retención en mm y está relacionado a la curva numérica de la siguiente manera: $S = \frac{25400}{CN} - 254$; donde CN: Curva numérica, adimensional.

En el Cuadro 3.3 se presenta el uso designado y el equivalente de acuerdo con McCuen (2005) y su correspondiente condición hidrológica, textura de suelo y curva numérica. El número de curva no requirió ajuste de pendiente por contar con pendientes de bajo orden en la cuenca.

Cuadro 3.3. Curva numérica empleada por cada tipo de vegetación y grupo de suelo y condición de humedad antecedente tipo II.

Uso empleado	Uso de suelo equivalente con McCuen (2005)			Textura	CN			
	Uso	Práctica	Condición hidrológica		Grupo de suelo			
					a	b	Cn empleada	
AT	Suelo agrícola	Surcos rectos	Pobre	Gruesa	72	81	70	80
			Buena	Media	67	78		
BQ	Robles-álamos	-	Regular	Media		48		
BQVS	Robles-álamos	-	Buena	Media		30		
P	Salvia-pastos	Sin tratamiento mecánico	Regular	Gruesa	49			
			Regular	Media		69		
SBC	Bosque	-	Regular	Gruesa	36			
			Regular	Media		60		
SBCVS	Bosque	-	Pobre	Gruesa	45			
			Pobre	Media		66		

AT: Agricultura de temporal; BQ: Bosque de Encino; BQVS: Bosque de encino con vegetación secundaria; P: Pastizal; SBC: Selva Baja Caducifolia; SBCVS: Selva Baja Caducifolia con vegetación secundaria; a y b: Condición de humedad.

Oñate-Valdivieso (2005) describe a detalle una metodología para el cálculo de la curva numérica mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat siendo la empleada en la presente tesis.

3.2.7. Tránsito de avenidas en cauces (Muskingum)

Este método permite conocer la variación de un hidrograma al recorrer un tramo de cauce. Se utilizó el método de Muskingum, método hidrológico presentado por primera vez en 1938. Utiliza la ecuación de continuidad en su forma discreta:

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} \Delta t - \frac{O_i + O_{i+1}}{2} \Delta t = \Delta V$$

y una relación algebraica entre el almacenamiento en el tramo V y las entradas I y salidas O de la forma:

$$V = K O + K x (I - O) = K [x I + (1 - x) O]$$

Donde K es una constante llamada parámetro de almacenamiento, tiene unidades de tiempo y su valor es aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la avenida a lo largo del tramo: $K = \frac{L}{\omega}$; donde L = longitud del tramo y ω = velocidad promedio del pico de la avenida, y puede estimarse en relación con la velocidad media del agua $\omega \approx 1.5v$, donde v tomó un valor de 2.5 m/s.

El parámetro x es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento en el tramo, varía entre 0.0 y 0.5. Si $x = 0.0$, el volumen almacenado en el tramo es sólo función de la salida O , es decir, no existe almacenamiento en cuña y el tramo se comporta como un vaso. Si $x = 0.5$, las entradas y salidas tienen la misma importancia y no habría ninguna disminución del pico de la avenida. Es recomendable tomar $x = 0.2$ como un valor medio y fue el empleado en este trabajo (Campos-Aranda, 2000; Aparicio-Mijares, 2005; Dooge, 2005).

3.2.8. Preparación del modelo HEC-GeoHMS

Las curvas de nivel en formato vectorial fueron interpoladas en un modelo digital de elevación (MDE) 15 m de tamaño de celda. Posteriormente, se empleó HEC-GeoHMS en el entorno de ArcView para procesar los datos digitales de elevación de la cuenca (MDE) y determinar las características morfométricas por subcuenca (longitud, pendiente, área, etc.). El resultado de estos procesos fue insertado en el modelo HEC-HMS mediante un modelo agregado de la subcuenca (lumped basin model) (Figura 3.4) (USACE, 2003; Triviño y Ortiz, 2004; Knebl *et al.*, 2005; Hong *et al.*, 2006; Sang-Ho *et al.*, 2007).

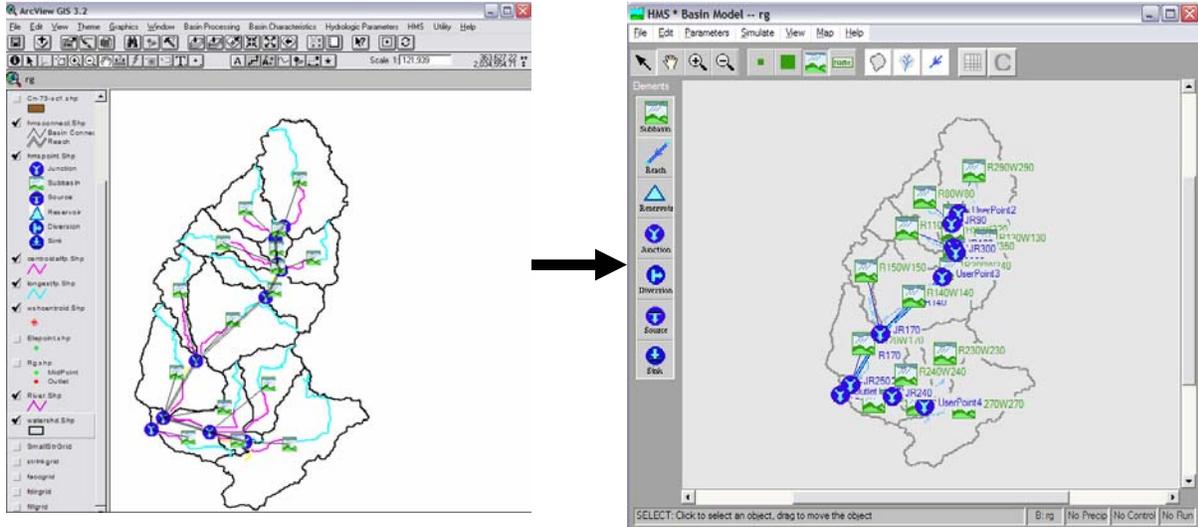


Figura 3.4. Modelo hidrológico generado mediante la extensión HEC-GeoHMS e importado al HEC-HMS.

3.2.9. El modelo HEC-HMS

El HEC-HMS es un modelo de parámetros agregado con distribución espacial. Opera mediante la subdivisión del área de una cuenca en subcuencas aproximadamente homogéneas en la vegetación y uso de suelo, tipo de suelo y grupo hidrológico de suelo. El modelado ofrece numerosas opciones principalmente enfocado a determinar los hidrogramas del escurrimiento de las subcuencas y además el tránsito de avenidas en cauces a través de canales a la salida de la cuenca (McColl y Agget, 2006).

El HEC-HMS es un modelo que permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos (USACE, 2000; McColl y Agget, 2006; Sang-Ho *et al.*, 2007; Jeniček 2007). Se puede emplear para las cuencas carentes de datos en la estimación de los posibles efectos en el escurrimiento por cambios en uso del suelo (Al-Abed, 2005; Hong, 2006). Se compone de tres módulos principales: el de cuenca, de precipitación y de control. Estos tres módulos deben definirse completamente antes de iniciar la corrida de la simulación. Existen cinco grupos básicos de información que deben

suministrarse al HEC-HMS para efectuar las simulaciones: precipitación histórica o de diseño, sobre características del suelo, morfometría de las subcuencas, información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía, información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito) (USACE 2000; Jeniček, 2007).

Al-Abed *et al.* (2005) hacen una comparación de los modelos HEC-HMS y SWBS calibrados con énfasis en los tres parámetros más sensibles (el número de curva, % de impermeabilidad y el flujo base). El modelo HEC-HMS mostró resultados más aceptables comparados con el SWBS.

3.2.9.1. Modelación del escurrimiento

Para modelar el escurrimiento se especificaron los siguientes parámetros al modelo HEC-HMS: (1) tasa de pérdida (loss rate) para ello se seleccionó el método de la curva numérica y (2) la transformación de la lluvia en el escurrimiento (transform) mediante el método del SCS, que requirió el tiempo de retraso en minutos cuya fórmula se expresa como sigue (USACE, 2000; Shi *et al.*, 2007):

Donde:

Lag = Tiempo de retraso por subcuenca (horas).

L = Longitud hidráulica de la subcuenca (pies).

CN = Número de curva ponderada.

Y = Pendiente de la subcuenca (%).

S = Parámetro de retención en pulgadas.

$$Lag = \frac{(L^{0.8} * (S + 1)^{0.7})}{(1900 * Y^{0.5})}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Y (3) el flujo base, el método seleccionado fue sin contribución del flujo base en el hidrograma de la subcuenca ya que es una cuenca sin datos de este tipo (ungauged watershed) (Sivapalan *et al.*, 2003).

3.2.9.2. Especificaciones de la simulación

Se utilizó el hietograma especificado por el usuario para la tres estaciones con registro de precipitación que circundaron el área de la cuenca y se distribuyeron por medio de polígonos de Thiessen: 14 de agosto de 1994 (Arcelia Palos Altos), 11 de junio de 1997 (Tlalchapa) y 27 de agosto de 1974 (Palmar Grande) de las precipitaciones máximas registradas para cada estación.

La simulación se especificó de 3 días, para observar el hidrograma completo. El evento inició el 11 de junio de 1997 a las 00:00 y terminó el 13 de junio de 1997 a las 24 horas con un intervalo en el tiempo de 30 minutos.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Procesamiento en el SIG: HEC-GeoHMS

Con la extensión HEC-GeoHMS y con los datos del Modelo Digital de Elevación se delimitaron 16 subcuencas con una superficie total de 11567.87 ha. A cada una de ellas se le calcularon los parámetros morfométricos entre los que destacan: elevación media, pendiente, longitud de ríos (Cuadro 3.4). El modelo preparado (*.basin, *.map) fue importado en el HEC-HMS (Sang-Ho *et al.*, 2007). Las cuatro subcuencas con mayor superficie total con respecto al área total de la cuenca ocupan el 55.33% encontrándose en los extremos y a la salida de la cuenca.

Cuadro 3.4. Parámetros principales de la cuenca del Río Grande.

Subcuenca	Área (km ²)	% de superficie	Pendiente media (%)	Longitud de río (m)	Elevación media (msnm)
R110W110	5.40	4.64	31.12	6048.49	1048
R120W350	0.10	0.09	59.99	636.84	840
R130W130	5.93	5.09	35.77	5216.03	983
R140W140	16.07	13.81	40.48	7616.13	500
R150W150	5.26	4.52	24.25	6915.47	1020
R170W170	12.78	10.98	23.70	7139.59	440
R230W230	7.79	6.69	31.76	8575.95	861
R240W240	5.12	4.40	24.74	7762.57	505
R250W250	4.71	4.05	10.99	4745.25	420
R260W260	1.48	1.27	8.44	2923.68	420
R270W270	19.40	16.67	25.98	9587.79	520
R290W290	16.16	13.88	38.02	6968.82	1118
R300W340	7.80	6.70	35.89	4845.73	795
R40W330	0.33	0.28	52.78	1165.04	980
R80W80	6.64	5.70	32.51	5160.29	1097
R90W320	1.42	1.22	47.31	2060.96	920
Total/Media	116.39	100	32.73	5460.53	779

3.3.2. Tormenta diseño y precipitación máxima seleccionada

Después de ajustar las diferentes distribuciones a los datos de cada estación meteorológica se obtuvieron las siguientes precipitaciones máximas con un periodo de retorno de 100 años (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Precipitaciones máximas calculadas para las diferentes estaciones meteorológicas empleadas.

Estación	Nombre	Función de probabilidad seleccionada	Precipitación máxima (mm)
12063	Arcelia	LogNormal	115
12090	Tlalchapa	Gumbel	119
15200	Palmar grande	LogNormal	117

Los valores máximos de precipitación calculados fueron asignados a las cuencas cuyas estaciones meteorológicas abarcaron el 100% del área de la cuenca mediante polígonos de Thiessen. No obstante, para aquellas subcuencas que tuvieron la

influencia de dos o más estaciones se les asignó la precipitación o lámina máxima ponderada por área de influencia de la estación que correspondiera.

3.3.3. Modelación del escurrimiento en HEC-HMS

3.3.3.1. Curva numérica, tiempo de retraso y valores del método Muskingum

Uno de los parámetros de entrada al HEC-HMS en el cálculo interno de la tasa de pérdida es la curva numérica obtenida mediante el método del SCS. La curva numérica ponderada para los cuatro escenarios por subcuenca se presenta en el Cuadro 3.6, la cual aumentó el escurrimiento en un porcentaje mínimo del escenario 1976 al 2006 (Chakraborty *et al.*, 2005; Knebl *et al.*, 2005; Sang-Ho *et al.*, 2007).

Al-Abed *et al.*, (2005) mencionan que el modelo HEC-HMS presenta resultados aceptables en los parámetros sensibles calibrados (número de curva, % de impermeabilidad y el factor de recesión del flujo base) comparado con otro modelo que también estudiaron llamado Spatial Water Budget Model (SWBM). El HEC-HMS es flexible al permitir que estos parámetros no sean calibrados por la falta de datos de aforo para la cuenca del Río Grande.

Cuadro 3.6. Curva numérica ponderada por subcuenca y tiempo de retraso para los cuatro escenarios.

Subcuenca	CN				Tiempo de retraso			
	1973	1986	2001	2006	1973	1986	2001	2006
R110W110	48.10	44.51	43.00	48.42	13.05	14.32	14.90	12.94
R120W350	30.00	42.85	45.86	47.00	2.58	1.78	1.64	1.60
R130W130	36.84	40.56	44.52	40.64	14.62	13.18	11.86	13.15
R140W140	49.56	51.79	52.70	51.69	13.25	12.52	12.24	12.55
R150W150	44.49	44.22	43.74	45.37	18.07	18.19	18.42	17.65
R170W170	68.08	69.28	68.85	69.43	10.25	9.93	10.04	9.89
R230W230	60.57	53.66	63.16	64.39	12.45	14.83	11.66	11.29
R240W240	70.12	66.51	71.12	70.57	10.16	11.18	9.88	10.03
R250W250	70.37	70.33	68.90	63.59	10.21	10.22	10.62	12.20
R260W260	67.30	71.02	69.92	75.24	8.58	7.77	8.00	6.90
R270W270	62.11	65.61	66.01	64.46	14.47	13.22	13.09	13.63
R290W290	41.87	39.70	41.87	43.73	15.56	16.50	15.56	14.81
R300W340	40.97	42.39	46.03	44.37	12.27	11.81	10.73	11.21
R40W330	33.62	38.65	38.32	39.41	3.98	3.45	3.48	3.38
R80W80	38.65	44.03	41.42	45.28	14.45	12.49	13.39	12.09
R90W320	36.56	40.85	41.96	44.81	6.10	5.41	5.25	4.87
Total=16	49.95	51.62	52.96	53.65	13.05	14.32	14.90	12.94

En el Cuadro 3.7 se muestran los valores obtenidos para el parámetro K dentro del método de Muskingum para cada subcuenca. Éste representa un valor aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la avenida a lo largo del tramo del río, siendo mayor en aquellos tramos de cauce con longitudes mayores.

Cuadro 3.7. Tránsito de avenidas mediante el método Muskingum.

Número de tramo	Tramo	Longitud del cauce (m)	PI (m.s.n.m.)	PF (m.s.n.m.)	Pendiente (%)	K (h)
1	R40W330	749	1000	920	10.68	0.0832
2	R90W320	1704	920	840	4.7	0.1893
3	R120W350	317	840	840	0	0.0352
4	R300W340	1840	840	771	3.73	0.2044
5	R140W140	5288	771	440	6.27	0.5876
6	R170W170	3360	440	400	1.19	0.3733
7	R250W250	771	400	400	0	0.0857
11	R260W260	1888	425	420	0.26	0.2097
12	R240W240	2488	420	400	0.8	0.2765

PI: Elevación del punto inicial, PF: Elevación del punto final; K: Tiempo de tránsito del pico de la avenida por tramo de cauce.

3.3.4. Escurrimiento superficial

Los resultados que muestra el HEC-HMS para los cuatro escenarios en las 16 subcuencas se concentran en el Cuadro 3.8 expresados en el gasto pico ($Q_{m\acute{a}x}$). Se muestran los gastos pico por escenario de análisis y los cuales varían entre 483.55 y 515.33 m³/s. De manera general, se presentó un aumento en el escurrimiento del periodo 1973-2006 con una diferencia porcentual en el gasto pico de 5.11% siendo pequeño y similar a la curva numérica. Cosandey *et al.* (2005) concluyen en un estudio de bosques mediterráneos en Francia que el impacto del bosque puede a veces ser considerable, pero está lejos de ser significativo en los escenarios de arbolado, cortado o quemado sino que la variación se presentaría como resultado de las condiciones climáticas. En el estudio de Juárez-Méndez (2007) demostró que el cambio de uso del suelo no modificó el comportamiento hidrológico. En contraste Valera-Venegas (2006) determinó que los escurrimientos fueron modificados por una tasa de deforestación del 12%. Chakraborty *et al.* (2005) obtuvieron un cambio de uso del suelo dirigido en un aumento de cultivos agrícolas, sin embargo, no se presentaron incrementos en los escurrimientos.

La literatura consultada es una evidencia de la existencia de un considerable tipo de estudios que sostienen la tesis de que existen incrementos visibles del escurrimiento ocasionados por el cambio de uso del suelo (Sullivan *et al.*, 2004; Pizarro *et al.*, 2006; Siriwardena *et al.*, 2006; Zhang y Schilling, 2006; Wu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007). No obstante, las posibles causas de los resultados de dichas investigaciones pueden ser de diversa índole, desde tipo metodológico hasta la calidad de los datos con que contaron.

Cuadro 3.8. Gastos máximos por subcuenca en el HEC-HMS.

Subcuencas	Tiempo pico		1973	1986	2001	2006	Diferencia en % 1973-2006	Comportamiento
	Fecha	Hora	Qpico m ³ /s	Qpico m ³ /s	Qpico m ³ /s	Qpico m ³ /s		
R270W270	11-Jun-97	12:00	169	185.1	187	179.7	6.34	Incremento
R260W260	11-Jun-97	12:00	14.54	15.91	15.5	17.57	20.89	Incremento
R250W250	11-Jun-97	12:00	49.72	49.67	48	42.06	-15.39	Disminución
R240W240	11-Jun-97	12:00	53.70	49.17	55	54.29	1.09	Incremento
R230W230	11-Jun-97	12:00	64.41	53.55	68.8	71	10.23	Incremento
R170W170	11-Jun-97	12:00	127.69	131.4	130	132	3.34	Incremento
R140W140	11-Jun-97	12:00	98.43	104.9	108	104.6	6.27	Incremento
R150W150	11-Jun-97	12:00	25.35	25.06	24.5	26.36	3.98	Incremento
R300W340	11-Jun-97	12:00	36.69	38.42	43	40.88	11.42	Incremento
R120W350	11-Jun-97	12:00	0.313	0.495	0.54	0.562	79.55	Incremento
R130W130	11-Jun-97	12:00	23.96	27.24	31	27.32	13.98	Incremento
R110W110	11-Jun-97	12:00	31.6	28.3	27	31.91	0.97	Incremento
R90W320	11-Jun-97	12:00	5.668	6.571	6.82	7.466	31.73	Incremento
R40W330	10-Jun-97	24:00:00	0	0	0	0	0	
R80W80	10-Jun-97	24:00:00	0	0	0	0	0	
R290W290	10-Jun-97	24:00:00	0	0	0	0	0	
<i>Qpico</i> (a la salida de la cuenca) =			483.55	494.16	515.33	509.73	5.41	Incremento

En la Figura 3.5 se muestran los hidrogramas para los cuatro escenarios, los cuales presentan un comportamiento visiblemente constante en el escurrimiento, pero estadísticamente sin diferencias significativas. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Caissie *et al.* (2001) quienes no presentan diferencias significativas en el estudio del flujo pico. Pero Beschta *et al.*, (2000) evaluaron la respuesta del flujo pico en la corta total de los árboles del bosque, encontraron que el escurrimiento aumentó en un año para cuencas pequeñas, pero disminuyó para eventos de periodos de 5 años y en cuencas grandes con el análisis de regresión múltiple el escurrimiento no fue significativo sino hasta hacer un análisis de medias en el cual se encontró de 1 a 7% de diferencias significativas.

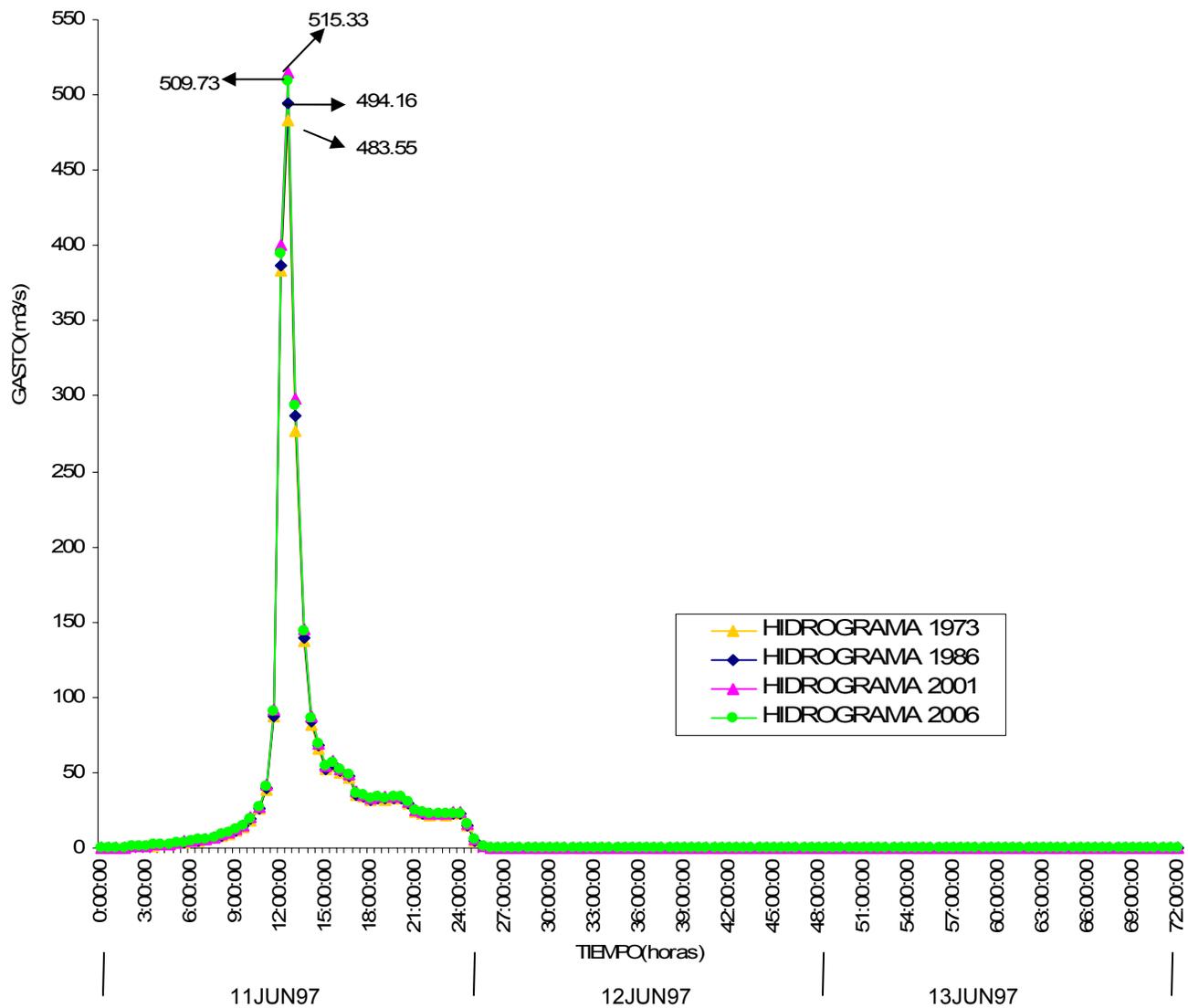


Figura 3.5. Hidrogramas a la salida de la cuenca para los años 1973, 1986, 2001, y 2006.

Si bien se puede observar una tendencia al aumento del escurrimiento en las tres primeras fechas de análisis, en la gráfica estas diferencias parecen ser mínimas, demostrándose estadísticamente con una prueba de medias.

3.3.5. Análisis estadístico

Antes de emplear el procedimiento de comparación de medias, se utilizó el contraste F de varianzas para muestras independientes para comprobar igual varianza para las variables de interés: curva numérica y gasto pico. Esto se realizó por pares en los escenarios: 1973-1986, 1986-2001, 2001-2006 y 1973-2006.

Las hipótesis fueron:

H_0 : Las varianzas en ambos conjuntos de datos son iguales.

Si $F_{calculada} < F_{tabla}$ entonces se acepta la hipótesis nula.

H_a : Las varianzas en ambos conjuntos de datos son diferentes.

Si $F_{calculada} > F_{tabla}$ entonces se acepta la hipótesis alterna.

Se obtuvo la $F_{calculada}$ por cada uno de los periodos de análisis mencionado, y se evaluó la $F_{tabla}(\alpha, v_1, v_2)$.

$$F_{calculada} = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Donde:

S_1^2 : Varianza muestral insesgada (n-1) de las mediciones en el año 1.

S_2^2 : Varianza muestral insesgada (n-1) de las mediciones en el año 2.

$F(\alpha, v_1, v_2)$: F obtenido de tablas, α : nivel de significancia (0.05), v_1 : n-1 grados de libertad del numerador, v_2 : n-1 grados de libertad del denominador

En todas las pruebas realizadas se aceptó la hipótesis nula demostrando que los datos de curva numérica y gasto pico tienen homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) en todos los periodos y sí pueden ser analizados con herramientas estadísticas como la prueba de Duncan (García-Villalpando *et al.*, 2001) (Cuadro 3.9).

Cuadro 3.9. Valores de Fcalculada y Ftablas para la prueba de hipótesis de homogeneidad de varianzas.

		1973-1986	1986-2001	2001-2006	1973-2006
Curva numérica	Fcalculada	1.30	1.00	1.07	1.39
	Ftablas (0.95,15 ,15 gl)	2.35	2.35	2.35	2.35
Gasto pico	Fcalculada	0.86	0.99	1.06	0.90
	Ftablas (0.95,12,12)	2.53	2.53	2.53	2.53

Las medias fueron confrontadas mediante la prueba estadística de comparación de tratamientos de Duncan. Para ello se corrieron los datos en SAS con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Los resultados obtenidos indican no haber diferencias significativas entre las medias de las curvas numéricas (CN) por escenario y las medias del gasto pico también por escenario (García-Villalpando *et al.*, 2001; Juárez-Méndez, 2007; Rivera-Toral, 2007).

3.4. Conclusiones

Los estudios hidrológicos multitemporales son necesarios para una mejor comprensión del efecto que ha tenido la dinámica de uso del suelo en la cuenca. En éste estudio específico no se encontraron impactos significativos del cambio de uso del suelo en el escurrimiento, ya que dichos cambios de cobertura a pesar de que fueron de coberturas arboladas a pastizales, en términos absolutos, el parámetro de la curva numérica y el gasto pico fueron constantes a través del tiempo.

Una siguiente fase de la presente investigación podría versar en la modelación del cambio climático en la frecuencia, duración e intensidad de las precipitaciones; aunque para esta cuenca será un tanto complicado por la escasez de dichos datos. Adicionalmente, y para completar el cuadro de investigación se recomienda generar cartografía de riesgo a inundaciones en la cuenca con la metodología del modelo hidráulico HEC-RAS para poder planificar el uso posterior del suelo sobre todo para la segregación de las áreas con alto riesgo a inundarse.

3.5. Literatura citada

- Al-Abed, N., Abdulla, F. and Abu, K.A. 2005. GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environmental Geology*, 47:405–411.
- Aparicio-Mijares, F. J. 2005. *Fundamentos de hidrología de superficie*. LIMUSA. México, D.F. 303 pp.
- Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset A.E., and Surfleet, C.G. 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233:102-120.
- Caissie, D., Jolicoeur, S., Bouchard, M. and Poncet, E. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *Journal of Hidrology*, 258:232-248.
- Campos-Aranda, D.F. 2000 Tránsito hidrológico de crecientes en ríos con flujo lateral. *Agrociencia*, 34:271-281.
- Chakraborty, D., Dutta, D. and Chandrasekharan, H. 2005. Spatial modeling for hydrological response behaviour of an arid watershed, India - remote sensing and GIS approach. *Journal of Spatial Hydrology*, 5(1):47-66.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Ed. McGRAW-HILL Interamericana. Colombia. 584 p.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., and Richard, D. 2005. The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301:235–249.
- Daniil, E.I., Michas, S.N., Lazaridis, L.S. 2005. Hydrologic modeling for the determination of design discharges in ungauged basins. *Global NEST Journal*, 7(3):296-305.
- Dooge, J.C.I. 2005. Bringing it all together. *Hydrology and Earth System*, 9:3-14.
- García-Villalpando, J., Castillo-Morales, A., Ramirez-Guzmán, M.E., Rendón-Sánchez, G., y Larqué-Saavedra, M.U. 2001. Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhoffer para la selección de medias. *Agrociencia*, 35:79-86.

- Hong, Q.N. 2006. Rainfall-Runoff Modeling in the ungauged Can Le Catchment, Saigon River Basin. MSc Thesis in Geoinformation Science and Earth Observation. ITC. The Netherlands. 108 p.
- INAFED. 2005. Enciclopedia de los Municipios de México. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Gobierno del estado de Guerrero. H. Ayuntamiento de Tlalchapa. Consultada: 15-mayo-07. Disponible en: <http://www.guerrero.gob.mx/?P=tlalchapa>.
- Jeniček M. 2007. Rainfall-runoff modeling in small and middle-large catchments – an overview. *Geografie – Sbornik*, 111(3): 305-313.
- Jonhson, C.A., Yung, A.C., Nixon, K.R. and Legates, D.R. 2001. The Use of HEC-GeoHMS and HEC-HMS to Perform Grid-based Hydrologic Analysis of a Watershed. Dodson & Associates, Inc. Computational Geosciences, Inc. Houston, Texas, USA. 4p.
- Juárez-Méndez, J. 2007. Evaluación de los efectos del cambio de uso del suelo en la relación precipitación-escurrimiento de la cuenca del río Huehuetán, Chiapas. Tesis de Maestría en Ciencias. Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 93 p.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K. and Maidment, D.R. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75:325–336.
- Koutsoyiannis, D. 2004. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences*, 49(4):575-590.
- Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N. and De Jong, R. 2007. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 337:258-268.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. y Paulhus, J.L. H. 1977. *Hidrología para ingenieros*. 2da ed. McGRAW-HILL. México. 386 p.
- Manson, R.H. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1):3-20.

- McColl, C. and Agget, G. 2006. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, in press.
- McCuen, R. H. 2005. *Hydrologic analysis and design*. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Maryland. 3rd Edition. Prentice Hall. 859 p.
- Melesse, A.M., Graham, W.D. and Jordan, J.D. 2003. Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-based storm runoff response and hydrograph analysis: part 2. *Journal of Spatial Hydrology*, 3(2):1-28.
- Melesse, A.M., Nangia, V. and Wang, X. 2006. Hydrology and water balance of Devils Lake Basin: Part 1 - Hydrometeorological analysis and lake surface area mapping. *Journal of Spatial Hydrology*, 6(1):120-132.
- Mockus, V. 1957. Use of storm and watershed characteristics in syntetic unit hydrograph and application. U.S. Soil Conservation Service. (Citado por Linsley *et al.*, 1977).
- Oñate-Valdivieso, F. 2005. Aplicación del procesamiento digital de imágenes Landsat para la determinación del número de curva (CN) en la cuenca alta del río Catamayo. *Revista Electrónica de la REDLACH*, 1(2):7-10.
- Oñate-Valdivieso, F. 2006. Aplicación de técnicas de fotointerpretación, modelamiento hidrológico y SIG en un estudio de hidrología urbana en la sierra ecuatoriana. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre 2006. 7 p.
- Perevochtchicova, M. y García-Jimenez, F. 2006. Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 61:24-37.
- Pizarro, R., Araya, S., Jordán, C., Farías, C., Flores, J.P. and Bro, P.B. 2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology*, 327:249–257.
- Rivera-Toral, F. 2007. Cambio de uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos de la cuenca del río Coatán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. 112 p.

- Sang-Ho, K., Mi-Seon, L., Geun-Ae, P. and Seong-Joon, K. 2007. Application of QuickBird satellite image to storm runoff modeling. *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(1):15-20.
- Sherman, L.K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit graph method. *Engineering News Record*, 108:501-505.
- Shi, P.J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J., Ge, Y. and Qiu, G.Y. 2007. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69:31–35.
- Siriwardena, L., Finlayson, B.L., and McMahon, T.A. 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326:199–214.
- Sivakumar, B. 2005. Correlation dimension estimation of hydrological series and data size requirement: myth and reality. *Hydrological Sciences*, 50(4):591-603.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W. Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S. and Zehe, E. 2003. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences*, 48(6): 857- 880.
- Sullivan, A., Ternan, J.L. and Williams, A.G. 2004. Land use change and hydrological response in the Camel catchment, Cornwall. *Applied Geography*, 24:119-137.
- Tetumo-García, J. 1993. Apuntes de hidrología superficial. Tesis de Licenciatura. Departamento de Irrigación. UACH. Chapingo, México.
- TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio del Medio Ambiente. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. *Ingeniería medio ambiental*. 2da ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 945 p.
- Triviño, P.A. y Ortiz, R.S. 2004. Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos. Instituto Universitario de Geografía Universidad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 35:67-83.
- US SCS (United States Soil Conservation Service), 1973. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds. Technical Publication 149. USDA-NRCS, Washington, DC.

- US SCS (United States Soil Conservation Service), 1986. Urban Hydrology for Urban Watersheds. Technical Release 55. USDA NRCS, Washington, DC.
- USACE (United States Army Corps of Engineers), 2000. Hydrologic Modeling System-HEC-HMS: Technical Reference Manual. USACE, Washington, DC.
- USACE, 2003. Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoHMS: User's Manual, Version 1.1. USACE, Davis, CA, USA.
- USDA. 1972. National Engineering Handbook. Section 4 Hydrology. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Chapter 16 Hydrographs. 26 p.
- USDA. 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall. National Engineering Handbook. Part 630 Hidrology. Chapter 10. USDA Natural Resources Conservation Service. 51 p.
- Valera-Venegas, G. 2006. Dinámica del cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca del río chico, Tulancingo, Hgo. Tesis. Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. UACH. 145 p.
- Wu, W., Hall, C.A.S., and Scatena, F.N. 2007. Modeling the impact of recent land-cover changes on the stream flows in northeastern Puerto Rico. Hydrological Processes. in press.
- Zhang, Y.K. and Schilling, K.E. 2006. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: effect of land use change. Journal of Hydrology, 324:412–422.

CAPÍTULO IV. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

Desde tiempos antiguos existía un interés por tratar de explicar la relación entre la cobertura en la cuenca y su ciclo hidrológico. Andréassian (2004) escribió una biografía histórica sobre la evolución del pensamiento sobre el papel hidrológico de los bosques. Menciona a diversos pensadores entre los que destacan, Plinio el Viejo (siglo I a.C.) quien fue probablemente el primero en aludir el papel hidrológico de los bosques. En su obra llamada "Natural History" mencionó que la corta de árboles en la parte alta de la cuenca provocaba inundaciones en el verano. Otro personaje a quien describe Andréassian (2004) fue Rauch, un hidrólogo forestal de origen francés que vivió a principios del siglo XVII, como uno de los líderes más prolíficos y entusiastas que consideró a los bosques como un medio indispensable entre las nubes de la atmósfera y el suelo de la tierra. En la tierra ideal de Rauch, el papel de los árboles es simple: "los árboles pueden ser considerados como sifones, es decir, intermediarios entre las nubes y la tierra; las ramas más altas atraen a las nubes cargadas de humedad, las acercan y descargan en las montañas protegiendo al agua de la evaporación, con ella alimentando manantiales y arroyos y creando el flujo superficial". Además de estas personas existieron otros que se mantuvieron en la búsqueda de evidencias medibles y comprobables para explicar la relación agua-bosque.

Actualmente, dicha relación está completamente probada y documentada en diversa literatura que aborda los efectos de la cobertura y uso del suelo en el escurrimiento (Beschta *et al.*, 2000; Bent, 2001; Caissie *et al.*, 2002; Cosandey *et al.*, 2005). Uno de los métodos más empleados para estimar esta relación es la Curva Numérica del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS-CN) (USDA, 2004).

En la actualidad el estudio del ciclo hidrológico es relevante para entender los cambios climáticos, teniendo gran importancia el fenómeno de la precipitación en una cuenca que depende mucho del tipo de cubierta: bosques, selvas, pastizales, área agrícola o

ganadera, área urbana, etc., para entender la influencia ligada con el escurrimiento. Los estudios han sido el cambio de uso del suelo por ejemplo de bosque a agrícola, efecto de los bosques manejados, efecto de la deforestación, cosecha de madera, aclareos en el periodo activo e inactivo de crecimiento de los bosques, las condiciones del suelo, clima (Beschta, *et al.*, 2000; Bent, 2001; Caissie, *et al.*, 2002; Andréassian, 2004; Chakraborty, 2005; Cosandey, 2005, McColl y Aggett, 2006).

Esta tesis consideró el análisis de la dinámica de uso del suelo en la cuenca del Río Grande y su posible efecto en el escurrimiento superficial de la corriente principal. Se presume que en los últimos 30 años ha existido un cambio en el uso del suelo repercutiendo en las características hidrológicas de la cuenca, siendo la principal causa de las inundaciones presentadas en la planicie agrícola de la parte baja.

En el Capítulo II se presenta un estudio realizado para evaluar la dinámica del cambio de uso del suelo mediante imágenes de satélite (Landsat: MSS 1973, TM 1986, ETM 2001 y QuickBird 2006). Se obtuvieron mapas de vegetación y uso del suelo para las fechas mencionadas, mediante técnicas de clasificación supervisada para las imágenes Landsat y con digitalización en monitor para la imagen QuickBird. A pesar de que los mapas obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes fueron pobremente validados, dado el escaso nivel de detalle y en algunas ocasiones error de etiquetado en las bases cartográficas de referencia provenientes de dependencias oficiales, fue posible visualizar una tendencia a la pérdida de coberturas arboladas a pastizal.

Finalmente, en el Capítulo III se presenta un estudio realizado para determinar el efecto en el escurrimiento superficial de los cambios detectados en la cobertura para las fechas de análisis 1973, 1986, 2001 y 2006. Esto se realizó mediante el programa de modelamiento hidrológico HEC-HMS basado en la simulación de eventos de tormenta, ya sea con datos registrados de tormentas en pluviogramas o con tormentas unitarias predefinidas (hietogramas) y escaladas a una lámina máxima esperada para un determinado periodo de retorno (100 años) y calculada con precipitaciones históricas máximas mediante el ajuste de alguna distribución probabilística de extremos como

Gumbel o Log Normal (Koutsoyiannis, 2004). Los parámetros seleccionados fueron: la tormenta sintética tipo II, curva numérica del SCS (Oñate-Valdivieso, 2005), tiempo de retraso, tránsito de avenidas en cauces para cada subcuenca y para cada año. El modelo HEC-HMS calculó los hidrogramas por subcuenca y a la salida de la cuenca. De manera inicial, se observó una tendencia al incremento del escurrimiento reflejado en el aumento de gasto pico de los hidrogramas a la salida de la cuenca. No obstante, debido a la poca magnitud de los incrementos encontrados, para concluir que existió un efecto en el escurrimiento, se procedió a calcular una comparación de medias mediante el procedimiento de Duncan (García-Villalpando *et al.*, 2001). Este análisis concluyó el resultado final de no existir diferencias significativas en el escurrimiento para los periodos analizados. Una de las posibles causas fue que el cambio de cobertura detectado (arboladas a pastizales) no permitió alcanzar diferencias muy altas en el escurrimiento por tener curvas numéricas similares.

4.1. Literatura citada

- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291:1–27.
- Bent, G.C. 2001. Effects of forest-management activities on runoff components and ground-water recharge to Quabbin Reservoir, central Massachusetts. *Forest Ecology and Management*, 143:115-129.
- Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset A.E., and Surfleet, C.G. 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233:102-120.
- Caissie, D., Jolicoeur, S., Bouchard, M. and Poncet, E. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *Journal of Hidrology*, 258:232-248.
- Chakraborty, D., Dutta, D. and Chandrasekharan, H. 2005. Spatial modeling for hydrological response behaviour of an arid watershed, India - remote sensing and GIS approach. *Journal of Spatial Hydrology*, 5(1):47-66.

- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J. Folton, N., Mathys, N., and Richard, D. 2005. The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301:235–249.
- García-Villalpando, J., Castillo-Morales, A., Ramirez-Guzmán, M.E., Rendón-Sánchez, G. y Larqué-Saavedra, M.U. 2001. Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhoffer para la selección de medias. *Agrociencia*, 35:79-86.
- McColl, C. and Agget, G. 2006. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, in press.
- Oñate-Valdivieso, F. 2005. Aplicación del procesamiento digital de imágenes Landsat para la determinación del número de curva (CN) en la cuenca alta del río Catamayo. *Revista Electrónica de la REDLACH*, 1(2):7-10.

