



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Centro de Investigaciones en Ecosistemas

Regionalización eco-hidrológica de la
cuenca del río Cuitzmala, Jalisco, México

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(Biología Ambiental)

P R E S E N T A

Pablo César Piña Poujol

DIRECTOR(A) DE TESIS: Doctor José Manuel Maass Moreno

MÉXICO, D.F.

Febrero, 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Empiezo agradeciendo a las instituciones que han abierto sus puertas para el desarrollo de mi educación. A la UNAM, quien a través de entidades académicas como el Centro de Investigaciones en Ecosistemas, y administrativas como la Dirección de General de Estudios de Posgrado, me permitieron realizar mis estudios de Maestría. Asimismo, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del cual fui becario (#189271). Agradezco también al proyecto PAPIIT-DGAPA IN222703 (UNAM), el cual me proveyó de los recursos necesarios para el desarrollo de mi investigación, y a todas aquellas instituciones que han hecho posible la elaboración del presente escrito.

Quiero agradecer por la muy variada e interesante asesoría brindada, a los miembros de mi comité tutorial: el Dr. Jorge López Blanco, el Dr. Felipe García Oliva y el Dr. Manuel Maass Moreno. De igual forma, agradezco por la bien atinada atención que le dieron a mi trabajo el resto de los miembros del Jurado de esta tesis, y por la amplia disposición para compartir juicios acerca de mis inquietudes metodológicas durante el desarrollo del proyecto: Dr. Manuel Mendoza Cantú y Dra. María Mazari Hiriart.

A mis maestros, quienes continuamente han despertado mi curiosidad y reflexión entorno a la naturaleza. Manuel, Felipe, Víctor, Gela, Luis Miguel, Patty, Memo, Kathy, Miguel, Alejandro, Diego, Ellen, Horacio, Francisco, Lorenzo.

A mis compañeros, amigos, colegas y demás, muchos somos y así seguimos entonces, pululando. Los pasos por Morelia han sido de memoria fraternal. Raquel, Pavka, Toño, Rafa, Alfredo, Beto, Luzpi, Adriana, Noé, Sandra, Ana, Ana Laura, Quetzal, Cris, Gaby.

También quiero agradecer al técnico del SIG Jesús Fuentes, por sus consejos y revisiones de mi trabajo, así como por las intensas y variadas sesiones de debate político o tema de ocasión.

Le agradezco al técnico Raúl Ahedo por su gran apoyo logístico y administrativo en todo momento, así como al buen Roberto (máximo asistente de la coordinación del Posgrado en el CIEco).

A la Estación de Biología Chamela y su personal. Al Dr. Ricardo Ayala, Jefe de la Estación, también a Doña Eva y Doña Elena. También agradezco al personal del INEGI y la CNA.

A Manuel le hago una distinción especial. Conocerle ha sido percibir unas fuertes ganas por apoyar el crecimiento; con entusiasmo reconozco que has venido contribuyendo de forma sustancial en mi formación por las aulas y más allá.

Finalmente a mi familia, que migra, que cambia, que viene creciendo adentro y afuera de sí. A Verónica y Xitlali, Anna y Maia. Cierro los ojos, distingo veredas con cuestas, lomas, colores, aromas. Abro la vista y de nuevo, estamos ahí, acá. Naciendo, saliendo, despertando, percibiendo.

A todos ustedes GRACIAS

Adán y Eva (1952....Fragmento)

-¿Has visto cómo crecen las plantas? Al lugar en que cae la semilla acude el agua: es el agua que germina, sube al sol. Por el tronco, por las ramas, el agua asciende al aire, como cuando te quedas viendo el cielo de mediodía y tus ojos empiezan a evaporarse.

Las plantas crecen de un día a otro. Es la tierra la que crece; se hace blanda, verde, flexible. El terrón enmohecido, la costra de los viejos árboles, se desprende, regresa.

¿Lo has visto? Las plantas caminan en el tiempo, no de un lugar a otro: de una hora a otra. Esto puedes sentirlo cuando te extiendes sobre la tierra, boca arriba, y tu pelo penetra como un manojo de raíces, y todo tú eres un tronco caído.

-Yo quiero sembrar una semilla en el río, a ver si crece un árbol flotante para treparme a jugar. En su follaje se enredarían los peces y sería un árbol de agua que iría a todas partes sin caerse nunca.

Jaime Sabines

¡MAIA!

Índice

1.1	Introducción	1
1.2	Agua y humanos	2
1.2.1	Patrón de consumo	2
1.2.2	Distribución del recurso agua	3
1.3	Ciclo hidrológico	4
1.3.1	Atmósfera y agua	5
1.3.2	Agua y cobertura vegetal terrestre	6
1.3.3	Alteración de la dinámica del agua	9
1.4	Manejo de ecosistemas	10
1.5	Estudios a largo plazo	11
1.6	Agua y México	12
1.7	Regionalización	16
2	Antecedentes	17
3	Justificación	18
4	Objetivos	18
5	Método	18
5.1	Unidad de estudio	18
5.2	La cuenca del río Cuitzmala	19
5.3	Marco Conceptual	23
5.4	Estructura	26
5.4.1	Cartografía base	26
5.4.2	Procesamiento de las curvas de nivel	26
5.4.3	Clasificación de la información espacial	27
5.5	Eventos	29
5.5.1	Eventos de entrada: datos de precipitación	29
5.5.1.1	ERIC II	29
5.5.1.2	Normales climatológicas	29
5.5.1.3	Cálculo de la lluvia	29
5.5.2	Eventos de respuesta	30
5.5.2.1	Escorrentía	30
5.5.2.2	Balance hídrico	30
5.6	Síntesis	31
5.6.1	Puntos potenciales de monitoreo	31
5.6.2	Matriz de decisión	33
6	Resultados	34
6.1	Estructura	34
6.1.1	Red de drenaje	34
6.1.2	Pendientes	34
6.1.3	Litología	35
6.1.3	Mapa de poblados	36
6.1.3	Cobertura vegetal	37
6.2	Eventos	39
6.2.1	Precipitación	39

6.2.1.1 Bases de datos	39
6.2.1.2 Cálculo de la lluvia	40
6.2.2 Cálculo del balance hídrico	43
6.2.3 Escorrentía	48
6.3 Síntesis	49
6.3.1 Matriz de decisión	49
6.3.2 Puntos de monitoreo	51
6.3.3 Caracterización de los puntos de monitoreo	52
7 Discusión	54
7.1 Propuesta de estudio a largo plazo en la Cuenca del río Cuitzmala	60
8 Consideraciones finales	62

Resumen

En ambientes tropicales secos el agua constituye el principal factor limitante para el crecimiento de las plantas y, por ende, de la productividad primaria del ecosistema. En términos de la disponibilidad de agua, los ecosistemas responden no sólo ante su escasez, sino también ante una naturaleza intermitente e impredecible, producto de las variaciones inter e intra-anales de la precipitación, las variaciones estacionales en energía disponible para el proceso de evapotranspiración, así como también por las variaciones espaciales en las características del suelo, que controla los procesos de infiltración. Esta incertidumbre ha inducido en la vegetación el desarrollo de estrategias para responder ante la falta de agua, y optimizar su productividad. En este sentido, los enfoques teóricos y prácticos tanto de la hidrología como de la ecología se han conjuntado para mejorar la comprensión del ciclo hidrológico en diferentes ecosistemas y sus relaciones entre los componentes bióticos y abióticos, lo que ha resultado en la generación de indicadores de la integridad de los sistemas naturales.

El objetivo general del presente proyecto, fue el de generar las bases para el seguimiento a largo plazo de parámetros eco-hidrológicos en la cuenca del río Cuitzmala. Para ello fue necesaria una regionalización eco-hidrológica de la cuenca.

La regionalización se realizó con base en un criterio de subsistemas (subcuencas) denominadas Unidades de Respuesta Ecohidrológica (UREh), cuya función es reconocer mecanismos de retroalimentación (a diferentes escalas espaciales y temporales) entre el componente de cobertura vegetal y el componente hidrológico. La elaboración de la propuesta de monitoreo eco-hidrológico, se basó en un modelo conceptual que parte de la naturaleza de la lluvia como evento disparador del proceso hidrológico, su incidencia sobre los componentes del espacio (área de la cuenca, geomorfología, cobertura del suelo, asentamientos humanos, relieve, etc.) y la respuesta de la cuenca en su conjunto ante dicho evento disparador.

Con aproximadamente 1,089 Km², la cuenca del río Cuitzmala presenta un marcado gradiente altitudinal, en donde la precipitación aumenta con la altura y los tipos de vegetación varían acorde con la misma, de tal forma que en las zonas bajas (el suroeste) predomina la selva caducifolia y subcaducifolia, mientras que hacia la parte alta (el noreste) comienzan los bosques de encino (a partir de los 400 m.s.n.m.), bosque mesófilo de montaña (a partir de los 700 m.s.n.m.) y contiguo al mismo, bosque de pino-encino (a partir de los 800 m.s.n.m.). Los patrones de lluvia

resultaron ser marcadamente estacionales, concentrándose en cinco meses del año a partir de junio.

Con base en la red de drenaje se seleccionaron puntos potenciales de monitoreo, cuya información se integró en una matriz de decisión que ayudó a jerarquizar cada sitio potencial. Asimismo, se describieron los atributos asociados al margen de influencia de cada punto de medición seleccionado.

Con base en la información generada, se hizo una propuesta de monitoreo eco-hidrológico a largo plazo, que incluye los siguientes aspectos: una descripción de las principales unidades geomorfológicas; la demarcación detallada de su cobertura vegetal; la evaluación de la evapotranspiración actual en las diferentes sub-cuencas; un análisis de la respuesta intra e inter anual de la cobertura vegetal; la ubicación de estaciones de monitoreo (para lluvia, temperatura, calidad y cantidad de esorrentía); la modelación de los procesos hidrológicos; y el registro detallado de usuarios del agua, así como de las estructuras asociadas a su aprovechamiento.

Abstract

In tropical dry environments water constitutes the trigger factor for primary productivity. Vegetation has developed different strategies so as to respond efficiently to a high uncertainty in terms of multiple scales of space-time variations in precipitation, evapotranspiration and topography. In this sense, the theory and practice of both ecological and hydrological approaches together provide new understandings in the field of ecosystems and water cycle dynamics.

Recognizing the inherent heterogeneity of tropical dry environments, landscape classification is needed to guide future data collection efforts to support generation of LTER databases. Furthermore, as a template for developing the Mexican LTER network, ecohydrological classification also helps in establishing a regional context for LTER sites by enlarging space and time scales to produce new insights into dynamics of natural systems using data from LTER monitoring networks. The objectives of this research were to explore and develop ecohydrological approaches to enable this classification. The first step for the construction of a long term ecohydrological monitoring network involved an ecohydrological regionalization of the Cuitzmala river watershed. The study unit was regionalized using the Sub-catchments criteria, recognizing these sub-units as Ecohydrological Response Units (EhRU) that integrate unique combinations of climate, vegetation, geology/geomorphology, and human settlement. EhRU established the main spatial unit as the basis for watershed classification identifying the unique combinations of main related components and their feedback loops within ecohydrological dynamics in a watershed spatial context. A decision matrix to identify monitoring sites was generated to maximize capture of representative data on landscape heterogeneity for future monitoring efforts within the LTER network. Thus, EhRU is part of a conceptual framework, where precipitation represents the trigger factor which promotes a response over the organization and structure of space elements, such as watershed area, geomorphology, vegetation land cover, human settlements, drainage network, lithology, etc.

Finally, a set of descriptions and long term eco-hydrological monitoring parameters were proposed: characterization of the main geomorphologic units; a detail vegetation land cover classification; measures of actual evapotranspiration across the EhRU; intra and inter annual response analysis of vegetation land cover; location of monitoring stations (rainfall, temperature, quality and quantity of runoff); hydrological processes simulation; and a detail register of water users, including infrastructures.

1 Introducción

El agua es uno de los elementos que sintetiza la concepción de la vida en la Tierra. Características como las de sus propiedades emergentes a través de los diferentes niveles de organización de la materia y energía, o su abundancia y disposición entre lo vivo y no vivo, han quedado de manifiesto a través de las ramas del conocimiento. El ser humano forma parte de la fracción viva en la Tierra, sin embargo, y como parte inherente de la dinámica de todo sistema biótico, a su vez dispone de elementos abióticos que se encuentran directa o indirectamente relacionados con el ciclo hidrológico. Pensar que el agua "es vida" es una práctica común, sin embargo también puede ser válido pensar que el agua es "no vida", ya que la constitución y disposición de muchos elementos abióticos se encuentra relacionada con alguna acción hidrológica (como la formación del relieve terrestre). Su carácter tan diverso y multiescalar en términos espaciales y temporales, la convierte en un elemento vinculante, por lo que su estudio puede representar un gran ejercicio no sólo de análisis, sino también de síntesis.

Para el caso de las prácticas de aprovechamiento de los recursos naturales (que en general tienen alguna relación con la dinámica hidrológica de los sistemas locales), actualmente se proponen ser estudiados y ejecutados con un enfoque integral u holístico (Closs *et al.*, 2004; Falkenmark & Lindh, 1993; Gleick, 2000; King *et al.*, 2003). Dicho enfoque plantea un trabajo interdisciplinario capaz de generar escenarios que tomen en cuenta de la mejor manera la incertidumbre, evaluando la ejecución de programas por medio del monitoreo a largo plazo de parámetros clave. Es así que hoy en día, con el agua, se vienen estableciendo puentes de comunicación emergentes entre disciplinas como la economía, geomorfología, climatología, hidrología, limnología, ecología e incluso administración pública, por mencionar algunas.

1.1 El agua y el ser humano

1.1.1 Patrón de consumo

El patrón de consumo del agua en la actualidad merece una revisión histórica. Resulta indispensable contextualizar los procesos de apropiación de este recurso vital no nada más para el ser humano, sino también para la vida en general y para la dinámica energética del planeta. La propuesta no debe ser únicamente para recapitular sobre cómo el desarrollo de la cultura ha implicado una transformación constante en la organización de la humanidad (a tal punto que nos encontramos en un panorama de búsqueda de identidad y supervivencia humana), sino también acerca de cómo el desarrollo de la técnica sobre el entorno ha dado origen a una alteración de las dinámicas de la naturaleza a niveles planetarios. Una generalización con eventos que resumen significativamente la historia de apropiación del agua por parte de la humanidad puede ilustrarse de la siguiente manera:

Tabla 1. Resumen de acontecimientos significativos relacionados con el desarrollo humano y el aprovechamiento del recurso hídrico (Gleick, 2000).

Tiempo	Evento
Hace 12 000	Cazadores y recolectores se abastecían de cauces naturales como ríos y lagos
Hace 7 000	La escasez de agua local y el desarrollo de la agricultura promueve la invención de la irrigación
Hace 1 100	Colapso de la civilización Maya por sequías prolongadas (hipótesis)
Mediados de 1800	Contaminación fecal en las fuentes de aguas superficiales generan problemas severos de salud (tifoidea, cólera) en algunas de las ciudades más grandes del mundo
1858	Año de la gran peste en Londres por los desechos arrojados al río Támesis
Finales de 1800- principios de 1900	Las presas se convierten en un manejo común del aprovechamiento del agua
1900	La revolución verde fortalece la dependencia humana por la agricultura de irrigación
Siglo XX	La calidad del agua se altera en gran medida por los compuestos químicos provenientes de la industria y de la agricultura
1972	Aparece en Estados Unidos el acta de limpieza del agua limpia (Clean Water Act); ejemplo de un reconocimiento por proteger la cantidad y calidad del agua

La necesidad del agua por el ser humano, ha hecho que históricamente la cultura se encuentre estrechamente ligada al agua, por lo que mediante el desarrollo de la secuencia tecnológica y disciplinar en torno a su uso, y con la práctica de muchas otras actividades

humanas, este uso también se ha ido manifestando en sus diferentes consecuencias, con una notable diversificación que pasa por el deterioro ambiental, salud humana, baja de producción agrícola e industrial, déficit energético, etc. (Baron *et al.*, 2003; Falkenmark & Lindh, 1993; Middleton & Thomas, 1997; Postel *et al.*, 1996; Pringle, 2001).

El manejo del agua para los cultivos ha sido la principal motivación de la humanidad para controlar, y en consecuencia alterar, las fuentes de agua (Gleick, 2000). Hoy en día las principales demandas por agua dulce siguen fundadas, en primera instancia, para la irrigación de cultivos, seguidas por el uso doméstico, mantenimiento de servicios urbanos y uso industrial (Baron *et al.*, 2003; Gleick, 2000; Postel *et al.*, 1996). La mayoría de las fuentes siguen proviniendo de los escurrimientos superficiales, sin embargo, aproximadamente un cuarto de la población del mundo obtiene el agua de mantos acuíferos, zonas en donde el intercambio de agua no es tan intenso, por lo que sus dinámicas cada vez se encuentran más alteradas a tasas desiguales con respecto a su capacidad de recuperación (Jakson *et al.*, 2001).

Los usos consuntivos del agua, se refieren al agua que no retorna a la corriente después de ser utilizada, es decir, que la mayoría de las veces entra a la atmósfera vía evapotranspiración. Este uso se relaciona principalmente con la agricultura (87% del total del consumo de agua en el planeta), la industria y la actividad doméstica (Postel *et al.*, 1996). Existe otro uso, denominado no consuntivo, que permite retornar el agua a los escurrimientos en volúmenes muy semejantes a los originales, aunque frecuentemente contaminada o transformada por el uso de la acuicultura, industria hidroeléctrica y navegación.

1.1.2 Distribución del recurso agua

Además de los problemas de deterioro del recurso hidrológico mencionados anteriormente, la distribución de los escurrimientos globales no corresponde muy bien con la distribución de la población humana. Estudios revelan que en la Tierra hay 1×10^9 km³ de agua (Chahine, 1992; Schlesinger, 1997; Schmitt, 1995), de la cual < 3% se encuentra disponible para beber. Los lagos de agua dulce y ríos contienen 100 000 km³ de agua, < 0.01% del total de agua que hay en el planeta (Schwartz *et al.*, 1990). Mientras que Asia cuenta con el 69% de la población mundial, y el 36% de los escurrimientos globales, Sudamérica tiene el 5% de la población mundial, con el 25% de los escurrimientos globales. A su vez, una cantidad considerable de los escurrimientos son inaccesibles, como es el caso del río Amazonas que representando el 15% de los escurrimientos

del planeta, apenas resulta accesible al 0.4% de la población mundial (25 millones de personas) (Postel *et al.*, 1996).

Se conoce como uso de la evapotranspiración terrestre a la cantidad de agua dulce disponible que se evapora y transpira para producir biomasa aprovechable. Se estima que la humanidad utiliza aproximadamente el 26% del total de la evapotranspiración terrestre y el 54% de los escurrimientos accesibles en el mundo (Postel *et al.*, 1996). Con respecto a los escurrimientos accesibles, se espera que en los próximos 30 años nuevas presas puedan incrementar en un 10% su aprovechamiento. Sin embargo, resulta preocupante que las proyecciones de crecimiento demográfico de la humanidad se disparan en un 45% o más, además de que el patrón de consumo de agua durante los últimos 300 años ha mostrado un incremento dramático, sobre todo en el último siglo (Postel *et al.*, 1996).

1.2 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un continuo de circulación de agua entre la Tierra y la atmósfera, cuya energía proviene del sol y la fuerza de gravedad. La fuerza de gravedad interviene sobre todos aquellos flujos que tienen un componente vertical, mientras que la energía solar además de vincularse con la evaporación y transpiración, también influye sobre las corrientes atmosféricas y marinas, que a su vez intervienen en las variaciones climáticas. Al menos en Estados Unidos, se ha calculado que la energía solar aporta por centímetro cuadrado de superficie terrestre unas 400 calorías diarias, de las cuales aproximadamente el 50% se consume evaporando agua (Hewlett, 1982). Las 200 calorías restantes calientan a la tierra, el aire y el océano, produciendo corrientes convectivas que a su vez distribuyen el calor, regulando así a parte del clima, y transfiriendo el agua evaporada del océano hacia los continentes (Hewlett, 1982). En promedio la energía solar evapora anualmente 425 000 km³ de agua marina, la mayoría de la cual retorna directamente, salvo un 10% que precipita sobre territorio continental (Jakson *et al.*, 2001). De ser este último porcentaje la única fuente de agua, la media anual de precipitación para toda la superficie terrestre sería de 250 mm, un valor asociado a zonas extremadamente áridas. No obstante, cantidades considerables de agua (dos terceras partes del total que precipita en la superficie) son recicladas a partir de las plantas y el suelo, estableciendo una retroalimentación entre la superficie terrestre y el clima regional (Pielke *et al.*, 1998; Rodríguez-Iturbide, 2003). A su vez, esta dinámica involucra a ciclos de elementos esenciales en el funcionamiento de la vida, como el C y el N. El movimiento

de estos elementos en el ecosistema está estrechamente vinculada al ciclo hidrológico, generando una retroalimentación entre la vegetación y el clima que nos permiten plantear al agua como un importante moderador de los ciclos biogeoquímicos de la Tierra (Gerten *et al.*, 2003; Jakson *et al.*, 2001; Rodríguez-Iturbide, 2003). Así pues, la modificación de la cobertura vegetal por parte del ser humano, tiene un impacto en la distribución y dinámica del agua y, con ello, en el transporte de sus constituyentes, como son los elementos minerales disueltos en ella, y las partículas de suelo y materiales suspendidos.

1.21 Atmósfera y agua

El agua en la atmósfera ejerce una influencia considerable sobre el clima y el mismo ciclo hidrológico (Jakson *et al.*, 2001). Se calcula que del calentamiento total que aportan los gases invernadero en la Tierra, dos terceras partes provienen del vapor de agua. De no existir tales gases, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería en grados centígrados bajo cero, dato que tendría como resultado una ausencia virtual del agua en estado líquido (Ramanathan, 1988). Lo anterior hace que se reafirme al tema del agua como una red dinámica de retroalimentación entre estructuras y eventos, y al igual que el agua de los escurrimientos, la humedad atmosférica es imprescindible para la vida pues se trata de la fuente de precipitación del planeta (Jakson *et al.*, 2001).

La precipitación en la superficie terrestre es mayor a la evaporación que ocurre en ella, y el excedente, de 40 000 km³ de agua, retorna al mar en forma de ríos y escurrimientos del subsuelo (Schwartz *et al.*, 1990). La forma en la que transita el agua dulce hacia el mar, se encuentra determinado tanto por la naturaleza de la precipitación (lluvia o nieve), como por la temporalidad climática (patrones de estacionalidad de la lluvia), así como por la topografía de la región (Jakson *et al.*, 2001).

1.2.2 Agua y cobertura vegetal terrestre

La ecohidrología es una disciplina integrativa y centrada en la descripción de las dinámicas del agua derivadas de las relaciones clima-vegetación-suelo (Janauer, 2000; Rodríguez-Iturbide, 2000, 2003; Zalewski, 2002). Cuando en los ecosistemas se establece una estrecha relación funcional con el agua, se presentan estructuras complejas cuyas características y propiedades dinámicas dependen de muchos vínculos interrelacionados entre el clima, el suelo y la vegetación (Rodríguez-Iturbide, 2003; Wilcox *et al.*, 2003). Por un lado, el clima y el suelo controlan las dinámicas de la vegetación, y por otro lado la vegetación genera un importante control en el balance hídrico y es responsable de mucha de la retroalimentación a la atmósfera (Rodríguez-Iturbide, 2003).

Lo anterior deja en claro que las relaciones entre la vegetación y la superficie terrestre respecto al ciclo hidrológico, son multiescalares. Las plantas ejercen un efecto considerable sobre la naturaleza de los escurrimientos, por la sinergia entre el albedo, la intercepción, el comportamiento estomático, la transpiración, el área foliar y la fenología (Gerten *et al.*, 2003). Por otro lado, el balance hídrico es crucial en la formación de patrones de tipos de vegetación, patrones que a su vez terminan modificando a la naturaleza de los escurrimientos en los ecosistemas (Bergkamp *et al.*, 1999; Gerten *et al.*, 2003; Hutjes *et al.*, 1998; Ludwig *et al.*, 1997; Puigdefabregas *et al.*, 1999; Shachak *et al.*, 1998; Valentin & d'Herbes, 1999). De esta manera se reconoce que las variaciones interanuales entre los escurrimientos no están relacionadas únicamente con las diferencias en la precipitación y la geomorfología de los sistemas, sino también con la distribución geográfica de los tipos de vegetación. Así, la gama de comunidades vegetales presentes en el planeta reflejan una igualmente variada eficiencia en el uso del agua, sobre la cual los niveles atmosféricos de CO₂ influyen para la generación de evapotranspiración y escorrentía (Gerten *et al.*, 2003). Ante concentraciones elevadas de CO₂ se genera un efecto llamado "fertilización de CO₂", en el cual la asimilación de carbono por parte de las plantas, y por consiguiente la tasa fotosintética así como la productividad vegetal, es más alta por unidad de agua transpirada (por lo que la conductividad de agua a través de los estomas es menor). Se cree que debido al mantenimiento del balance entre pérdida de agua y absorción de CO₂, las plantas tienden a reducir la apertura de sus estomas.

El ejemplo más claro de regulación hídrica por parte de la vegetación es la apertura de los estomas en respuesta a las condiciones ambientales, como la temperatura, humedad, radiación,

concentración de CO₂ y humedad en el suelo; variables que también regulan la fotosíntesis de la planta (Gerten *et al.*, 2003; Rodríguez-Iturbide, 2003). De una manera más pasiva, debido a su albedo y estructura, la vegetación también afecta el balance energético terrestre y con ello las corrientes del viento y por ende, la dinámica hidrológica (Hutjes *et al.*, 1998). Cada vez queda más claro que en la regulación de los flujos de agua y energía a escala local, regional y del planeta, la superficie terrestre juega un rol determinante. Por consiguiente, modificaciones sobre la superficie terrestre, tales como cambios a gran escala de la cobertura vegetal y en el uso del suelo, terminan modificando al clima.

Un ejemplo de lo anterior son las prácticas de conversión del uso del suelo, que a su vez modifican directamente la composición, estructura y distribución de la cobertura vegetal. Resulta preocupante que generalmente las prácticas de aprovechamiento del territorio sean asociadas con la quema de biomasa, contribuyendo de manera sustancial a las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera (Hutjes *et al.*, 1998); de hecho, la segunda fuente de emisiones de CO₂ en el mundo proviene de la deforestación, después de las emisiones de los combustibles fósiles (FAO, 1995). Esto es, además de estar interviniendo sobre la naturaleza de los escurrimientos y la evapotranspiración en la superficie terrestre, nuestras prácticas de transformación de la cobertura vegetal, son una fuente sustancial de cambio climático.

La relación natural entre los procesos hidrológicos y ecológicos es estrecha, especialmente en el caso de zonas en las que el agua se encuentra presente de manera intermitente (e.g. ecosistemas estacionales), de manera abundante (como es el caso de humedales), o de manera escasa (e.g. regiones áridas y semi-áridas) (Middleton & Thomas, 1997; Wilcox *et al.*, 2003).

En latitudes tropicales y subtropicales abundan los ecosistemas que sufren de estrés hídrico, el cual es determinado por las fluctuaciones temporales de la humedad del suelo (Rodríguez-Iturbide, 2000, 2003). En términos de la disponibilidad de agua, la respuesta de los ecosistemas es controlada no sólo por la escasez de agua, sino también por su naturaleza intermitente e impredecible, por su relación con los cambios de temperatura a lo largo del año y por las características del suelo, que controla los procesos de infiltración (Rodríguez-Iturbide, 2000, 2003). Esta incertidumbre, tanto de la cantidad como de la temporalidad de lluvia, ha inducido en la vegetación el desarrollo de diferentes estrategias para responder ante el estrés hídrico, así como para optimizar su productividad (Maass *et al.*, en creación). Es por ello que, todo

esfuerzo hacia la modelación hidro-ecológica debe contemplar este carácter estocástico de la dinámica de la humedad del suelo, tanto espacial como temporal.

La naturaleza fluctuante del ciclo hidrológico, junto con la red dinámica de vínculos entre el sistema clima-suelo-vegetación, complica de manera considerable el análisis de los procesos involucrados. Por lo mismo, uno de los resultados contingentes del contexto actual en la investigación ambiental, ha sido la formalización de la no linealidad de las relaciones entre los mecanismos y estructuras del sistema biósfera-atmósfera. Los componentes de los sistemas dinámicos tienen relaciones bi o multidireccionales entre sí; lo cual significa que de manera inherente, cada componente del sistema se encuentra ejerciendo influencia a la vez que es influenciado (Gleick, 2000). La abstracción del agua como un elemento dinámico e íntimamente interrelacionado con el medio, ha permitido que las simulaciones de los recursos hídricos, como pueden ser los escurrimientos, se encuentren con un nivel de sofisticación notable (Gerten *et al.*, 2003). Sin embargo, la parametrización de la vegetación como elemento de retroalimentación a escalas de miles de km² es aún muy pobre. Las interacciones dinámicas en términos espaciales y temporales entre la biosfera y la hidrósfera, no han sido contempladas del todo por los modelos hidrológicos. Modelos que si han incorporado exitosamente dicha relación entre cobertura vegetal y dinámica hidrológica, como es el caso del SWAT (Soil and Water Assessment Tool <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>) requieren de la incorporación de una cantidad de parámetros que hacen de la simulación un proceso poco operativo (Torres-Benites *et al.*, 2004). Por consiguiente, en la mayoría de los modelos empleados para caracterización hidrológica no se pueden apreciar efectos claros cuando se presenta un cambio en la composición y la distribución de la vegetación (Gerten *et al.*, 2003). En este sentido, para la generación de indicadores de la integridad de los sistemas naturales, los enfoques teóricos y prácticos de la hidrología y la ecología resultan altamente complementarios en la comprensión e interpretación de características de los ecosistemas relacionadas con el ciclo hidrológico como concentración de sedimentos y nutrientes, tipos y fuentes de contaminantes, así como de la capacidad buffer de los sistemas ante eventos extremos como inundaciones (Janauer, 2000).

1.2.3 Alteración de la dinámica del agua

En la tabla 2 se presentan de manera general las condiciones de perturbación bajo las cuales se encuentran algunas características de las aguas continentales (Baron *et al.*, 2003)

Tabla 2. Lista de diferentes atributos del agua que han sido alterados a raíz del aprovechamiento de los recursos naturales. Cada atributo tiene su condición actual.

Característica	Condición
Movimiento	Bastante alterado
Uso	Altamente intensivo
Calidad	En constante decremento
Biota asociada a cuerpos de agua dulce	Altamente vulnerables

Las alteraciones al ciclo hidrológico producto de las actividades humanas, incluyen: las presas, la urbanización, el aclareo de la vegetación y la canalización de ríos y arroyos. Muchas de las actividades productivas implican la remoción de vegetación, con todo y raíces, en las cuencas. Esta transformación del paisaje altera a los procesos hidrológicos de los mantos freáticos (la dinámica de flujo, la captación de agua, las tasas de evapotranspiración, así como la cantidad y calidad de los escurrimientos) (Closs *et al.*, 2004). Estas alteraciones generalmente incrementan el flujo superficial de la escorrentía y disminuyen los tiempos de residencia del agua, lo que afecta negativamente a la infiltración de los sistemas. La acumulación de alteraciones afecta sustancialmente el ciclo hidrológico local, y modifica los regímenes naturales del agua a nivel regional, lo que genera impactos en el funcionamiento de los ecosistemas.

Un tercio de la población humana se encuentra viviendo con escasez de agua, sobre todo en el Medio Oriente y Norte de África, y aproximadamente 1.3 billones de personas no tienen un acceso adecuado al recurso debido a la calidad del mismo (Closs *et al.*, 2004). Así pues, como un recurso de vinculación global, el desarrollo del aprovechamiento del agua lleva implícita una alteración global en el ambiente (Janauer, 2000). Esto debe de ser abordado en su justa dimensión, de tal modo que las transformaciones en el paisaje, inherentes a las prácticas de aprovechamiento, resulten ser lo menos negativo posible. Tratar con el agua ahora necesariamente debe de estar relacionado con la cooperación, por lo que la interdisciplina intra e inter-institucional debe de ser un procedimiento llevado a cabo en todo proyecto de aprovechamiento y conservación de este recurso.

El reto es cómo se pueden manejar los recursos hídricos (necesarios), al mismo tiempo que se protege la complejidad de la naturaleza y la capacidad adaptativa de los ecosistemas

1.3 Manejo de ecosistemas

Desde su aparición, el concepto de desarrollo sustentable ha sido cada vez más citado en los proyectos de manejo de recursos naturales. Sin embargo, en la práctica, los enfoques para el manejo de recursos siguen dimensionando al ambiente bajo una perspectiva reduccionista (Zalewski, 2002). Por un lado, no ha habido el impulso que se requiere, a nivel institucional, para promover la investigación acerca de la dinámica estructural y funcional de los ecosistemas y, por otro lado, los valores sociales y económicos actuales no cuestionan, en suficiente medida, los riesgos que tienen las actividades de producción y consumo, en la alteración de los ecosistemas.

La aplicación del concepto de sustentabilidad tiene que encaminarse hacia una generación explícita de marcos contextuales, en donde el componente humano resulta ser un elemento clave del sistema (Kates *et al.*, 2001; Maass *et al.*, enviado). De esta manera el manejo de ecosistemas se encamina a la inclusión de aspectos como : 1) el desarrollo de la modelación para la comprensión de los sistemas naturales, 2) el reconocimiento de la escala, complejidad, conectividad, resiliencia y carácter dinámico de los ecosistemas, 3) el componente humano, y 4) el monitoreo y la adaptabilidad de los protocolos de manejo ambiental (Christensen *et al.*, 1996; Heissenbuttel, 1996; Kates *et al.*, 2001; Reichman & Pulliman, 1996).

El manejo de ecosistemas plantea un proceso que combina principios democráticos, análisis científicos, educación, y aprendizaje institucional para manejar a los recursos de una manera sustentable en un ambiente esencialmente dinámico (Christensen *et al.*, 1996; Maass *et al.*, 2005; Reichman & Pulliman, 1996). Los recursos sobre los que depende la población humana son proveídos de manera finita por los ecosistemas, y la distribución de estos no es uniforme en el tiempo y en el espacio, por lo que su demanda debe de estar relacionada con su disponibilidad (Christensen *et al.*, 1996; Heissenbuttel, 1996; Maass *et al.*, enviado). Es por lo mismo que uno de los principales retos de la actualidad, es afrontar el desacoplamiento presente entre las escalas espaciales y temporales en las que los humanos toman decisiones sobre el manejo de recursos, y las escalas en las que los procesos ecosistémicos operan (Kates *et al.*, 2001; Maass *et al.*, 2005; Reichman & Pulliman, 1996).

Los tomadores de decisiones deben reconocer que tanto el conocimiento, como sus enfoques para la comprensión de las funciones de los ecosistemas y una mejor práctica de manejo, es provisional y esta sujeto a cambio (Christensen *et al.*, 1996; Heissenbuttel, 1996). En

este sentido, los objetivos del manejo, protocolos y directrices, deben ser contemplados como hipótesis para optimizar un aprovechamiento. En consecuencia, los programas de monitoreo en el manejo de ecosistemas, representan un tipo especializado de investigación designado a evaluar las hipótesis que respaldan a las prácticas de manejo, de tal modo que la optimización se va demarcando también de forma dinámica o, mejor dicho, adaptativa (Christensen *et al.*, 1996; Kates *et al.*, 2001; Maass *et al.*, enviado; Meyer & Swart, 1996; Reichman & Pulliman, 1996).

Debido a lo anterior, uno de los aspectos centrales en el manejo de ecosistemas es la ampliación de las escalas temporales para la comprensión y uso de la naturaleza (Christensen *et al.*, 1996). A través de redes de monitoreo concebidas para un seguimiento a largo plazo del ambiente, instituciones de investigación coordinadas a nivel inter e intra gubernamental, serán capaces de proveer información a los tomadores de decisiones, pudiendo así operar con escalas que pueden referirse, desde el surgimiento rápido de conocimiento para afrontar necesidades en situaciones concretas, hasta patrones de las relaciones naturaleza sociedad a nivel regional o incluso global (Kates *et al.*, 2001).

Así las cosas, la consolidación del manejo de ecosistemas requiere de una interacción entre científicos y tomadores de decisiones, y de un replanteamiento de la sociedad en donde la comunicación se vea como un elemento básico de trabajo. La integración de un dialogo entre los grupos que conforman a la colectividad, como los científicos y los tomadores de decisiones, permite que la utilización de los recursos naturales se presente con objetivos más claros, pues su ejecución será respaldada por protocolos más concientes de los niveles de incertidumbre asociados a cada sistema (Kates *et al.*, 2001; King *et al.*, 2003; Maass *et al.*, 2005; Reichman & Pulliman, 1996).

1.4 Estudios a largo plazo

Contingencias actuales como el calentamiento global, la lluvia ácida, la pérdida de especies, la creciente escasez de recursos hidrológicos, etc. han venido promoviendo el interés por desarrollar investigación a largo plazo (Likens, 1989). Sin embargo, es importante reconocer que las contingencias también representan una ventana de reflexión al respecto de una característica del mundo que ha pasado desapercibida, y que se refiere al hecho de que un pensamiento que se remonta a décadas no es tan usual como la percepción a corto plazo del mundo. En general, nos inclinamos a pensar acerca del mundo en forma estática, y típicamente

subestimamos el grado de cambio que hay en él. Nuestra herencia biológica nos dejó habilidades naturales para responder de manera muy eficiente a eventos a escalas espaciales y temporales cortas, pero somos incapaces de medir directamente los cambios lentos (Ornstein & Ehrlich, 1989), y aún menos capaces para interpretar sus relaciones de causa y efecto, lo que ha traído en consecuencia que muchos procesos a nivel de décadas se encuentran ocultos para nosotros y que formen parte de lo que se propone reconocer como el “presente invisible” (Magnuson, 1990). Esta es la escala temporal a la que ocurren fenómenos ligados con la depositación de ácidos, de la colonización de especies invasoras, de la introducción de compuestos sintéticos al ambiente, de la inducción al calentamiento global vía concentraciones de CO₂, y de la deforestación. En ausencia de un contexto de investigación a largo plazo, es muy probable que se hagan juicios desatinados para la comprensión y predicción de cambios en el mundo, así como para el manejo de los recursos en general (Burgos *et al.*, enviado; Likens, 1989; Magnuson, 1990).

Al reconocer el carácter histórico de los sistemas naturales, el alcance de las generalidades en el conocimiento y la importancia del efecto escala, resulta crucial que todo proyecto con miras al largo plazo dimensione en términos espaciales y temporales las problemáticas y los elementos que contempla (Burgos *et al.*, enviado; Callahan, 1984; Magnuson, 1990).

1.5 El agua en México

En varias ocasiones se ha dicho que en el mundo las principales problemáticas en torno al recurso agua son su abasto irregular e insalubre. Un claro ejemplo es el hecho de que la Organización Mundial de la Salud haya estimado que más de 5 millones de personas mueren cada año por enfermedades causadas por la ingesta de agua contaminada, así como por falta de sanidad o de higiene con la misma (Postel *et al.*, 1996; Sartori & Mazzoleni, 2003). Desgraciadamente México no es la excepción en la problemática. De hecho, el tema se acentúa cuando, además de ser considerado como una región semiárida, se reconoce como el onceavo país con más población en el mundo; 101. 7 millones de habitantes (INEGI, 2000).

Del promedio de lluvia anual en México, que se estima en unos 711 mm (1511 km³), alrededor del 72% regresa a la atmósfera vía evapotranspiración (Tortajada, 2005). Una parte de esa agua evapotranspirada es utilizada en la agricultura de temporal; sin embargo el monto de agua directamente accesible para aprovechamiento en México proviene, en primera instancia, de

cuerpos de agua superficiales como los lagos y, en segunda instancia, de los sistemas de agua subterráneos (Conagua, 2004). Para ambas fuentes, las tasas de recarga generalmente no son tomadas en cuenta al respecto de las tasas de extracción.

Siguiendo las tendencias globales, la extracción y uso del agua en México se lleva a cabo principalmente con fines agropecuarios (75%). Es un sector que emplea aproximadamente al 21% de la población económicamente activa y genera tan sólo el 4% del Producto Interno Bruto (PIB) (Conagua, 2001-2006). El abastecimiento público, es decir la industria conectada a la red de distribución (se refiere a los usos público urbano y doméstico) utiliza el 14%, y la industria autoabastecida (se refiere a la agroindustria, servicios, comercio y termoeléctricas) utiliza el 10% (Tortajada, 2005).

Reconociendo la heterogeneidad que hay en el territorio nacional, es de suponer la existencia de grandes contrastes en términos de disponibilidad del recurso hídrico tanto en tiempo como en espacio. Se sabe que en la región norte del país, que abarca el 50% de su superficie total, llueve sólo el 25%; siendo el sur-sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco) la región que recibe el 49.6% del total de la lluvia del país (Conagua, 2004; Tortajada, 2005). Por otro lado, cerca del 70% de las lluvias caen entre junio y septiembre, lo cual sugiere que el país tiene un comportamiento hidrológico marcadamente estacional, con una época lluviosa de apenas cuatro meses.

Con semejante panorama, resulta interesante reconocer que ha venido perneando en el gobierno la importancia de la gestión del recurso hídrico a través del manejo integrado de cuencas. Dicha gestión debe de representar el conjunto de actividades, funciones, organización, recursos, instrumentos de política, y todo aquello relacionado con el estudio, uso, mantenimiento y regulación del agua (Tabla 3).

Tabla 3. Resumen del trabajo de (Bennett, 1998) sobre el papel del manejo integrado de cuencas en México en relación al estudio, uso, mantenimiento y regulación del recurso hídrico.

Estudio	Uso	Mantenimiento	Regulación
Medición de variables del ciclo hidrológico y el conocimiento de sus características determinantes y consecuencias	Explotación, uso, aprovechamiento, manejo y control del agua	Construcción, mantenimiento y operación de las obras hidráulicas, y la administración de distritos y unidades de riego	Prevención y mitigación de desastres naturales asociados a fenómenos hidrometeorológicos
Actividades del proceso de planeación hidráulica y su seguimiento a lo largo del tiempo (corto, mediano y largo plazo) y en diferentes espacios geográficos (nacional, regional, estatal y de cuenca hidrológica)	Determinación y la satisfacción de las necesidades de agua de la población, en cantidad y calidad apropiadas, así como de las demandas derivadas de los procesos productivos y de servicios de la economía	Control de la calidad del agua y su saneamiento	Legislación y la regulación de los usos y aprovechamientos del agua
		Conservación del agua y del medio acuático	Administración de las aguas superficiales y subterráneas y sus bienes

Ninguno de los apartados en relación al estudio, uso, mantenimiento o regulación mencionados en la Tabla 3 puede funcionar de manera independiente. Por el contrario, ambos implican un manejo coordinado entre las instituciones que forman parte del proceso de uso y aprovechamiento del agua, que subsecuentemente implica un uso y aprovechamiento integral de los ecosistemas. Las reformas del sector hídrico en México han incluido la creación y desarrollo de los Consejos de Cuenca, cuya misión ha sido el promover la gestión del agua bajo una regionalización a nivel cuenca. La Ley de Aguas Nacionales (capítulo IV, artículo 13), concibe al Consejo de Cuenca como una instancia para la coordinación y concentración entre las dependencias y entidades federales, estatales o municipales, y los representantes de los usuarios de la respectiva cuenca hidrológica, con el objeto de formular y ejecutar programas y acciones para la mejor administración de las aguas, el desarrollo de la infraestructura hidráulica y de los

servicios respectivos y la preservación de los recursos naturales (CEUM, 1992). Sus funciones, con base en (Tortajada, 2005) son:

- Lograr el equilibrio entre la oferta y la demanda de agua en la cuenca para sus diversos usos.
- El saneamiento de las cuencas para prevenir o corregir su contaminación.
- La conservación, preservación y mejoramiento de los ecosistemas en las cuencas.
- El uso eficiente y sustentable del agua.
- Impulsar una cultura del agua que considere a este elemento como un recurso vital y escaso.

Los planteamientos en torno a los Consejos de Cuenca, permiten la incorporación de metodologías para el manejo de los recursos tan integrales, como lo es el manejo de ecosistemas. En este sentido, se hace explícita la necesidad de incorporar investigación que disponga de bases de datos en diferentes escalas, tanto espaciales como temporales, para la comprensión de los patrones y procesos dados en los sistemas sujetos a manejo, relacionados con la naturaleza hídrica y el aprovechamiento de los recursos naturales. A pesar de que los Consejos de Cuenca aún no se conformen como instancias de gestión, parten de una base que hace expresa una solicitud del gobierno para fomentar la convocatoria entre diferentes instituciones que forman parte del proceso de manejo del recurso hídrico en cuencas.

De la información disponible de corte hidrológico, no se tiene una relación proporcional entre la cantidad de datos de precipitación y de escorrentía. Los datos de precipitación son más abundantes y hay que tomar en cuenta que estos no necesariamente cambian como consecuencia de cambios en la cuenca, como en el caso de la escorrentía a través de la alteración de la cobertura vegetal, construcciones de obras de almacenamiento y derivación, o urbanización. Asimismo, en México no hay un seguimiento periódico ni directo de la cantidad y calidad del agua a través de estaciones hidrométricas o de monitoreo que informen esta relación lluvia-escorrentía bajo el concepto de cuenca como una unidad espacial, por lo que una alternativa para evaluar la cantidad y calidad del agua en cuencas ha venido siendo a través del uso de modelos hidrológicos de simulación (Torres-Benites *et al.*, 2004). Aparicio (2005) señala que hay una serie de atributos básicos o que son empleados de forma más recurrente en el establecimiento de esta relación hidrológica en las cuencas:

- Área de la cuenca
- Precipitación total
- Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.)
- Distribución de la lluvia en el tiempo
- Distribución en el espacio de la lluvia y características de la cuenca

Dada la situación actual en términos de distribución tanto en tiempo como en espacio y calidad del agua en México, resulta indispensable generar estudios dirigidos al aprendizaje básico de las dinámicas fluviales presentes en los sistemas, de tal modo que éstos sirvan como punto de partida para el desarrollo de conceptos e ideas en relación al objeto de estudio y la teoría misma. Un ejemplo pueden ser los estudios basados en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ayudan al desarrollo de índices multifactoriales en lo que se incluye información, tanto hidrológica como ecológica, la cual es indispensable para generar propuestas integrales que trasciendan hacia el campo de la toma de decisiones (Janauer, 2000).

1.6 Regionalización

El procedimiento para la identificación y agrupación de regiones homogéneas y contrastantes en el espacio tradicionalmente se conoce como regionalización (Ramanathan, 1988). Los criterios de agrupamiento para la regionalización pueden estar asociados a características tanto estructurales como funcionales del paisaje, por ejemplo, un grupo de cuencas con respuestas similares ante una inundación pueden constituir una región homogénea.

El comportamiento hidrológico de las cuencas juega un rol importante para la planeación y manejo de los recursos hídricos (Chiang *et al.*, 2002b). Si el esquema de regionalización es adecuado, entonces es posible establecer fuertes relaciones entre las propiedades de los flujos con los atributos estructurales de la cuenca (ver marco conceptual "evento-estructura-evento" Figura 4). Estas relaciones pueden ser útiles para desarrollar información aplicable a cuencas carentes de información integrada, y que presentan características semejantes a cuencas o regiones analizadas bajo una perspectiva funcional (Chiang *et al.*, 2002a). Sin embargo, el proceso de integración y asociación de la información del paisaje (generación de relaciones numéricas de causa y efecto entre estructura y función, en este caso de cuencas) implica la selección de una gran cantidad de atributos y escalas que potencialmente pueden explicar al

sistema, en donde no hay una solución con rigor matemático posible (Ramanathan & Srinivas, 2005). Debido a lo anterior, a pesar de que tradicionalmente se tratan de buscar métodos sofisticados que clasifiquen a las cuencas por disimilitud o similitud de atributos multidimensionales, las características de la mayoría de las cuencas regionalizadas son sólo parcialmente similares, y no se puede justificar del todo la asignación de la cuenca a un grupo o a otro (Ramanathan & Srinivas, 2005).

Como es de esperar, para el caso de la regionalización se propone continuar con el desarrollo de enfoques que sirvan para la identificación e interpretación de patrones en los datos que explican la dinámica y estructura de los sistemas (Ramanathan & Srinivas, 2005). Sin embargo, dada la naturaleza de este tipo de estudios, es igualmente importante reconocer que los trabajos de regionalización implican un contexto asociado a la fuente, resolución y tipo de datos seleccionados o disponibles para el estudio, así como un tipo de análisis y síntesis derivado de las capacidades del sujeto o sujetos a cargo de este tipo de proyectos.

2 Antecedentes

Desde 1981, investigadores de varios institutos y centros de la UNAM realizan un proyecto de investigación a largo plazo sobre la estructura y el funcionamiento de los bosques tropicales secos caducifolios y subcaducifolios en los terrenos de la Reserva de la Biósfera de Chamela-Cuixmala, en la costa de Jalisco (Maass *et al.*, 2002). Dado el carácter experimental del proyecto inicial, las cuencas seleccionadas para su estudio tienen un área entre 15 y 35 ha cada una (Sarukhán & Maass, 1988, 1990), y hasta el momento se han realizado diversos estudios relacionados con la hidrología del bosque tropical seco, los cuales han incluido mediciones de: precipitación, principal entrada de agua al ecosistema (García-Oliva *et al.*, 1991); intercepción de agua por el dosel vegetal (Burgos, 1999; Maass, 1995); infiltración (Cervantes *et al.*, 1988); evapotranspiración (Burgos, 1999); y escorrentía (Cervantes *et al.*, 1988), por citar algunos.

Sin embargo, ante el interés de desarrollar estudios relacionados con el manejo integrado de cuencas, surge un nuevo proyecto titulado "Manejo del agua en la Cuenca del Río Cuitzmala". El nuevo proyecto plantea ampliar la escala por encima de los 1,000 km² (nueva unidad de estudio), para que de esta manera se incluyan tanto áreas forestales, como pecuarias, urbanas y turísticas; dimensiones de los sistemas ecológicos que se necesitan tomar en consideración para poder cumplir con el objetivo central de la investigación: elaborar una propuesta de manejo de ecosistemas orientada a propiciar un manejo sustentable de los recursos y servicios hidrológicos que presta la cuenca del Río Cuitzmala. En otras palabras, mediante la identificación de las escalas espaciales y temporales adecuadas para abordar los problemas planteados y entender los procesos (de estructura – función y mantenimiento) que operan sobre el sistema, se obtienen referencias concretas de manejo y criterios para su evaluación (Stanford & Poole, 1996).

3 Justificación

En proyectos de manejo integrado de cuencas, el seguimiento a largo plazo de parámetros hidrológicos claves es de suma importancia en un esquema de manejo integrado de ecosistemas, pues ello permite verificar, de manera integral, el desempeño de las prácticas de manejo implementadas y, en caso de desviaciones, adecuar o sintonizar el esquema de manejo propuesto siguiendo un modelo de manejo adaptativo (Holling, 1978; Walters, 1986). Más aún, tratándose de ambientes en los que existe una gran variación interanual de parámetros clave como la precipitación, conocer su funcionamiento implica el reconocer la necesidad del monitoreo a largo plazo.

4 Objetivos

Meta: Aportar las bases para el seguimiento a largo plazo de parámetros ecohidrológicos en la cuenca del río Cuitzmala.

Particulares:

- Regionalizar la cuenca del río Cuitzmala con base en la información histórica registrada por agencias gubernamentales como la Comisión Nacional del Agua (CNA), y en aquella concerniente a características estructurales tales como las curvas de nivel, geología, o uso de suelo provenientes del INEGI.
- Plantear sitios de monitoreo permanente de parámetros ecohidrológicos para la cuenca del río Cuitzmala, con base en la integración de la información por medio de la modelación y ubicando los alcances de ésta herramienta de proyección.

5 Método

5.1 Unidad de estudio

Delimitar una unidad de estudio en la realidad no suele ser algo trivial, ya que se parte de la base de que en la naturaleza los sistemas no se encuentran aislados (desde una perspectiva termodinámica), ni delimitados de tal manera que puedan ser definidos espacialmente con claridad. La unidad de estudio necesariamente es un sistema abierto y seleccionado a partir de un criterio arbitrario; partiendo de esta base, en el manejo de ecosistemas las cuencas hidrográficas resultan una unidad fundamental (Gregory & Walling, 1973). En ellas es posible reconocer dos componentes esenciales de flujo, que son las principales entradas (a partir del clima → sol y lluvia) y salidas (evapotranspiración y escorrentía) de materia y energía en el sistema (Ward, 1975). Esto da la posibilidad de estudiar el carácter multifactorial de la interrelación entre los flujos de materia y energía desde una perspectiva de forma y proceso en el sistema (estructura-función → eg. relieve-infiltración) (Harrold *et al.*, 1982; Ward, 1975), permitiéndonos comprender aspectos de productividad, hidrología y ciclaje de nutrientes y carbono, y aportando información para el reconocimiento de errores en la utilización y manejo de los recursos y de las necesidades de planificación integral (Burgos, 1999).

En el presente proyecto, el sistema cuenca se analizó con base en un criterio de subsistemas o subcuencas denominadas Unidades de Respuesta Ecohidrológica (UREh). Al igual que las cuencas, las UREh son unidades delimitadas con base en un criterio de orden de corrientes y relieve. Desde una perspectiva funcional, sin embargo, es decir tomando en cuenta la dinámica de ciertas interacciones a nivel intra e inter sistémico, representan las respuestas de las estructuras antecedentes que mejor explican la relación cobertura vegetal-ciclo hidrológico, a través de eventos disparadores en el sistema (Figura 4). La caracterización de las subcuencas bajo la perspectiva de UREh pretende reconocer flujos de retroalimentación, junto con sus escalas, entre el componente cobertura vegetal y el componente hidrológico.

5.2 La cuenca del río Cuitzmala

La cuenca del río Cuitzmala (Figura 1) se localiza en el estado de Jalisco, el cual forma parte del Pacífico Central Mexicano, entre las latitudes $19^{\circ} 21''$ y $19^{\circ} 51''$, con una superficie de aproximadamente 1089 km^2 . Fisiográficamente se localiza al noreste de la Sierra Madre del sur y las subprovincias de las sierras de la costa de Jalisco y Colima. La cuenca es de tipo exorréica, desembocando en dirección suroeste a 3 km de la localidad de Cuitzmala.

Se consideran tres desembocaduras hacia el Pacífico: estero El Rodeo que se encuentra próximo al litoral, ensenada Teopa frente a Punta Farallón, y ambos ramales funcionando como desembocadura como se muestra en la Figura 2, Meléndez (1999).

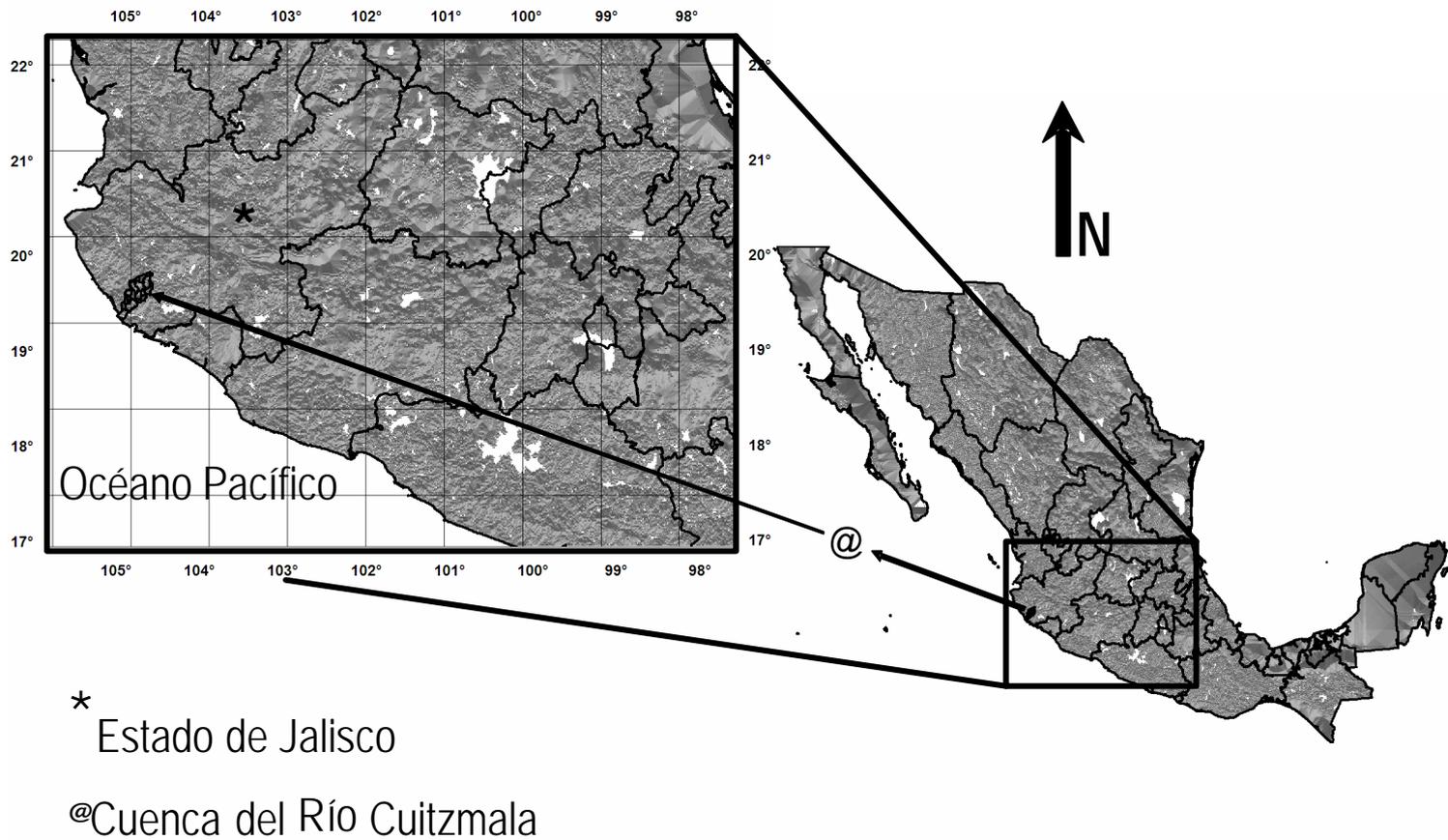


Figura 1. Localización de la cuenca del río Cuitzmala.

La demarcación de la cuenca se realizó con base en el criterio de cuenca hidrográfica, lo cual significa que se encuentra definida por divisorias de aguas (parte aguas). Los puntos notables de la divisoria de la cuenca son los siguientes:

- La cabecera de la cuenca se localiza en el cerro Bramón (1770 msnm), el cual está considerado como un extremo del contrafuerte denominado Bufas Favelo y pertenece a la sierra Cacoma.
- El cerro Guagantón (1025 msnm) representa el límite de las cuencas de los ríos Cuitzmala, Chamela y San Nicolás, lo que lo hace ser un punto trifinio. En dicho cerro se

forman las nacientes del arroyo Las Truchas, resultando tributario del río Cuitzmala por la margen derecha del mismo.

-El cerro el Pantano (1385 msnm) es el parte aguas más alto en la margen derecha del río Cuitzmala, siendo también el punto de origen de las nacientes de los arroyos Las Truchas y El Tene.

-El cerro Cacoma (1690 msnm) forma parte de las estribaciones de la sierra Cacoma. Es el parte aguas de los ríos Jirosto y San Miguel, principales tributarios del río Cuitzmala (Figura 3).

El río Cuitzmala es el caudal principal de la cuenca, el cual nace en las estribaciones del cerro Bramón, localizado a unos 15 km al noroeste del poblado de Purificación, Jalisco. Con dirección hacia el sur-suroeste, desciende desde una altitud de 1 500 m s.n.m. con el nombre de río Jirosto, encontrándose en esta parte de la cuenca una serie de rancherías y congregaciones pertenecientes al municipio de Purificación. Aguas abajo recibe las aguas del río San Miguel por la margen izquierda, y a partir de ahí describe una curva que remata, al confluir con el arroyo Tene. Desde esta última aportación se le conoce como río Higuierillas, y escurre con dirección sur, describiendo una serie de inflexiones debido a lo accidentado de la topografía. Cruza la Carretera Federal No. 200 antes de descargar sus aguas al Océano Pacífico, en un punto situado 5 km al Sureste de Punta Farallón. Se estima que la longitud total de la corriente es de 85 km.

La mayoría de las localidades en la cuenca son pequeñas, siendo una región eminentemente rural abocada a las actividades agropecuarias. No obstante, hay una influencia económica cada vez más marcada por el subsistema urbano Guadalajara-Ciudad Guzmán-Manzanillo, específicamente a través de las ciudades intermedias de Autlán de Navarro, Manzanillo y Puerto Vallarta (Meléndez, 1999). Para la zona costera se ha notado un importante movimiento migratorio en las localidades costeras, derivado del auge de las actividades turísticas; se piensa que la tendencia a mediano y largo plazo será el doblamiento en mayor grado de la región costera de la cuenca, lo cual necesariamente implica un mayor equipamiento urbano a través de la inversión pública y privada.



Figura 2. Desembocaduras del río Cuitzmalá.

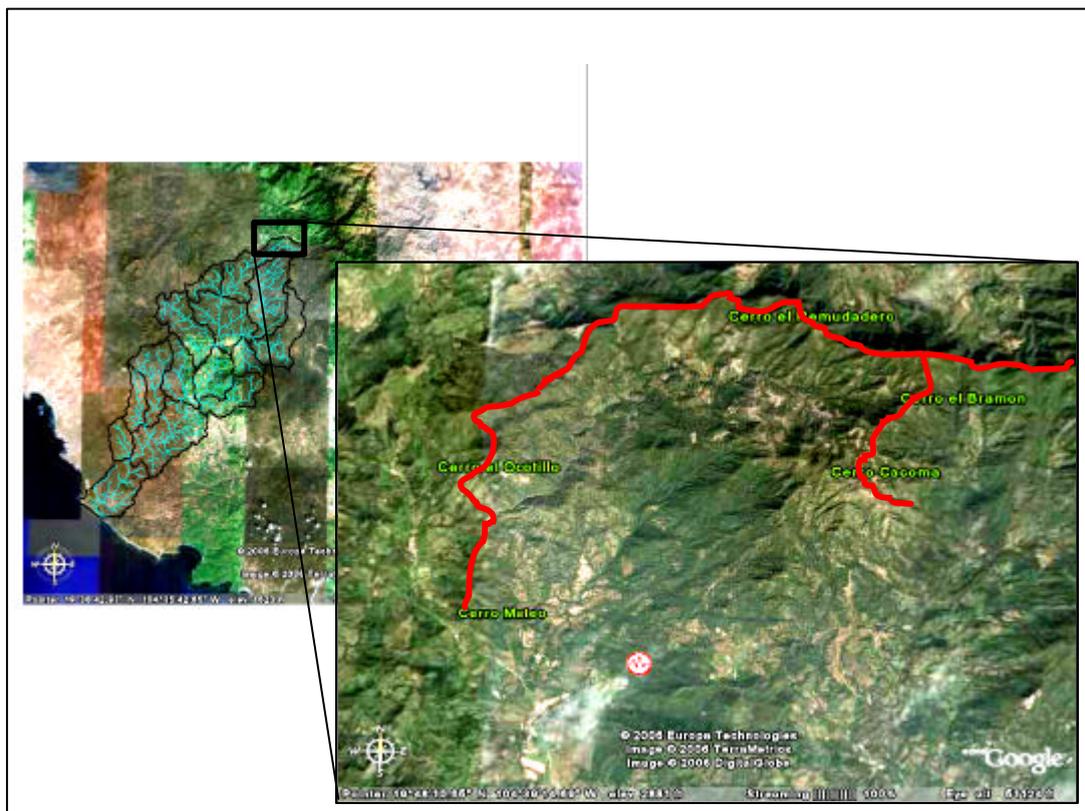


Figura 3. Localización de los parteaguas de los ríos Jirotó y San Miguel.

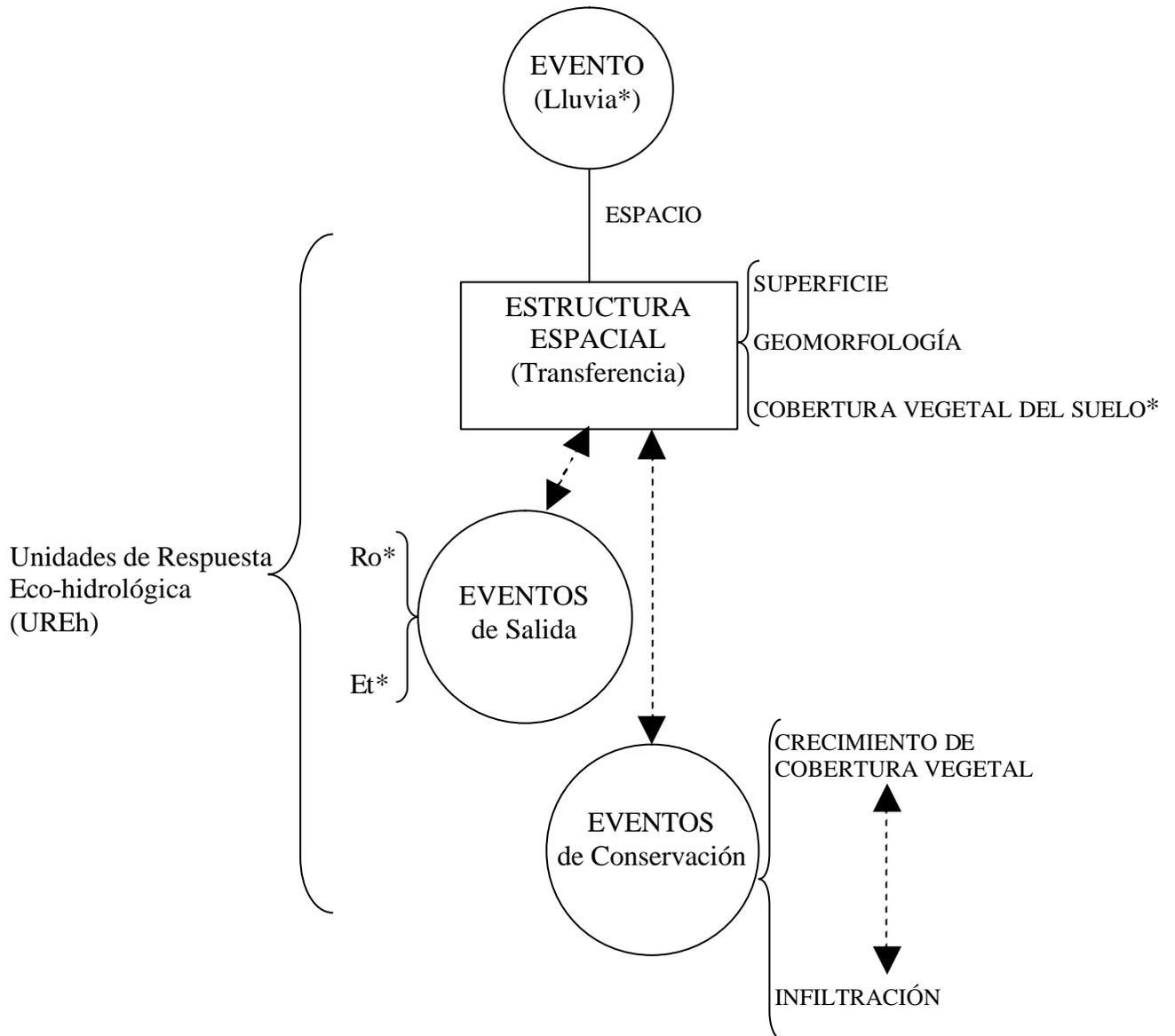
5.3 Marco Conceptual

Para la caracterización ecológica de la cuenca del río Cuitzmalá, la metodología del presente proyecto de investigación estuvo estructurada con base en el marco conceptual evento-

estructura-evento de la Figura 4 (Basado en el marco conceptual de Ludwig *et al.*, 1997; y Morales, conversación personal). Básicamente a partir de un evento disparador que incide sobre un espacio, se genera una respuesta condicionada por dos vertientes centrales: las características de los componentes del espacio junto con la dinámica de sus relaciones, y la naturaleza del evento disparador. En este estudio, el evento disparador analizado fue la precipitación. Para su análisis se utilizaron seis estaciones meteorológicas con una resolución temporal a nivel de promedios mensuales que abarcaron períodos de más de 30 años, dependiendo de cada estación.

La estructura del espacio fue la cuenca del río Cuitzmala, descrita por cinco componentes ambientales y uno social. Los componentes ambientales contemplados fueron el área de la superficie, la litología, la red hidrológica, la pendiente y la cobertura vegetal. El componente social no se integró en el marco evento-estructura-evento, no obstante es un aspecto central en la dinámica de los procesos ecológicos e hidrológicos de sistemas como lo es la cuenca del río Cuitzmala, por lo que los poblados distribuidos en el sistema fueron incorporados como parte de la estructura del espacio. Con el objetivo de implementar una serie de análisis de las relaciones entre los componentes del sistema, se utilizó un enfoque funcional representando un carácter dinámico del espacio, por medio de su respuesta ante un evento de entrada. Para dicho efecto el sistema se dividió en subsistemas UREh. Desde una perspectiva estructural, los subsistemas son subcuencas definidas por el relieve del espacio; desde una perspectiva funcional los subsistemas son UREh, las cuales presentan dos tipos de respuestas generales: aquellas que se quedan en el sistema y caracterizan de nuevo al espacio como el crecimiento de la cobertura vegetal, y aquellas que salen de éste como la evapotranspiración o la escorrentía. En principio se contemplaron diferentes ventanas de tiempo sobre características en la cobertura vegetal e hidrología; en términos espaciales se hizo un análisis a nivel de toda la cuenca y a nivel de UREh. Para el caso de la hidrología se hicieron balances hídricos con el método de Thornthwaite a través del promedio (normales climatológicas) que comprendió cada una de las seis estaciones meteorológicas que se señalaron anteriormente.

Marco Conceptual para la regionalización Eco-Hidrológica de una cuenca



*Variables sujetas a
monitoreo permanente

Fig. 4. Evento-Estructura-Evento. El espacio es caracterizado por su estructura (organización espacial) y los eventos o procesos que ocurren en él, lo cual en su conjunto forma la dinámica del sistema. De la estructura del espacio y la interacción con un tipo de evento (como la lluvia), se expresan los eventos de respuesta de conservación y salida; relación que se va a retroalimentar (líneas punteadas) positiva o negativamente dependiendo de la estructura del espacio, así como de la naturaleza del evento. Las siglas Ro se refieren a escorrentía, mientras que Et a evapotranspiración actual.

Una vez integrada la información con base en la relación evento-estructura-evento para cada UREh y para toda la cuenca, se obtuvo la visión sistema-subsistemas que caracteriza a la cuenca del río Cuitzmala en términos hidrológicos.

Método en Gráfico

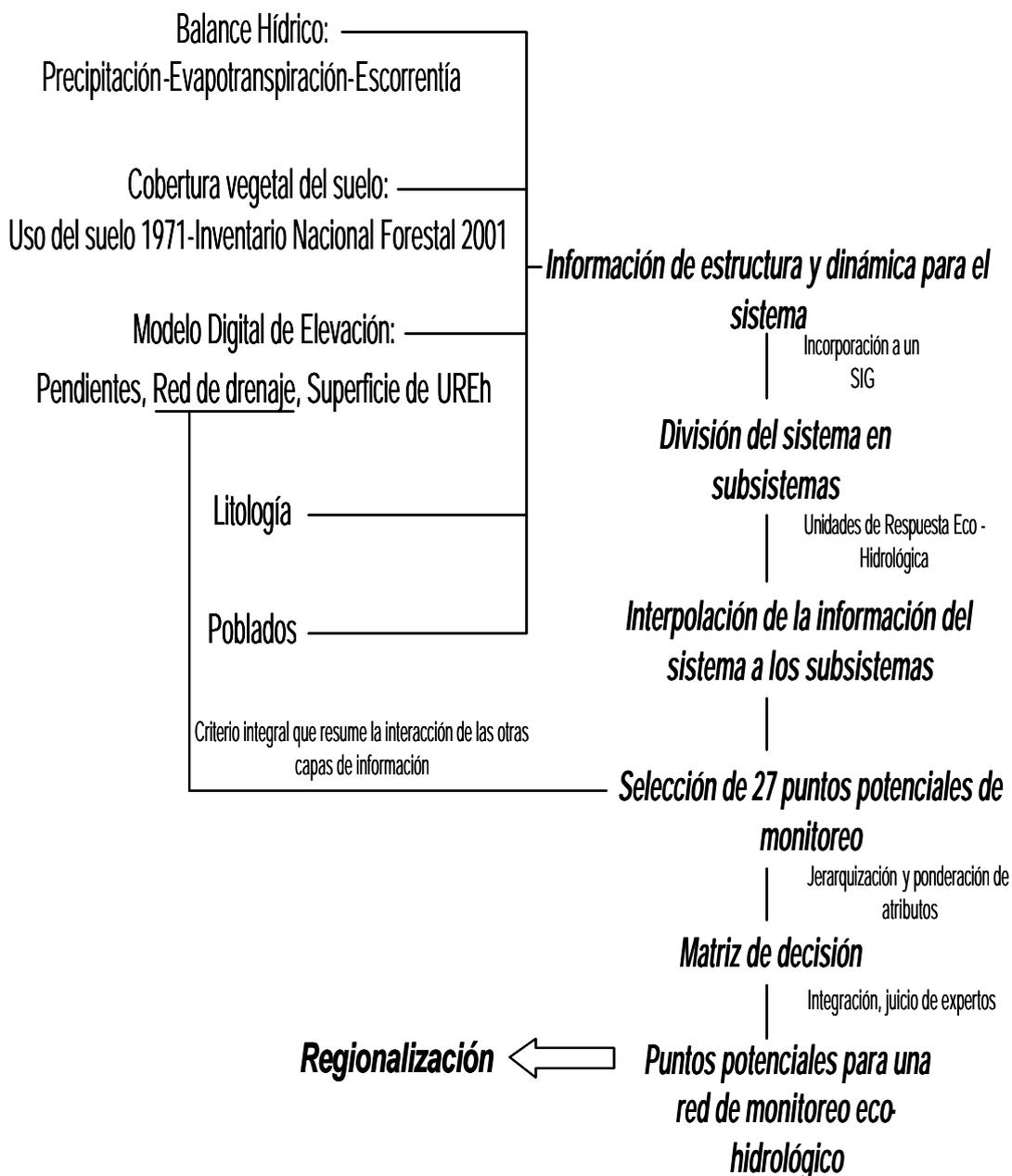


Figura 5. Estructura del procesamiento de la información para la regionalización eco-hidrológica de la cuenca del río Cuitzmalá

5.4 Estructura

5.4.1 Cartografía base

El trabajo de Sistema de Información Geográfica comprendió la escala 1:50 000 y 1:250 000, y fuentes diversas como el Instituto Nacional de Ecología (INE), el Inventario Nacional Forestal (INF) y el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). Toda la información se encontró disponible para procesamiento en el software de SIG ILWIS (<http://www.itc.nl/ilwis/>),

con excepción de la proveniente del INEGI que fue digitalizada desde su escaneo a partir de las cartas en papel. A continuación se enlista la temática de los mapas utilizados, la escala y la fuente:

- Mapa de poblados escala 1:50 000 (Saldaña, 2005)
- Carta geológica 1:250 000 (INEGI, 1971)
- Carta de uso del suelo 1:250 000 (INEGI, 1971)
- Mapa del Inventario Nacional Forestal 1:250 000 (INE *et al.*, 2000)

5.4.2 Procesamiento de las curvas de nivel

Todo procesamiento de las curvas de nivel fue con base en los métodos y algoritmos programados en el ILWIS. A partir de los conjuntos vectoriales de las curvas de nivel se empleó la función de interpolación de curvas de nivel en ILWIS para obtener el modelo digital de elevación (DEM en inglés) con una resolución espacial de 25 m. Con base en el DEM se obtuvo la red hidrológica y se clasificaron los cauces con el método de Strahler (Strahler, 1952). A partir del mapa de orden de cauces se agruparon las redes de corrientes que compusieran a los de orden tres, así como aquellas cuya densidad de corrientes fuera similar, aunque con un orden menor. Con base en lo anterior y las curvas de nivel, se delimitaron 15 subcuencas por interpretación visual que representarían las UREh del sistema de la cuenca del río Cuitzmala (Figura 6). Once de las UREh son subcuencas en un sentido estricto, cuatro de ellas (las UREh 12, 10, 8 y 5) en realidad son cuencas que tienen una entrada de agua de cuencas localizadas en la parte más elevada del terreno.

Orden de Cauces y Subcuencas del río Cuitzmala

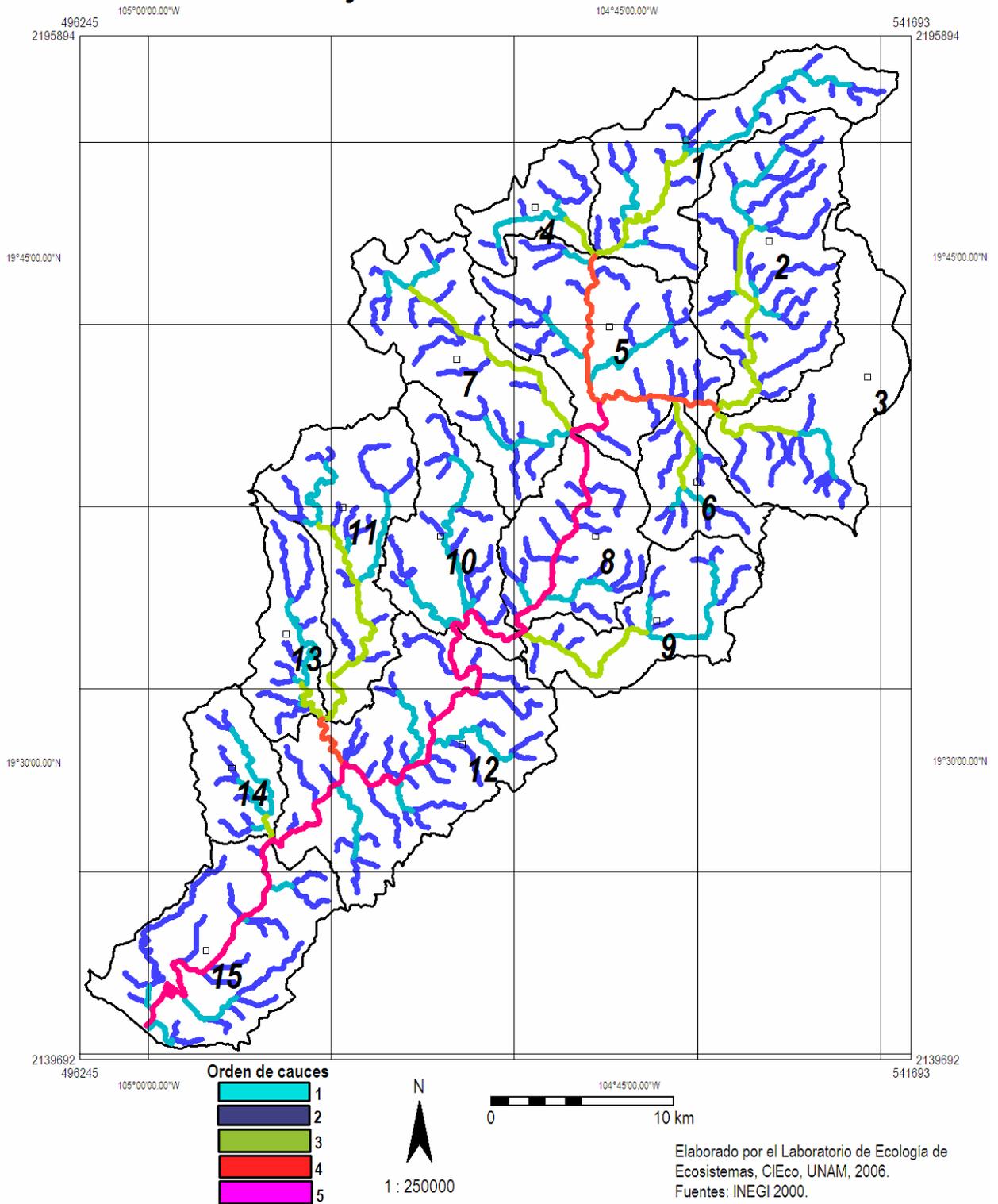


Figura 6. Cauces con su orden y las 15 subcuencas (UREh) de la cuenca del río Cuitzmala.

Siguiendo los pasos para el procesamiento de los modelos digitales de elevación propuestos en el software ILWIS, se utilizó una serie de filtros para generar un mapa de pendientes. Para el mapa de pendientes, se aplicó sobre el DEM el filtro DFDX que calcula la

diferencia en altitudes entre un píxel y otro en dirección horizontal, es decir X. Matemáticamente representa la primera derivada de cada píxel en dirección X a partir de una matriz de 1X5, generando un mapa DX. Posteriormente, al mismo DEM se le aplicó el filtro DFDY, el cual realiza la misma operación que el DFDX, sólo que en dirección vertical o Y, y con una matriz de 5X1 que generó un mapa DY. Con base en esos dos mapas, se hizo un cruzamiento de los mismos para obtener un mapa de pendientes en porcentajes con la siguiente fórmula:

$$\text{SLOPEPCT} = 100 * \text{HYP}(\text{DX}, \text{DY}) / \text{PIXSIZE}(\text{DEM})$$

Fórmula 1. Para cada píxel se multiplica por cien el cálculo de la hipotenusa tomando como valores X y Y los derivados de los mapas DX y DY respectivamente; todo ello aplicado al tamaño del píxel proveniente del DEM mediante la función PIXSIZE.

Para convertir los valores de porcentaje a grados se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{SLOPEDEG} = \text{RADDEG}(\text{ATAN}(\text{SLOPEPCT}/100))$$

Fórmula 2. La primera parte de la fórmula transforma los valores de porcentajes a radianes: (ATAN(SLOPEPCT/100)). El valor de cada píxel del mapa de pendientes en porcentaje es dividido entre cien, obteniéndose el arcotangente. La función RADDEG transforma los valores de radianes en grados, basándose en la siguiente fórmula: (valor*360/2p).

5.4.3 Clasificación de la información espacial

Se analizaron en términos relativos el tipo de litología, cobertura vegetal, pendientes y laderas, así como el número de poblados en toda la cuenca y cada UREh.

Para el caso de la cobertura vegetal se homogeneizaron las categorías de vegetación, de tal forma que fuera posible hacer una comparación entre la distribución de la vegetación clasificada por el INEGI (1971) y el Inventario Nacional Forestal (2000). La cobertura vegetal se agrupó en áreas conservadas y áreas transformadas, en donde las primeras representan a los diferentes tipos de vegetación, y las segundas a zonas de actividades productivas como las praderas y la agricultura. Debido a que las dos fuentes de información corresponden a fechas distanciadas por más de 25 años, se hizo una tabla en la que se reflejó en términos relativos la transición en base a la diferencia entre coberturas conservadas y transformadas para cada UREh y toda la cuenca (Tablas 7 y 8).

5.5 Eventos

5.5.1 Eventos de entrada: datos de precipitación

5.5.1.1 ERIC II

El ERIC II es una base de datos de la CNA que cuenta con la información de temperatura, evaporación, precipitación, granizo, hielo y neblina, así como la ubicación geográfica de todas las estaciones comprendidas por el Sistema Meteorológico Nacional. En dicha base se hizo una búsqueda de estaciones meteorológicas que cayeran en un polígono que abarcó a la cuenca del río Cuitzmala y 40 km más fuera de ésta. El área total del polígono obedeció a un criterio arbitrario; la intención fue ver la distribución espacial de las estaciones meteorológicas para así seleccionar el método más viable para la interpolación de la información a la cuenca del río Cuitzmala.

5.5.1.2 Normales climatológicas

Las Normales Climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional están disponibles en el internet en la página: www.cna.gob.mx. En dicho sitio se realizó una búsqueda de los datos de las mismas 20 estaciones meteorológicas encontradas a partir del polígono de la base de datos ERIC II, obteniéndose los valores mensuales de cada estación. Las Normales Climatológicas de las estaciones meteorológicas representan la información condensada de 29 años, un período que va entre 1961 y 1999; en ellas no hay un desglose por año, los datos de temperatura y precipitación son por mes (con excepción de la estación 14007 que no está disponible).

5.5.1.3 Cálculo de la lluvia

Para saber el aporte de cada estación meteorológica en la cuenca se utilizó el método de polígonos de Thiessen, mediante la función de vecino más cercano que presenta el software ILWIS. Se generó un mapa de puntos con las coordenadas de cada estación, a través del cual se obtuvo un mapa producto de polígonos representando el área de influencia de cada estación en una georeferencia que comprende los 40 kilómetros a la redonda de la cuenca (Figura 10). De los 21 polígonos distribuidos en el área, sólo seis se traslaparon con el área que representa la cuenca de Cuitzmala. Uno de ellos correspondió a la estación meteorológica de la estación biológica Chamela, por lo que sus datos provienen del trabajo de García-Oliva et al. (2002). Por otro lado, los datos de la estación 14007 se trabajaron a partir de la información del ERICII, pues no se encontró registro alguno de la misma en las normales climatológicas.

Según criterios de la Organización Meteorológica Mundial, para el estado de Jalisco se estima un área de influencia por cada estación meteorológica de aproximadamente entre unos 100 y 250 km² (Jáuregui, 1973). Por lo anterior y sabiendo que los polígonos de Thiessen es un ejercicio meramente geométrico, se hizo un ajuste del área de influencia de cada estación a

partir de la distribución en el espacio de atributos como la vegetación y cambios altitudinales en la cuenca (Anexo1, 5 y 6).

Con base en la superficie de traslape ajustada de cada polígono sobre la cuenca, se calculo la precipitación en el área comprendida por el sistema, así como el aporte relativo por parte de cada una de las seis estaciones meteorológicas en ella (Figura 11).

Como en el caso del cálculo de la precipitación sobre toda la cuenca, se calculó el aporte relativo de cada polígono en cada una de las UREh.

5.5.2 Eventos de respuesta

5.5.2.1 Escorrentía

Instalada en la desembocadura de la cuenca, en el puente sobre el río Cuitzmala de la Carretera Federal No. 200 se encuentra la estación hidrométrica 15005 Cuixmala. El objetivo de la estación es conocer el régimen hidráulico del río Cuitzmala y aplicar esta información básica en los estudios hidrológicos, para proyectos de aprovechamiento. La información fue obtenida de la base de datos BANDAS del Sistema Meteorológico Nacional, y se refiere al escurrimiento concentrado sinóptico de la cuenca, contando con fechas que van del período de 1971 a 1995.

5.5.2.2 Balance hídrico

Utilizando los polígonos que representaban la influencia de las seis estaciones meteorológicas, se hicieron balances hídricos con base en el método de Thornthwaite (Thornthwaite & Mather, 1957). Los valores base fueron a partir de los datos de temperatura y precipitación de las normales climatológicas, así como del trabajo de García-Oliva et al. (2002). para el caso de la estación meteorológica de Chamela, y de los valores del ERIC II para el caso de la estación 14007. Los balances fueron para toda la cuenca, y para las 15 UREh que comprende el sistema, utilizando la misma lógica que en el caso de la precipitación, los datos para el balance hídrico se estimaron con base en el aporte relativo de cada estación sobre las UREh y la cuenca en su conjunto.

5.6 Síntesis

5.6.1 Puntos potenciales de monitoreo

Con base en la red hidrológica de la cuenca, se seleccionaron 27 puntos potenciales para el monitoreo de características relacionadas con el escurrimiento. Los puntos son el enclave de una corriente de orden 2 o mayor, a otra más grande (Figura 7). Lo anterior es debido a que la escorrentía representa un flujo de salida, producto de la interacción estructural del componente

espacial ante un evento como la precipitación. Para cada punto potencial se estableció una escala arbitraria de jerarquías con valores del 1 al 4, en donde el uno representó el valor de mayor importancia y así sucesivamente hasta llegar al cuatro. Los 27 puntos se sobrepusieron para ser jerarquizados en las capas de red de drenaje, litología, pendiente, poblados, hidrología (que representa el balance hídrico para cada UREh), cobertura del suelo (a de carácter más reciente y combinada con la información de la transición de las áreas conservadas a transformadas) y superficie representada en términos de esorrentía (área en km² delimitada con base en el criterio de cuenca). Cada punto de las siete capas tuvo una jerarquización diferente, basada en las características asociadas a la temática correspondiente (tabla 4). Cabe mencionar que uno de los criterios aplicados en la mayoría de las temáticas fue que el punto comprendiera la desembocadura de una UREh de orden 3, de tal suerte que la información recabada en ese punto represente la interacción estructural de los flujos de ese espacio, y que a la vez pueda resultar un tanto más ilustrativa una comparación entre otras UREh del mismo orden.

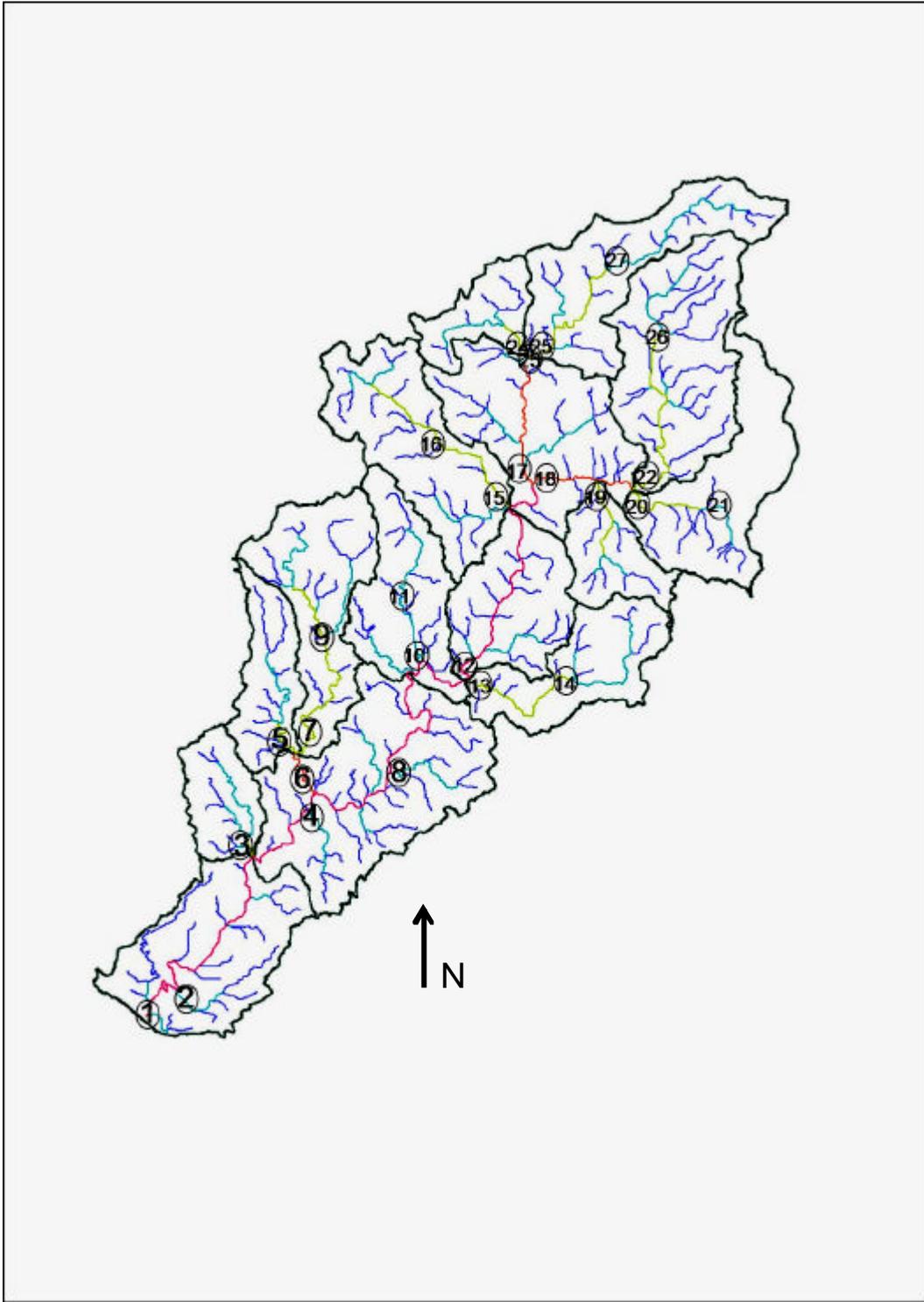


Figura 7. La cuenca del río Cuitzmala con los 27 puntos potenciales de monitoreo, distribuidos sobre la red de drenaje.

Tabla 4. Para las siete temáticas se desarrollaron criterios que definieran su nivel de jerarquía correspondiente a la ubicación de cada punto potencial de monitoreo. Los símbolos ?? indican la

inclusión de los valores mayores y menores de cada temática. En el caso de la litología, debido a lo discreto de la distribución de sus variantes, el criterio fue distinto.

JERARQUÍA	TEMÁTICA						
	<i>Red de drenaje (orden de cauces)</i>	<i>Litología (# de tipos)</i>	<i>Poblados (densidad y ubicación)</i>	<i>Hidrología</i>	<i>Cobertura vegetal</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Superficie en km² dividida en seis grupos</i>
1	5	4	densidad	precipitación	vegetación	?? terreno accidentado	? km²
2	4	3	UREh orden 3	UREh orden 3	UREh orden 3	UREh orden 3	? km²
3	3	2	UREh con orden variable	UREh con orden variable	UREh con orden variable	UREh con orden variable	Grupo con los valores intermedios
4	2	1	ramales	ramales	ramales	ramales	Puntos en ramales sin área definible para la escala de las UREh

5.6.2 Matriz de decisión

Las jerarquías de cada temática se agruparon en una matriz de decisión (Tabla 5), a partir de la cual se desglosó la frecuencia de cada jerarquía (ponderando la hidrología y cobertura del suelo, poniéndolas en una columna por separado). Con este criterio integrativo, se ordenaron los puntos de tal suerte que se obtuvo una escala final que permitió definir en orden de importancia las zonas prioritarias a monitorear.

6 Resultados

6.1 Estructura

En el anexo 1, 2 y 3 se muestran las vistas generadas a partir del procesamiento de las curvas de nivel, como el modelo digital de elevación, la red de drenaje, las 15 UREh y el mapa de pendientes. Igualmente se agregan las vistas digitalizadas de geología (INEGI, 1971), uso del suelo (INEGI, 1971), el mapa del INF (INE *et al.*, 2000) y de poblados (Saldaña, 2005).

6.1.1 Red de drenaje

Según el trabajo de Meléndez (1999), el principal tipo de escurrimiento en la cuenca del río Cuitzmala es de tipo dendrítico. Su desarrollo en la cuenca se presenta sobre material moderadamente fino, permeable y en declives variados, sobre suelos regosoles (con textura de suelo gruesa) y desarrollados sobre granitos. La estimación de la red de drenaje fue a partir del procesamiento hídrico en ILWIS, derivando del mapa de Acumulación de Flujos un valor umbral de pixel de 1000, generando una vista con un orden de corrientes no mayor a 5, con base en la clasificación de Strahler (Strahler, 1990). En total se presentaron 10 corrientes de orden tres, las cuales sirvieron como punto de partida para delimitar a las 15 UREh (Figura 6).

6.1.2 Pendientes

La vista de pendientes de la cuenca muestra una topografía accidentada con laderas no muy pronunciadas, las cuales en raras ocasiones presentan más de los 35° grados de inclinación. La zona más al noroeste, en la desembocadura de la cuenca, y el extremo sureste, resultaron ser las regiones con unidades de relieve planas más ampliamente distribuidas. Según el trabajo de Meléndez (1999), las unidades de declives entre 12° y 24° predominan en la cuenca, abarcando un área de aproximadamente 484 km², lo cual representa el 44.16% de la cuenca.

6.1.3 Litología

Los datos del INEGI a escala 1:250 000 de geología, indican que en la cuenca del río Cuitzmala se encuentran siete diferentes materiales litológicos (Tabla 6), de los cuales el granito es el que cuenta con la distribución más abundante en términos de superficie ocupada.

Tabla 6. Grupo, tipo, superficie en km² y porcentaje de la superficie ocupada de los diferentes materiales litológicos en la cuenca del río Cuitzmala. Cabe resaltar que los datos en decimales representan una escala 1:50 000, proveniente de las curvas de nivel, por lo que cada mm es igual a 50 m.

GRUPO DE ROCA	TIPO DE ROCA	SUPERFICIE EN Km ²	SUPERFICIE EN %
	Granito (cretácico)	882	81.00

Ígnea	Granito (cretácico)	882	81.00
	Riolita (terciario oligoceno mioceno)	3.4	0.31
	Volcanoclástico (cretácico superior)	22.5	2.06
Sedimentarias	Caliza (cretácico inferior)	77.9	7.20
	Arenisca y conglomerado (terciario superior)	27.4	2.50
Depósitos	Aluvial (cuaternario)	75.9	7.00
	Litoral	0.2	0.02

Rocas ígneas (Meléndez, 1999)

Granito. Es una roca extrusiva ácida, mineralógicamente formada por cuarzo, feldespato y plagioclasa en cantidades variables.

Extrusiva ácida. Derivada del material volcanoclástico con un alto contenido de sílice (63% de SiO₂).

Toba. Derivada del material volcanoclástico, roca de origen explosivo formada por material volcánico suelto o consolidado. Comprende fragmentos con diferente composición mineralógica y tamaños menores a 4 mm.

Rocas sedimentarias (Meléndez, 1999)

Caliza. Roca química originada por la precipitación de minerales en cuerpos de agua en ambientes marinos y/o continentales. La roca caliza es la más importante entre las carbonatadas; constituida por carbonato de calcio (>80% CaCO₃), con posibilidades de contener: argonito, sílice, dolomita, siderita y fósiles de manera recurrente.

Conglomerado. Roca originada a partir del intemperismo y erosión a partir de rocas pre-existentes. Es una roca de grano grueso de forma poco esférica.

Depósitos (Gonzalo-Duque, 1998)

Aluvial. Formado por depósitos de materiales sueltos como grava y arenas, provenientes de rocas pre-existentes que han sido transportadas por corrientes superficiales. Este tipo de suelo se localiza mayormente en los lechos de inundación de los ríos Cuitzmala, Jirosto y San Miguel.

Litoral o palustre. Formado por materiales no consolidados, ricos en materia orgánica que se han depositado en zonas pantanosas.

6.1.3 Mapa de poblados

En toda la cuenca hay 71 poblados que varían en aspectos como densidad, servicios y vías de acceso. Los poblados de la cuenca del río Cuitzmala pertenecen a los municipios de la Huerta (municipio costero) y Villa Purificación, sin presentar una delimitación basada en algún límite natural como un río, un tipo de vegetación o unidad de relieve.

Las localidades más accesibles son Emiliano Zapata y Francisco Villa, los cuales se encuentran directamente comunicados por la Carretera Federal número 200. Los poblados están distribuidos por toda la cuenca, con un número variable. Las UREh con mayor número de poblados se encuentran en la zona media alta, siendo la UREh 2 (noreste de la cuenca) la más abundante con 12 poblados, seguida por la UREh 7 (noroeste medio) con 10 (Figura 7). Por otro lado, se encontraron 2 UREh sin ningún poblado y que representan el extremo suroeste (UREh 14) y noroeste (UREh 4) (Anexo 7).

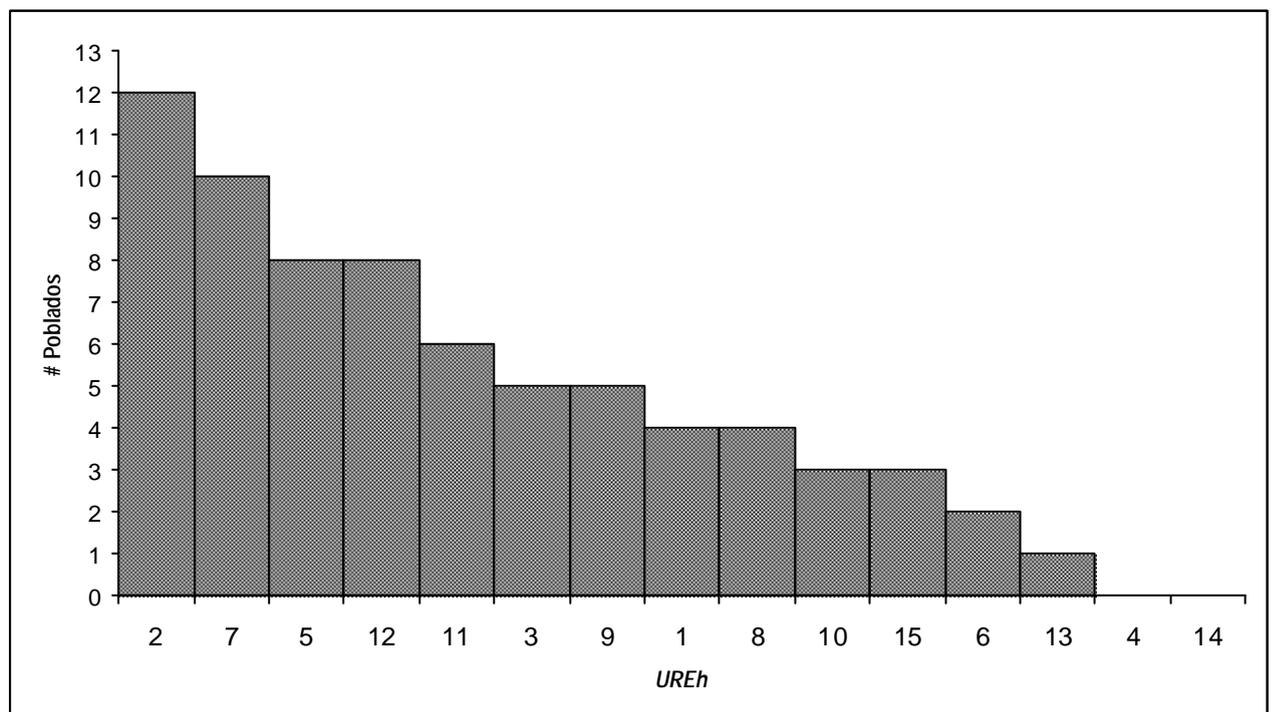


Figura 8. Cantidad de asentamientos humanos registrados por el INEGI (1975) en cada UREh del río Cuitzmala.

6.1.3 Cobertura vegetal

Tanto el mapa del INEGI de Uso del Suelo como el del Inventario Nacional Forestal muestran un claro gradiente de tipos de vegetación que pueden estar asociadas a características como fisionomía y déficit hídrico. Sin embargo, desde el suroeste con selva caducifolia, hasta el noreste con bosque mesófilo de montaña, las actividades agropecuarias se distribuyen de tal manera que terminan ocupando cerca de la cuarta parte de todo el territorio de la cuenca (Tabla 7).

Tabla 7. Superficie de la cobertura vegetal en km² y en porcentaje, de la vegetación conservada y la transformada con fines agropecuarios.

COBERTURA VEGETAL	SUPERFICIE EN km ²	SUPERFICIE EN %
Transformada	405.80	38
Conservada	662.65	62

Con base en la estimación del área en términos relativos de las superficies correspondientes a actividades de manejo de la tierra y de vegetación, para la carta de Uso del Suelo del INEGI (1971) y el mapa del Inventario Nacional Forestal (2000) se hizo una tabla en donde se mostró, en términos porcentuales, el gradiente de transformación y permanencia en toda la cuenca a través de la situación de cada UREh (Tabla 8). Asimismo, la tabla también nos dice cuáles fueron las UREh que presentaron un cambio marcado ya sea positivo o negativo con el paso de la primera a la segunda fecha comparativa del uso del suelo. Los dos cambios positivos más contrastantes fueron el caso de la UREh 13 (con un + 39% de incremento) y la 1 (con un + 18% de incremento) (Figura 8); el cambio negativo, que significa una disminución en la tasa de transformación del uso de suelo para actividades productivas, fue para la UREh 3 (con un - 36%), y la 5 y la 2 (ambas con un -17%).

Tabla 8. Las UREh están ordenadas con base en su grado de transformación, que va de menor a mayor, y para el caso de la conservación al revés (de más a menos). El grado de transformación desglosa el cambio porcentual en el uso del suelo durante esas dos fechas, siendo el total la suma de las dos fechas.

UREh	Transformado (%)			Permanencia (%)
	Antes del 71	1971-2000	Total	
14	0	2	2	98
12	8	8	16	84
8	13	10	23	77
10	12	15	27	73
4	12	18	30	70
11	19	18	37	63
1	13	31	44	56
13	3	42	45	55
15	18	27	46	54

6	27	20	47	53
7	23	26	49	51
5	34	17	52	48
2	35	18	53	47
9	21	39	60	40
3	52	16	68	32

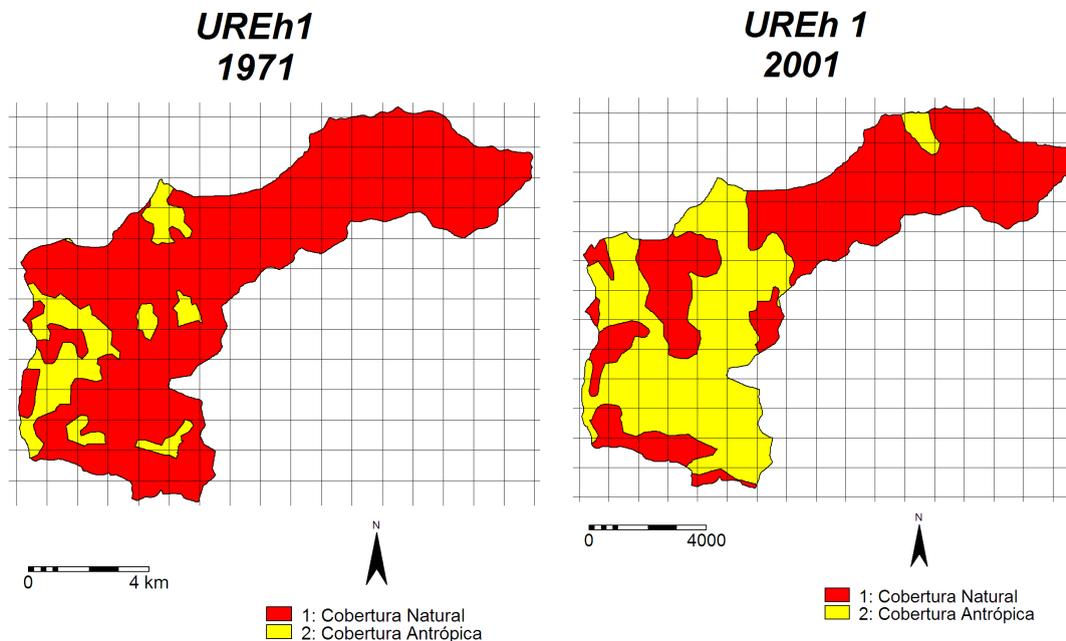


Figura 9. Comparación de la cobertura conservada y transformada entre las dos fechas de uso del suelo para la UREh 1

6.2 Eventos

6.2.1 Precipitación

6.2.1.1 Bases de datos

La resolución de los datos de precipitación con la que se trabajó fue a partir del promedio mensual (Tabla 9). Las seis estaciones mostraron un patrón marcadamente estacional, con un período similar de lluvias y sequía que varía entre sitio más que nada en términos de cantidad (Figura 10).

Tabla 9. Desglose de los datos de precipitación de seis estaciones meteorológicas a nivel mensual, utilizados para el cálculo de la lluvia y balance hídrico en la cuenca del río Cuitzmala y sus respectivas UREh.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
14007	39.1	22.4	0.0	0.3	12.5	268.8	404.7	326.0	381.9	163.0	48.2	11.1	1677.9
14042	20.3	3.4	5.1	0.1	4.8	77.2	136.2	165.1	201.9	75.4	41.7	22.7	753.9
14048	23	7.6	5.5	2.1	11.4	171.5	310.8	286.1	348.3	147	30.8	26	1370.1
14079	25.8	6.3	0.3	4	3.3	128.8	276.2	297.4	262.7	97	42	55.9	1199.7

14085	29.8	4.5	5.9	2	6.5	121.4	204.8	228.9	279.7	97.7	28.6	27.7	1037.5
14117	24.6	6.4	6.8	1.6	11.1	220.1	389.6	377.4	407.4	157.1	36.7	28.4	1667.2
14166	19.7	9.1	0	0	7.2	281.2	391.2	426	379.5	143.2	43.6	16.4	1717.1
Chamela	41.3	2.4	1.0	0.6	10.3	102.2	129.0	145.3	216.8	80.2	19.4	14.2	762.8

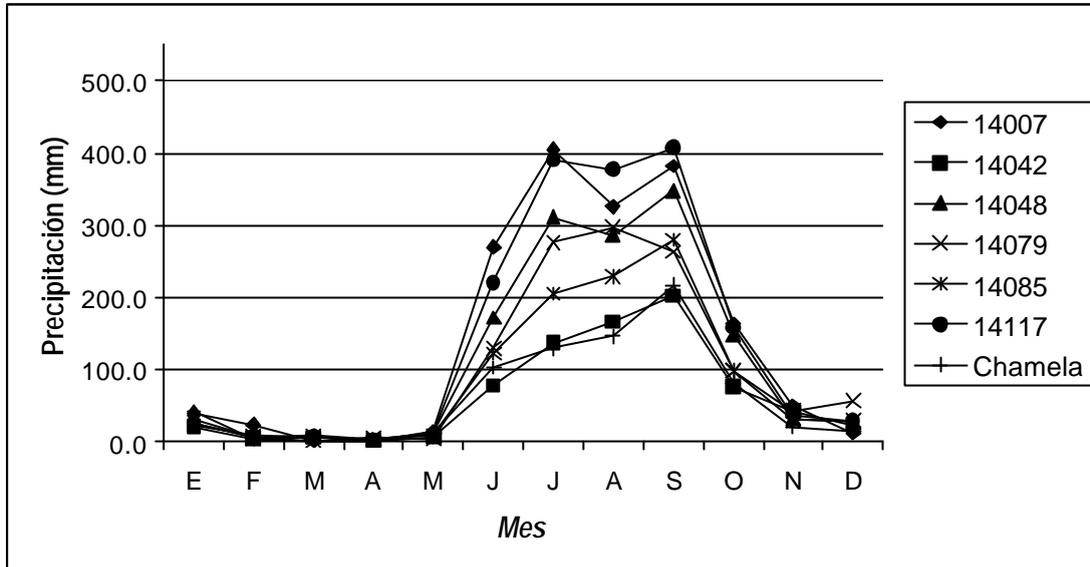


Figura 10. Patrón anual de la precipitación por mes de las Normales Climatológicas de la CNA excepto para el caso de la estación Chamela, cuyos datos provienen de (García-Oliva *et al.*, 2002) y de la estación 14007, cuyos datos provienen de la base ERIC II.

6.2.1.2 Cálculo de la lluvia

Con los polígonos de Thiessen se identificaron las estaciones cuya información puede ser interpolada a la cuenca (Figura 11). Posteriormente, para complementar el método geométrico de polígonos con el contexto espacial de la cuenca, se tomó en cuenta la relación ambiental entre la altitud y vegetación con la precipitación (Caylor *et al.*, 2004; Duckworth *et al.*, 2000; García-Martínó *et al.*, 1996), delimitando la influencia de las estaciones meteorológicas con base en la distribución de la vegetación en el mapa del INF y el Modelo Digital de Elevación. A partir del mapa resultante fue que se cálculo de la lluvia total en la cuenca y por UREh (Figura 12).

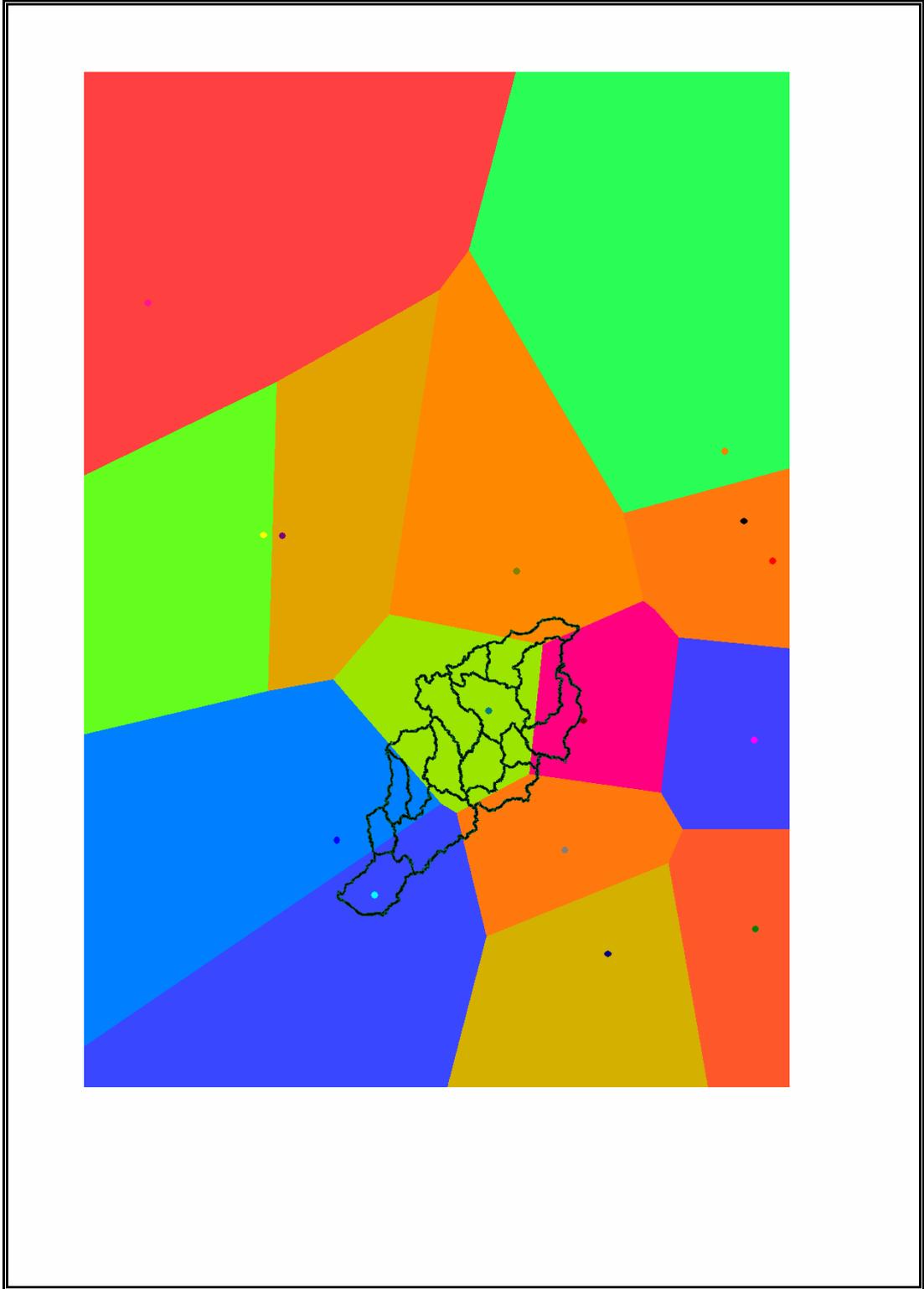


Figura 11. Polígonos de Thiessen tomando como puntos de referencia las diferentes ubicaciones de las estaciones meteorológicas de la CNA.

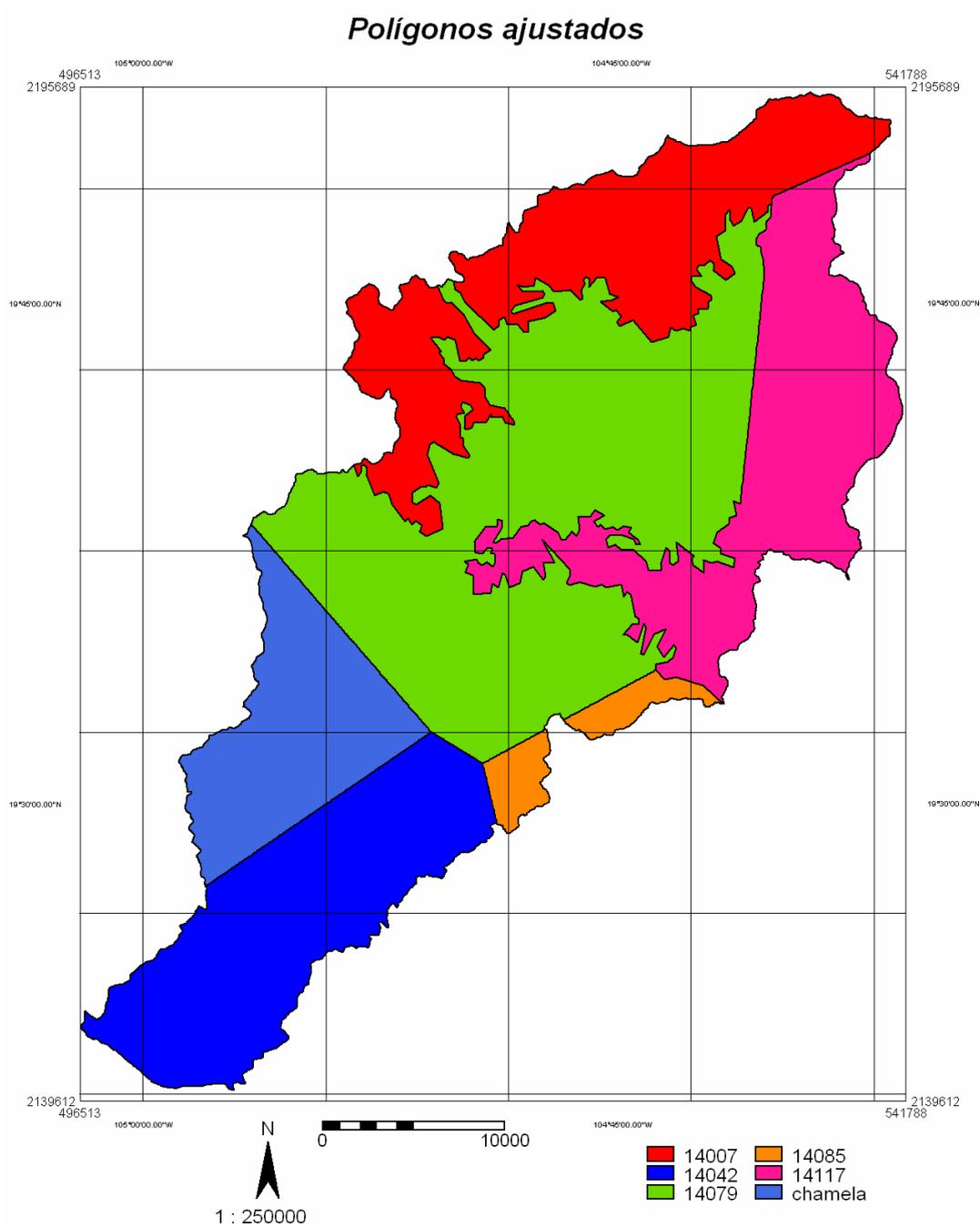


Figura 12. Distribución de la influencia de seis estaciones meteorológicas después de integrar los criterios de polígonos de Thiessen, altitud y vegetación.

Tomando en cuenta el aporte relativo de precipitación de cada estación sobre la superficie de la cuenca, en total se calcularon 1245 mm de precipitación anual para la cuenca. El comportamiento a lo largo del año es marcadamente estacional, con una época de secas entre noviembre y mayo, y lluvias de junio a octubre (Tabla 10).

Tabla 10. Aporte relativo de superficie de influencia de seis estaciones meteorológicas sobre la cuenca del río Cuitzmala. La precipitación de cada estación se multiplicó por el aporte relativo y se obtuvo la contribución proporcional de la lluvia de la estación sobre la cuenca.

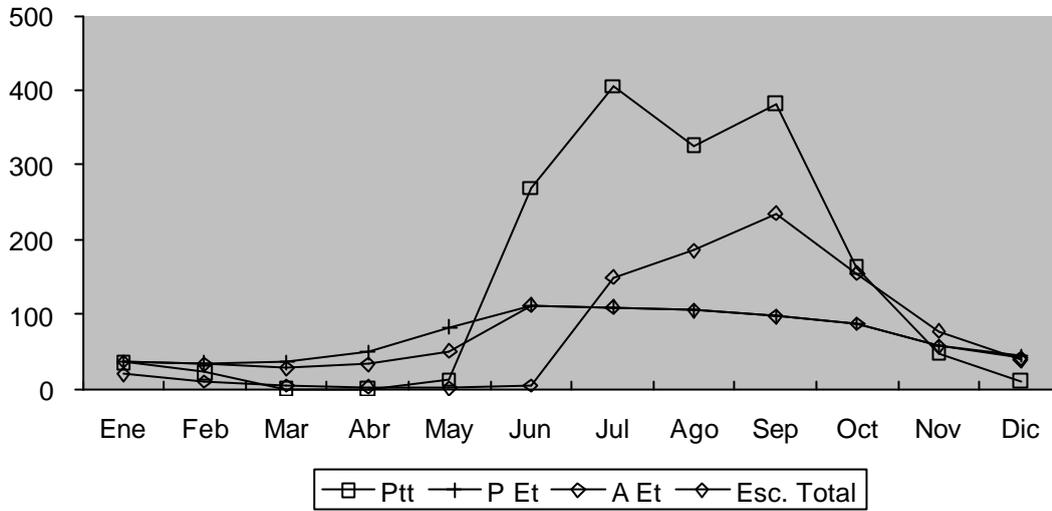
Estaciones		14007	14042	14079	14085	14117	Chamela	Toda la Cuenca
Porcentaje de la Cuenca		0.18	0.16	0.36	0.02	0.18	0.10	1.0
Precipitación (mm)	Enero	36	20	26	30	25	41	28
	Febrero	22	3	6	5	6	2	8
	Marzo	0	5	0	6	7	1	2
	Abril	0	0	4	2	2	1	2
	Mayo	12	5	3	7	11	10	7
	Junio	269	77	129	121	220	102	158
	Julio	405	136	276	205	390	129	279
	Agosto	326	165	297	229	377	145	278
	Septiembre	382	202	263	280	407	217	295
	Octubre	163	75	97	98	157	80	114
	Noviembre	48	42	42	29	37	19	39
	Diciembre	11	23	56	28	28	14	33
Total		1675	754	1200	1038	1667	763	1245

6.2.2 Cálculo del balance hídrico

Se hicieron balances hídricos para cada UREh y toda la cuenca. Para esto, como en el caso del cálculo de la lluvia, a partir de los datos de precipitación y temperatura de las normales climatológicas, se realizaron balances hídricos con base en el método de Thornthwaite (Thornthwaite & Mather, 1957) para las seis estaciones meteorológicas (Ej. Figura 13 a), y uno para toda la cuenca del río Cuitzmala (Figura 13 b). Los resultados del balance en términos de lluvia (Pt), evapotranspiración potencial (PEt) evapotranspiración actual (AEt) y escorrentía total, se multiplicaron por el aporte relativo de superficie de cada estación sobre cada UREh, de tal forma que se obtuvo una regionalización de los parámetros hídricos básicos en la cuenca (Figura 14 y Tabla 12).

El cálculo de capacidad de retención de humedad del suelo en el balance hídrico es un valor que representa la integración de la textura del suelo junto con la cobertura vegetal (manifiesta a través de la longitud de raíces). Dada la complejidad en la distribución de la textura del suelo asociada al tipo de cobertura vegetal, se decidió aplicar el mismo valor de textura para los tipos de vegetación asociados en toda la cuenca. En este sentido, el modelo es más sensible a los cambios en términos de cobertura vegetal, que a los cambios de textura del suelo.

a) Balance Hídrico
(mm)



b) Balance Hídrico
(mm)

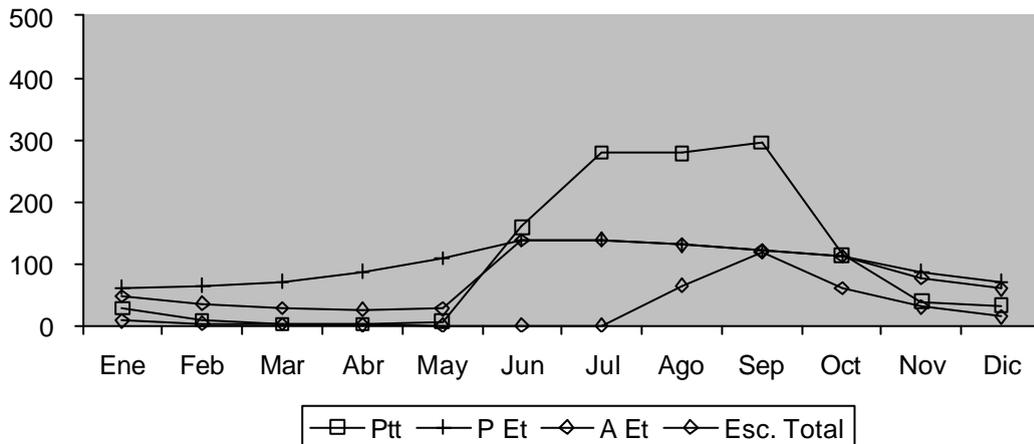


Figura 13. Balances hídricos con el método de Thornthwaite, la gráfica a) representa a la estación 14007 y el balance b) al cálculo para la cuenca del río Cuitzmalá. El desglose de leyendas es el siguiente: Ptt) Precipitación, PEt) Evapotranspiración potencial, AEt) Evapotranspiración actual, y Escorrentía total.

Tabla 11. Desarrollo de los parámetros del balance hídrico de Thornthwaite para la cuenca del río Cuitzmalá.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------------

Precipitación	28	8	2	2	7	158	279	278	295	114	39	33	1245
Evapotr. Potencial	61	65	71	87	109	138	139	130	120	113	87	71	1190
Déficit Ppt (P-PEt)	-33	-56	-69	-85	-101	21	140	148	175	2	-47	-39	
Déficit Acumulado Ppt.	-119	-175	-244	-329	-430	0	0	0	0	0	-47	-86	
Cálculo previo H/Suelo	134	106	80	57	37	58	199	346	521	523	180	154	
Humedad del Suelo	134	106	80	57	37	58	199	219	219	219	180	154	
Cambio en la H. Suelo	-19	-28	-26	-24	-19	21	140	20	0	0	-38	-26	
Evapotransp. Actual	48	36	29	26	27	138	139	130	120	113	78	59	941
Déficit en H. Suelo	14	29	43	61	82	0	0	0	0	0	9	12	
Exceso agua en Suelo	0	0	0	0	0	0	0	128	175	2	0	0	
Agua disponible/escorr.	15	8	4	2	1	0	0	128	239	121	60	30	
Escorrentía TOTAL	8	4	2	1	0	0	0	64	119	60	30	15	304

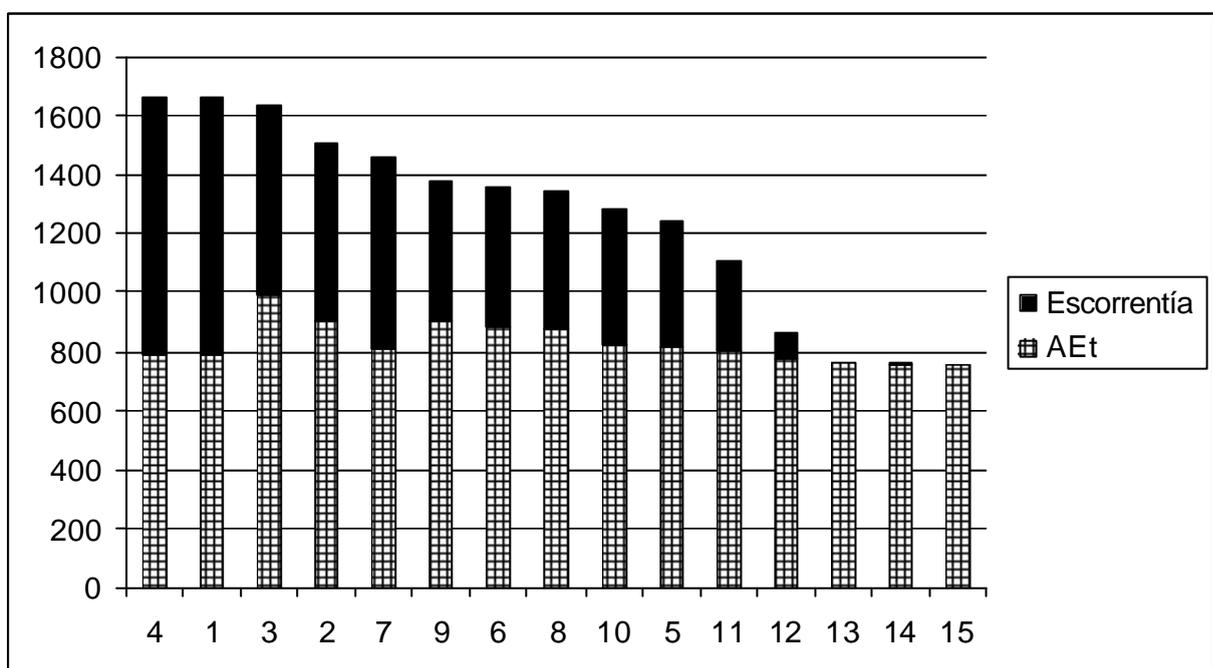


Figura 14. Desglose de la precipitación en términos de escorrentía y evapotranspiración actual para cada UREh, ordenadas de mayor entrada de lluvia a menor.

Tabla 12. Desglose de los parámetros hídricos básicos correspondientes para cada UREh, derivados de la aportación relativa de cada estación sobre la superficie de cada UREh. La última columna corresponde a los tres intervalos de precipitación que se reflejaron ordenando a las UREh con base en el gradiente de precipitación.

UREh	Parámetros hídricos básicos (mm)				Interv. Lluvia
	Precipitación	PEt	AEt	Escorrentía	

4	1667	861	792	875	>1400
1	1665	866	794	871	
3	1631	1340	991	640	
2	1504	1242	909	595	
7	1461	1048	810	651	
9	1379	1321	909	469	1000-1400
6	1358	1284	882	476	
8	1342	1281	876	467	
10	1284	1207	825	458	
5	1239	1219	816	422	
11	1109	1251	801	308	<1000
12	859	1364	775	84	
13	768	1351	763	5	
14	762	1358	762	0	
15	754	1399	754	0	
Cuitzmala	1245	1235	831	414	

Con base en la distribución de las UREh agrupadas en los intervalos de precipitación de la Tabla 12, se obtuvo un mapa de precipitación para toda la cuenca del río Cuitzmala (Figura 15).

Precipitación en la cuenca del río Cuitzmala

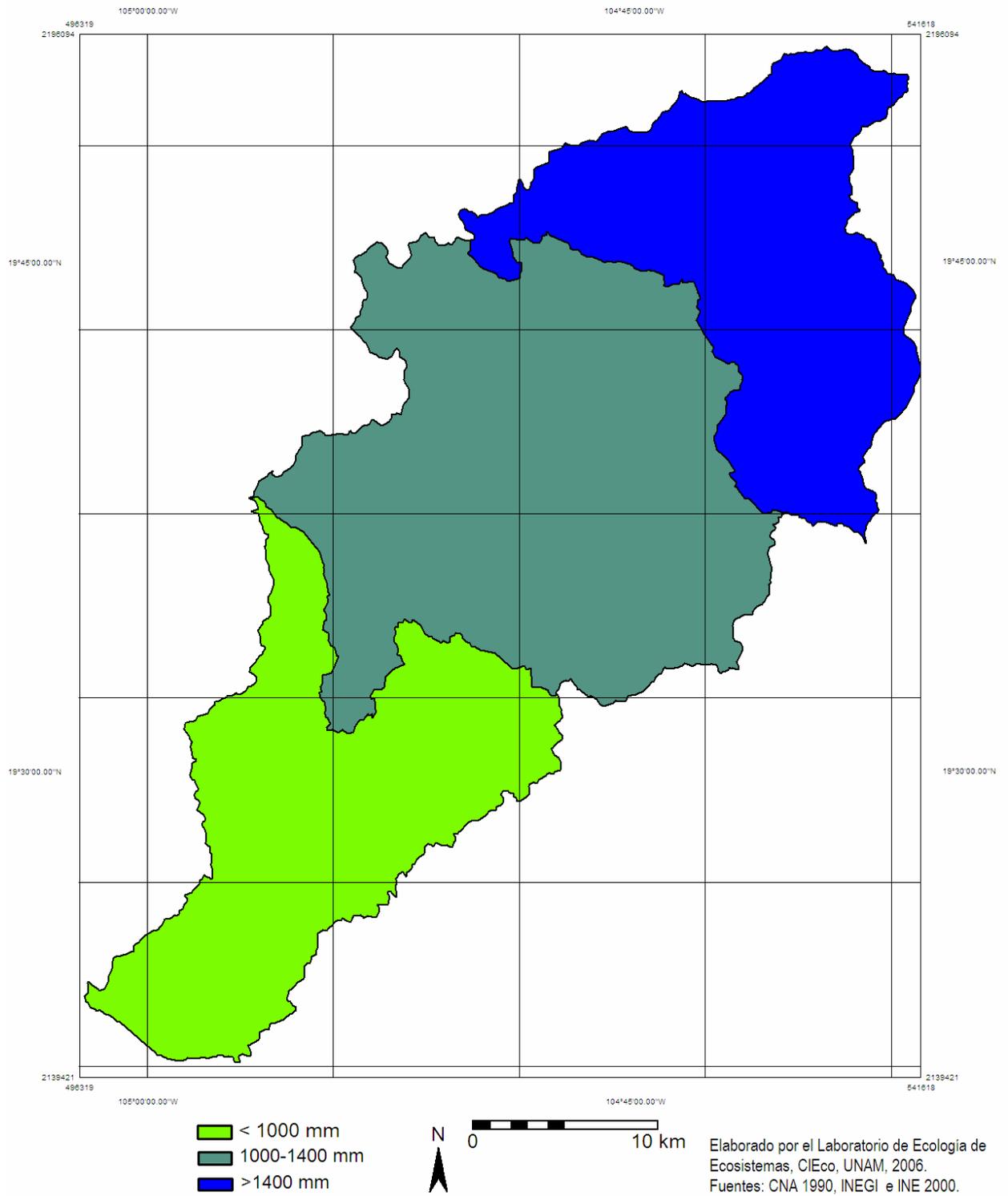


Figura 15. Distribución de la precipitación anual en la cuenca del Río Cuitzmala, con base en la información producida para las UREh.

6.2.3 Escorrentía

Con base en datos de 20 años durante el período de 1971 a 1995, se calculo el valor promedio del gasto mensual de la estación hidrométrica de la CNA, Cuixmala. El gasto promedio se transformó a lámina de escorrentía, con el objetivo de comparar mediante una Chi cuadrada ($\chi^2 = 51.09$, $p < 0.001$, $g.l. = 11$), los valores medidos con los estimados a partir del modelo de Thornthwaite (Tabla 13 y Figura 16).

Tabla 13. Promedios de lámina mensual calculados, junto con los promedios derivados a partir de los valores mensuales del gasto medio de la estación hidrométrica Cuixmala.

	Lámina de escorrentía (mm)		Gasto medido m^3s^{-1}
	Transformada	Calculada	
Enero	14	8	5.7
Febrero	4	4	1.7
Marzo	3	2	1.1
Abril	2	1	0.7
Mayo	1	0	0.4
Junio	7	0	3.1
Julio	29	0	12.3
Agosto	46	64	19.4
Septiembre	87	119	36.5
Octubre	47	60	19.7
Noviembre	18	30	7.5
Diciembre	9	15	3.6
Total	266	304	

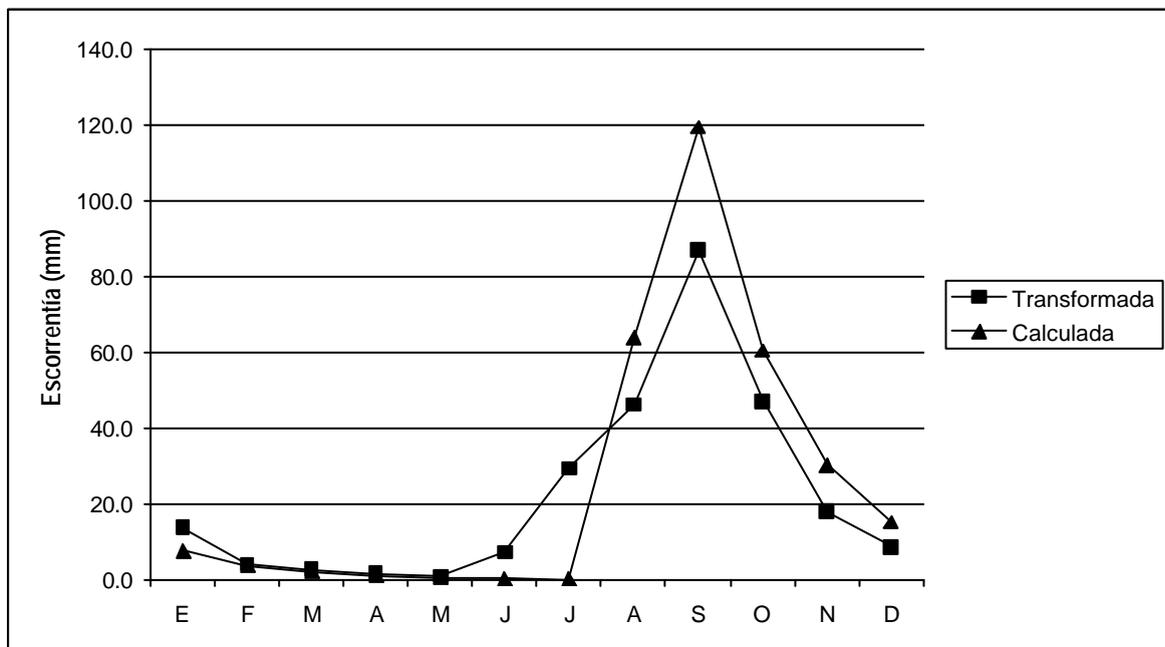


Figura 16. Escorrentía promedio mensual calculada y derivada de los valores de gasto mensual de la estación hidrométrica Cuixmala.

6.3 Síntesis

6.3.1 Matriz de decisión

A partir de la matriz de decisión, en la cual se integró la información jerarquizada de cada punto potencial de monitoreo, se establecieron tres criterios para generar una última clasificación. El primero consistió en una sumatoria de los valores derivados de cada capa de información de la cuenca; el segundo criterio fue la suma por separado de los valores de vegetación e hidrología; y el tercero fue anotar la frecuencia de la jerarquía más importante (1) por punto. Una última columna ordenó por orden de prioridad a los 27 puntos, con base en los tres criterios antes mencionados. Se decidió suponer que los fondos disponibles para implementar la red de monitoreo alcanzaran para un total de seis estaciones, generando cinco grupos de puntos en la matriz. El primer grupo corresponde exclusivamente al punto uno, que representa la integración de todo el sistema (desembocadura de la cuenca del río Cuitzmala); el segundo grupo de puntos corresponde a los de valor entre dos y tres, producto de la suma de vegetación e hidrología, hasta completar las seis estaciones; el tercer grupo corresponde al restante de puntos con los valores dos y tres de vegetación e hidrología; el cuarto grupo corresponde a estaciones con valor entre cuatro y seis de vegetación e hidrología; el último grupo es el más variable, teniendo los valores con menor importancia para ser equipados con una estación de monitoreo (Tabla 14).

Tabla 14. Matriz de decisión con los 27 puntos potenciales de monitoreo evaluados por siete capas de información de la cuenca (red de drenaje, litología, poblados, hidrología, cobertura vegetal, pendiente y superficie). Las columnas restantes son la evaluación de los valores de jerarquía en cada punto. La primera es la sumatoria de todos los valores por cada punto, la segunda es la suma por separado de los valores de cobertura e hidrología, y por último es la frecuencia de aparición de la jerarquía 1. La columna de prioridad es el orden de importancia de cada punto, con base en los valores de las tres columnas mencionadas.

Puntos	RedDren	Litol	Pob	Hidro	Cob Veg	Pen	Sup	?	Veg e Hidr	Frec Jer 1	Prioridad
1	1	1	1	1	1	1	1	7	2	6	1
20	3	2	2	1	1	1	3	13	2	3	2
25	3	3	3	1	1	1	3	15	2	3	3
3	3	4	4	1	1	1	3	17	2	3	4
5	3	2	2	1	2	1	3	14	3	2	5
22	3	2	1	1	2	2	1	12	3	2	6
13	3	3	2	2	1	1	3	15	3	2	7
15	3	3	1	1	2	1	2	13	3	2	8
24	1	4	1	1	2	2	1	12	3	2	9
7	3	3	2	1	2	2	3	16	3	1	10

19	3	2	2	2	2	2	3	16	4	0	11
18	2	2	1	3	3	3	2	16	6	1	12
23	2	1	3	3	3	2	3	17	6	1	13
12	1	3	3	3	3	3	1	17	6	1	14
6	2	3	3	3	3	3	2	19	6	0	15
17	2	4	4	4	3	3	1	21	7	0	16
8	4	2	3	4	4	3	4	24	8	0	17
10	3	2	3	4	4	4	1	21	8	0	18
2	4	3	3	4	4	4	4	26	8	0	19
9	4	2	4	4	4	4	4	26	8	0	20
11	4	2	4	4	4	4	4	26	8	0	21
14	4	2	4	4	4	4	4	26	8	0	22
16	4	2	4	4	4	4	4	26	8	0	23
21	4	2	4	4	4	4	4	26	8	0	24
4	4	4	4	4	4	3	4	27	8	0	25
26	4	3	4	4	4	4	4	27	8	0	26
27	4	4	4	4	4	4	4	28	8	0	27

6.3.2 Puntos de monitoreo

Se generó un mapa con los cinco grupos de puntos resultantes de la matriz de decisión. Los de categoría uno y dos fueron los propuestos para ser equipados con estaciones de monitoreo ambiental (Figura 17).

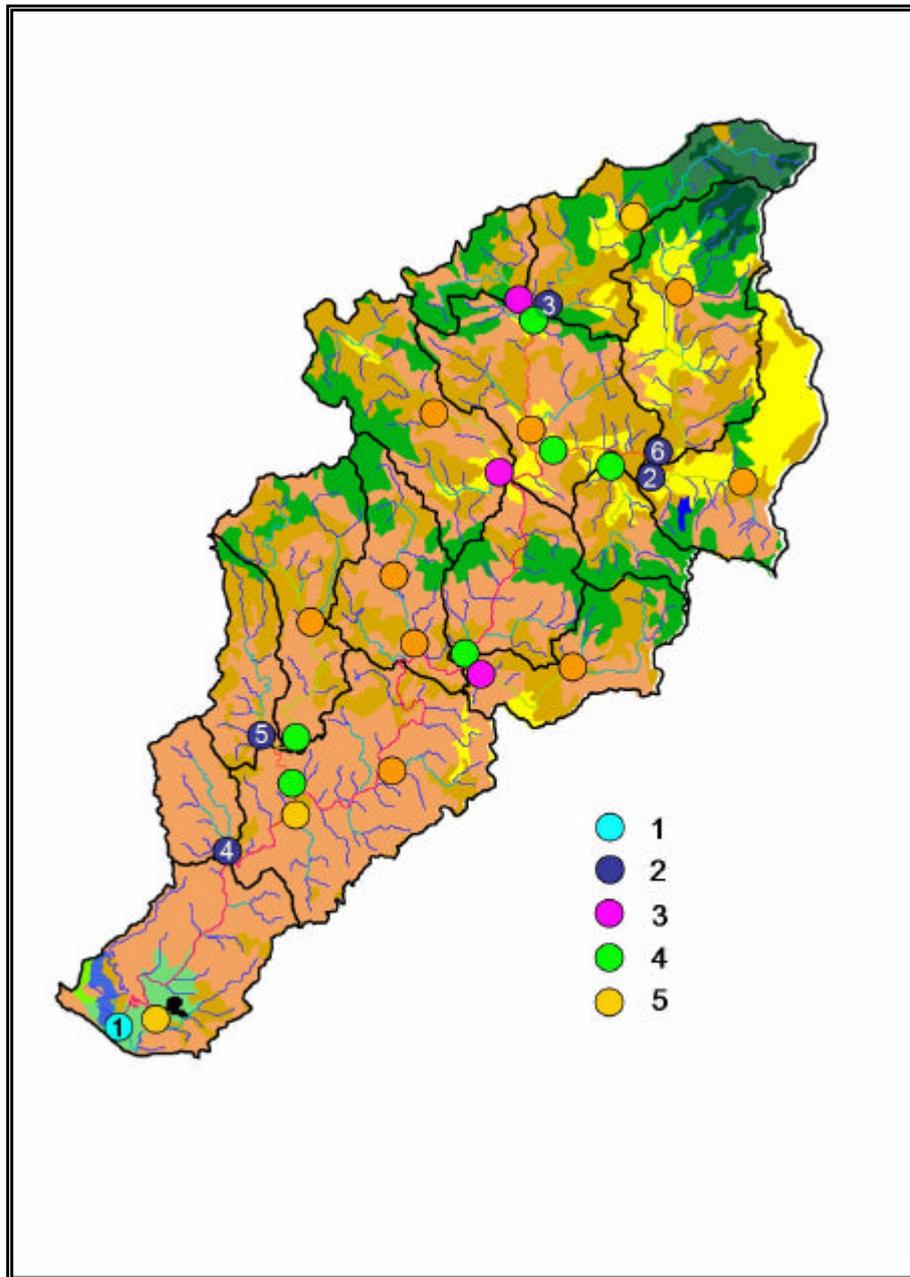


Figura 17. Puntos propuestos para monitoreo, ordenados por orden de importancia a través de cinco grupos, sobre la capa de cobertura vegetal del Inventario Nacional Forestal.

6.3.3 Caracterización de los puntos de monitoreo

Se describieron los atributos asociados al margen de influencia de cada punto de medición, desde un punto de vista de red hidrológica. Para el caso de cinco de ellos, su margen de influencia es a nivel de UREh, y el restante representa la integración de todos los elementos de la cuenca del río Cuitzmala:

1. Integración de toda la cuenca. El punto de medición representa el escurrimiento concentrado sinóptico de la cuenca del río Cuitzmala. Con una superficie de influencia de 1089 km², incluye la

manifestación de todas las variantes de las temáticas contempladas para la caracterización del sistema sobre la naturaleza hidrológica del mismo .

2. El punto de medición se contempla para la desembocadura de la UREh 3, cuya superficie comprende aproximadamente unos 80 km². La red hidrológica es de tipo tres y representa el paso por tres tipos de materiales geológicos, el granito, material aluvial y la caliza. El relieve es relativamente uniforme en términos de pendientes, y presenta la cantidad promedio de poblados (cinco) que hay por UREh. En términos hidrológicos, es la tercera UREh que recibe mayor precipitación (1631 mm/año), resultando en una de las áreas tributarias de mayor aporte para el río Cuitzmala (640 mm/año). Más de la mitad del territorio (68%) se encuentra transformado para la realización de actividades agropecuarias, siendo la agricultura la actividad más ampliamente distribuida. La vegetación remanente comprende bosques de encino y porciones de selva caducifolia y subcaducifolia.

3. El sitio de medición se contempla para la desembocadura de la UREh 1, con un superficie de influencia de aproximadamente unos 84 km². La red hidrológica es de tipo tres y representa el paso por cuatro tipos de materiales, el granito en su mayoría (97%), seguido por material volcanoclástico, aluvial y caliza respectivamente. El relieve es accidentado, y en total presenta cuatro poblados. En términos hidrológicos es la segunda UREh con mayor precipitación (1665 mm/año), siendo la segunda área tributaria de mayor aporte para el río Cuitzmala (871 mm/año). La mitad del territorio se encuentra conservado, presentando un importante incremento en la transformación de la cobertura vegetal del período que va de 1971 al 2000, con la actividad pecuaria como la dominante desde la perspectiva de superficie. La UREh incluye todos los tipos de vegetación asociados a la cuenca del río Cuitzmala según el Inventario Nacional Forestal (INE *et al.*, 2000), con áreas de bosque de encino, selva baja caducifolia y subcaducifolia, pino-encino, y mesófilo de montaña en orden superficie ocupada.

4. El sitio de medición se contempla para la desembocadura de la UREh 14, cuya superficie comprende aproximadamente unos 33 km². La red hidrológica es de tipo tres y sólo tiene paso por material de tipo granito. El relieve es parcialmente accidentado y uniforme, sin presentar poblados. En términos hidrológicos es una de las UREh que reciben menos precipitación (762 mm/año), presentando un déficit hídrico en la mayoría del año, siendo un área con cero aporte de escorrentía para el río Cuitzmala. Prácticamente todo su territorio se encuentra conservado

(98%), presentando vegetación de tipo selva caducifolia y subcaducifolia, y una zona marginal de praderas inducidas (actividad pecuaria).

5. El sitio de medición se contempla para la desembocadura de la UREh 13, cuya superficie comprende aproximadamente unos 41 km². La red hidrológica es de tipo tres y contempla el paso por dos materiales, granito en su gran mayoría y riolita. El relieve es parcialmente accidentado y uniforme, y tan solo presenta un poblado. En términos hidrológicos, al igual que la UREh 14 es una de las UREh que reciben menos precipitación (768 mm/año), presentando un déficit hídrico en la mayoría del año y siendo un área con prácticamente cero (<6 mm/año) en aporte de esorrentía para el río Cuitzmala. La mitad del territorio se encuentra conservado, presentando un importante incremento en la transformación de la cobertura vegetal del período que va de 1971 al 2000, con la actividad pecuaria como la dominante en términos de superficie. La vegetación es de tipo selva baja caducifolia y subcaducifolia, con una superficie marginal de bosque de encino.

6. El sitio de medición se contempla para la desembocadura de la UREh 2, cuya superficie comprende aproximadamente unos 105 km². La red hidrológica es de tipo tres y contempla el paso por cuatro diferentes materiales, granito en su gran mayoría, caliza, aluvial y volcanoclástico en último término. El relieve es parcialmente accidentado y uniforme, y presenta 12 poblados, resultando en la mayor concentración de poblados de todas las UREh. En términos hidrológicos, es la cuarta UREh que recibe mayor precipitación (1504 mm/año), resultando en una de las áreas tributarias de mayor aporte para el río Cuitzmala (595 mm/año). Aproximadamente la mitad del territorio se encuentra transformado para la realización de actividades productivas agrícolas y pecuarias. La vegetación remanente en orden de más a menos superficie ocupada, comprende porciones de bosque de encino, selva caducifolia y subcaducifolia, bosque mesófilo de montaña y bosque de pino-encino.

7 Discusión

Aportar las bases para el seguimiento a largo plazo de parámetros ecológicos en la cuenca del río Cuitzmala, implicó una regionalización basada en el marco conceptual "evento-estructura-evento" (Figura 4). Dada la dimensión espacial del sistema de estudio, así como las limitaciones temporales del proyecto, se indujo al uso de información disponible cuya resolución espacial y temporal resultara lo suficientemente útil como para caracterizar a la cuenca a través del procesamiento e integración de los datos.

Con aproximadamente 1089 km², la cuenca del río Cuitzmala presenta un marcado gradiente de atributos litológicos en su territorio (Anexo 4 y Tabla 6). En dirección noreste de la cuenca se presenta un gradiente altitudinal, en donde la precipitación aumenta y los tipos de vegetación varían de tal forma que en la zona suroeste predomina la selva caducifolia y subcaducifolia, mientras que hacia el noreste comienzan los bosques de encino (a partir de los 400 msnm), bosque mesófilo de montaña (a partir de los 700 msnm) y contiguo al mismo, bosque de pino-encino (a partir de los 800 msnm).

Analizando a la cuenca desde una escala 1:250 000, es posible apreciar un solapamiento entre la actividad agrícola y las zonas de material aluvial, que a su vez se corresponden a áreas de planicies en donde la pendiente es mínima (Anexos 2, 4 y 5). Por otro lado, el territorio ocupado por actividad pecuaria no muestra una relación con características físicas como la litología o pendiente de la cuenca.

El territorio bajo aprovechamiento en su gran mayoría está centrado en las actividades primarias, de tipo temporal y extensiva. Del total de la superficie de la cuenca, más de la mitad no es utilizada por actividades productivas, y tampoco se presentan grandes centros urbanos o industria (Anexo 5 y Tablas 7 y 8). Lo anterior es señal de que el movimiento de recursos de un lugar a otro, como pudiera ser el uso de pozos o acuíferos para riego o drenaje, aún no se diversifica para abastecer demandas propias de grandes desarrollos agropecuarios o urbanos. Esto sugiere que la integridad de los servicios ecosistémicos de corte hidrológico aún se mantiene relativamente estable, sin embargo no hay estudios publicados que hayan sido planteados para evaluar la cantidad y calidad de los servicios hidrológicos bajo el contexto de toda la cuenca como unidad de estudio. Por otro lado, hay que reconocer que en los sistemas marcadamente estacionales, en los que el detonante de los procesos funcionales resulta ser el agua, se presentan relaciones muy estrechas (y tal vez vulnerables) entre el aprovechamiento (sociedad) y el mantenimiento de los patrones y procesos esenciales (naturaleza) que definen al paisaje.

La infiltración es uno componente del ciclo hidrológico difícil de evaluar. Su estimación depende de muchas variables relacionadas con la distribución en el espacio de elementos como la cobertura del suelo, la geomorfología y la litología. En sitios como la cuenca del río Cuitzmala, en donde el agua se encuentra disponible de manera marcadamente estacional, resulta importante identificar y entender elementos del paisaje sujetos al aprovechamiento humano, como lo es el caso de los acuíferos y sus relaciones con la infiltración como fuente de recarga vía propiedades litológicas.

Las propiedades litológicas, en relación con el agua, generalmente son analizadas a partir de atributos como son la porosidad, permeabilidad o conductividad y transmisividad hidráulica. La porosidad es el medio por donde circula el agua subterránea. La permeabilidad o conductividad hidráulica es la capacidad de un acuífero de conducir agua; siendo más específicos, la permeabilidad está en función del tamaño de los poros, mientras que la conductividad depende de la permeabilidad del acuífero afectado por la densidad y viscosidad del agua. La transmisividad es la capacidad que tiene un acuífero de transmitir agua a través de todo su espesor, o sea que es el producto entre la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero (King *et al.*, 1991).

Cortés (2001) propuso tres unidades hidrogeológicas para caracterizar a la cuenca del río Cuitzmala (Tabla 15). Resulta interesante que los sitios potenciales de monitoreo resuman el gradiente litológico que, a su vez, incide sobre la naturaleza hidrológica de la cuenca. Esto quiere decir que las diferentes unidades y subunidades hidrogeológicas propuestas por Cortés (2001) se encuentran representadas en la regionalización propuesta para comprender la dinámica ecohidrológica de la cuenca del río Cuitzmala (Figura 17 y Tabla Anexo 3).

Como era de esperarse, el patrón de lluvia coincide con el patrón registrado en la Estación Biológica Chamela (EBH) (Bullock, 1986; García-Oliva *et al.*, 1991), siendo este marcadamente estacional y concentrándose en cinco meses del año a partir de junio (Figura 9 y Tabla 9). Si bien resulta predecible que se presente una marcada estacionalidad año con año, características como intensidad y duración de la época de lluvias no necesariamente resultarían igualmente predecibles, lo cual también se correspondería con el comportamiento aleatorio del clima en la EBCH (García-Oliva *et al.*, 1991).

La interpolación de los datos de lluvia para la cuenca del río Cuitzmala (Figuras 10 y 11), necesariamente generó el mismo patrón estacional en términos de cantidad y marcha mensual (Figura 12 b y Tablas 10 y 11). Sin embargo, la cantidad de lluvia siguió un gradiente altitudinal que se reflejó en la generación de escorrentía para diferentes Unidades de Respuesta Ecohidrológica (UREh) de la cuenca (Figura 13). El monto para evapotranspiración se mantuvo en un intervalo mucho más estable que varió entre los 754 y 991 mm, mientras que para el caso de la escorrentía se registró un intervalo mucho más amplio que varió de 0 a 875 mm (Tabla 12). A diferencia de la precipitación, al parecer la energía potencial para evapotranspirar se encuentra menos relacionada con gradientes ambientales como la altitud, al menos para la escala de la cuenca y la sensibilidad del modelo empleado para el cálculo del balance hídrico (Thornthwaite & Mather, 1957).

Los balances generados para cada UREh, ayudaron a distinguir las áreas que pueden estar contribuyendo más al cauce del río Cuitzmala, así como también aquellas unidades que la mayor parte del año presentan un déficit hídrico y que, por consiguiente, su aporte en términos de escorrentía es mínimo para la mayoría de los años registrados (Figuras 13 y 14 y Tabla 12).

Los cálculos para la cuenca completa mostraron que la precipitación anual es mayor al promedio nacional (711 mm) (Tabla 11); el gradiente de lluvia anual se representó espacialmente, agrupando las UREh en tres grandes regiones que van del valor mínimo de 754 mm a un máximo de 1667 mm (Figura 14). La escorrentía calculada para la cuenca se comparó con el valor transformado del gasto medio de la estación hidrométrica Cuixmala (Figura 15 y Tabla 13). Ambos patrones resultaron ser muy semejantes, con una marcada estacionalidad y un pico de producción de lámina para el mes de septiembre. Derivada de la precipitación calculada, la respuesta de la cuenca, en términos de escorrentía, resultó estar desfasa por un mes más tarde en comparación con los datos de la estación hidrométrica. El modelo de Thornthwaite & Mather (1957) estima la escorrentía para cada mes de manera sistemática, siendo ésta el resultado del 50% del excedente del mes en turno, más el 50% de agua excedente del mes anterior almacenada en forma de agua retenida; es interesante ver que el desfase entre las respuestas de los valores calculados y transformados pueda estar relacionado con la manera en la que se estima la escorrentía por Thornthwaite & Mather (1957), y por el hecho de que el material parental en la cuenca sea poco permeable (81 granito %) y genere respuestas rápidas en forma de escorrentía ante eventos de precipitación (no obstante la tendencia de la respuesta de la escorrentía medida coincide con los valores calculados de lluvias; ver Tabla 13 y Figura 15). Aunado a lo anterior, el estadístico Chi cuadrada ($\chi^2 = 64.29$, $p < 0.001$, $g.l. = 11$) mostró una diferencia significativa entre los valores de escorrentía calculados y los registrados. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que la diferencia en términos de lámina de escorrentía anual para los datos calculados fue de 38 mm (un 14% más de lo que escurre según datos de la estación hidrométrica) adicionales por parte del valor estimado, y dada la simplicidad del modelo y la semejanza cualitativa entre ambas distribuciones, el cálculo de la escorrentía se considera una buena aproximación inicial. Es importante notar que para ambas fuentes de datos, el gasto medio mensual nunca mostró valores de cero en el río Cuitzmala, lo que indica que se trata de un cauce permanente a pesar de que hay dos meses (abril y mayo) críticos con valores por debajo de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Tabla 13).

1	2		3	
1 ^c	2 ^a	2 ^b	3 ^a	3 ^b
Formación San Miguel	Granito	Toba, ignimbrita y sílice	Arenisca-conglomerado	Roca ígnea, intrusiva, extrusiva y calcárea y arenas arcillosas mal consolidada
2, 3, 5, 6, 7 y 8	1, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14	15	15	2, 3, 5, 6, 7 y 8

Tabla 15. Unidades hidrogeológicas propuestas por Cortés (2001) con sus atributos resumidos.

Unidades Hidrogeológicas	1 ^b	Formación San Miguel	UREh
	1 ^a	Formación San Miguel. Área elevada de montaña o premontaña (zona de recarga)	
Subunidades	Ubicación		

El marco conceptual “evento-estructura-evento” representa un análisis en términos funcionales del sistema. En él se concibe a la lluvia como un elemento detonante, cuya dinámica a nivel de paisaje va a estar en retroalimentación con elementos estructurales como la cobertura vegetal y geomorfología, generando respuestas que serán parte de la condición antecedente ante el evento disparador subsiguiente. Si bien la calidad y resolución de la información disponible para trabajar no fue la ideal, ésta resultó suficiente para establecer criterios que representaran tendencias generales en cuanto a la estructura de la cuenca y sus relaciones dinámicas como los son la hidrología y la transformación de la cobertura vegetal en el paisaje. El marco conceptual “evento-estructura-evento” (Figura 4) sirvió para orientar la estructura del análisis de la información antecedente en el sistema, así como para reconocer el tipo de parámetros a monitorear, su relación y resolución necesaria para comprender asociaciones de corte ecohidrológico en la cuenca.

Para la integración de los aspectos biológicos y geofísicos en una cuenca (dinámicas ecosistémicas), se requiere de un marco conceptual cuyo enfoque se centre en la forma en que interactúan y se aparean las dinámicas de los patrones de clima, vegetación y geomorfología, sobre la naturaleza hidrológica del sistema (Caylor *et al.*, 2004; Cummins, 1974; Hynes, 1975). Es importante definir variables claves, indicadoras de la integridad de los procesos, y entender la escala espacial y temporal a la que operan. Una variable, en términos geomorfológicos, es por ejemplo la formación de la red de drenaje, la cual ocurre en escalas de tiempo geológicas, la distribución de la vegetación, ante las condiciones ambientales por su parte refleja respuestas de

escalas de tiempo mucho más cortas. Es por lo anterior que, a pesar de ser completamente dinámicos los elementos de un sistema, las escalas a las que operan y se reflejan sus cambios pueden resultar muy distintas. Identificar y comprender cambios dependientes de la escala, en relación con patrones y procesos, debe de ser un prerrequisito para poder predecir las consecuencias en las alteraciones de los sistemas ecológicos, ya sea producto de intervenciones naturales o humanas (Gardner, 1998). La consideración de las escalas espaciales y temporales resulta esencial para el diseño de estrategias de manejo, para monitorear cambios, así como para la remediación de efectos indeseables en el ambiente (Dayton *et al.*, 1992).

El marco conceptual "evento-estructura-evento" considera las escalas de cambio a nivel ecohidrológico. A pesar de que la geomorfología es un componente estructural, las tasas de cambio reflejadas a nivel de toda la cuenca desde una perspectiva ecohidrológica ocurren a escalas de tiempo profundo que no resultan perceptibles, y por consiguiente operativas en los modelos.

7.1 Propuesta de estudio a largo plazo en la Cuenca del río Cuitzmala

Es claro que para estudiar y entender de manera integral los patrones y procesos que ocurren en la naturaleza, resulta indispensable identificar el papel antecedente de dos componentes centrales e íntimamente relacionados: el espacio y el tiempo. El espacio de un sistema puede ser visto como una matriz integrada por elementos que dan lugar a la estructura del mismo, y que inherentemente presentan una organización que los hace estar vinculados unos con otros en algún grado. El tiempo representa un tránsito constante de pulsos; puede verse reflejado a través del dinamismo entre los elementos de un sistema, como resultado de una interacción (intercambio de materia y energía) diferencial intra e inter sistémica.

Lo anterior se refiere a que la constitución y la disposición de cada elemento que conforma a un sistema en la naturaleza son esencialmente distintas, por lo que igualmente todo intercambio de materia y energía en la naturaleza es diferente. Esto quiere decir que todo estado en la historia, no sólo de los elementos, sino también de los sistemas naturales en su conjunto, resulta ser único (Dayton *et al.*, 1992). He ahí la relevancia de tomar en cuenta el contexto de los sistemas naturales, en términos de reconocer la constitución, la disposición y la temporalidad (escalas temporales asociadas al cambio o dinamismo) de los elementos que mejor explican sus patrones y procesos. Tomando esto en consideración, y con base en la información generada en este estudio, a continuación se enlistan recomendaciones específicas para un monitoreo hidrológico de largo plazo en la Cuenca del Río Cuitzmala.

Primero se recomienda hacer una caracterización adecuada de la estructura espacial de todo el sistema, y una adecuada interpretación de los datos obtenidos a partir del monitoreo asociado. En este sentido, es importante hacer un estudio para la identificación y clasificación de las unidades geomorfológicas en la cuenca, priorizando en nivel de detalle con las UREh contempladas en la red de monitoreo. Para esto se cuenta con las fotos aéreas pancromáticas B/N a escala aproximada 1:75 000, elaboradas por el INEGI, del 7 de enero de 1996 correspondientes a la zona E13-2-5. Las fotos permiten realizar una interpretación estereoscópica semidetallada de las unidades geomorfológicas en la cuenca. Asimismo, se recomienda hacer una clasificación más detallada (al menos a escala 1:50 000) y actualizada de la cobertura vegetal (mediante imágenes de satélite recientes o un nuevo vuelo fotográfico). A la vez que se actualiza la distribución de la vegetación actual, se le da seguimiento al patrón de transformación del uso de suelo en la cuenca. Se recomienda que dicha clasificación se haga al menos cada 10 años y preferentemente cada 5.

Una vez reconociendo los tipos de vegetación y su contexto geomorfológico, se recomienda hacer una selección de puntos clave para caracterizar, a escalas locales, el proceso de saturación de humedad en el suelo, la generación de escorrentía (cantidad y calidad), la precipitación interceptada y la evapotranspiración actual. Lo anterior con la intención de agrupar las respuestas en función al tipo de cobertura del suelo y su unidad geomorfológica asociada, ya sea pradera inducida, selva baja o bosque de pino-encino en pie de monte, premontaña, meseta, coluvión o valle por mencionar algunas. La propuesta es parametrizar ciertos elementos que estén altamente relacionados con las diferencias estructurales del relieve, a través de un seguimiento de por al menos dos años de la época de lluvias en detalle, y fechas específicas en la época seca.

En las UREh de la red de monitoreo también se debe hacer una identificación detallada de los usuarios del agua (uso doméstico y productivo), así como una localización de estructuras (represas, ojos de agua, pozos, etc.), que sirvan de proveedores a los usuarios y puedan ayudar a estimar la cantidad y calidad de los cauces.

Una vez caracterizada la estructura del sistema será posible implementar el monitoreo en red, de tal forma que se generen datos para analizar la dinámica de la cuenca desde una perspectiva ecohidrológica, con base en el marco "evento-estructura-evento". En este sentido, en cada una de las UREh que forman parte de la red de monitoreo (Figura 15) se propone darle seguimiento a la precipitación y temperatura. La estación se compondría de al menos un pluviógrafo y un termómetro de máximas y mínimas. La localización debe de ser en una zona abierta, de preferencia en un poblado y a cargo de una escuela u otra entidad de la comunidad

que pueda integrarse al proceso de toma de datos de forma constante. La esorrentía se mediría en la desembocadura de cada UREh. Pensando en la limitante de recursos, una manera de obtener datos de esorrentía sin contar con una estación automatizada es haciendo un perfil transversal del cauce, para estimar el volumen a partir del nivel de una regla graduada que indique el nivel del cauce. La resolución de la esorrentía dependerá de la cercanía de comunidades a la desembocadura de la UREh, sin embargo al menos debe de hacerse una colecta de datos semanal una vez iniciada la época de lluvias. Se tomarían datos de nivel del cauce, así como ciertos parámetros sencillos de la calidad como turbidez, conductividad eléctrica, nutrientes (N y P) y pH. Al moverse el agua a través del paisaje como lo es la red de drenaje, sus características químicas se transforman, con variaciones en concentraciones de materiales disueltos y en suspensión que son transportados corrientes abajo y utilizados por la biota (Wallace & Hutchens, 2000; Whiles & Dodds, 2002). Estos materiales transportados reflejan varias combinaciones de historia geológica, usos actuales y pasados del suelo así como efectos directos o indirectos de contaminación (Covich, 2005).

Como monitoreo permanente al respecto de la cobertura vegetal, se propone el uso de imágenes de satélite (revisar sistemas de media resolución Landsat-7 y Terra), a partir de las cuales se pueda registrar la evapotranspiración actual y otros atributos de la vegetación como la senescencia foliar (caída y emergencia de hojas), la transformación del uso del suelo y la evolución de su distribución. Con los alcances tecnológicos a la par de su reducción de precios, las imágenes de satélites son una oportunidad para obtener importantes parámetros relacionados con la hidrología y energética de un sistema, como lo es la evapotranspiración (Bastiaanse, 2000; Bastiaanse *et al.*, 1998a; Bastiaanse *et al.*, 1998b; Mekonnen, 2005).

8 Consideraciones finales

En el presente trabajo se ha hablado de la urgencia por reconocer, al menos en el caso del agua, la relevancia de las relaciones espacio-tiempo contextuales (antecedentes), la necesidad de generar datos a corto y largo plazo, la importancia de basarse en un marco conceptual para hacer síntesis lógicas, así como el valor de la complementariedad disciplinar e institucional para el uso y aprovechamiento del ambiente. La investigación viene identificando, cada vez con más frecuencia, sinergias como la siguiente: la dirección, la tasa y la cantidad de movimiento del agua, influye sobre los patrones de diversidad, de estructura y de funcionamiento de redes tróficas que, a su vez, regula las dinámicas ecosistémicas como la productividad, la descomposición, y el ciclaje de nutrientes y otros materiales que, en su conjunto, representan los servicios ecosistémicos (Covich, 2005; Hershey *et al.*, 1999; Kling *et al.*, 2000; Soranno *et al.*, 1999). La complejidad inherente en la vida, en las sociedades humanas y la interacción entre ambas, ha promovido líneas de investigación, inter y trans-disciplinarias. Más allá del reto discursivo, ahora queda en el aspecto formativo de cada investigador el desarrollo de metodologías conscientes de los vacíos y niveles explicativos de sus proyectos, de tal suerte que la investigación sea congruente con un manejo adaptativo del entorno. Es crucial el desarrollo de una comunicación, con fines de divulgación, colaboración o difusión de información, que represente una vía auténticamente valorada por cada uno de nosotros como parte esencial del proceso de integración de visiones en esta colectividad.

9 Conclusión

Método

Las Unidades de Respuesta Eco-hidrológica son una herramienta de análisis para estudiar las relaciones entre la naturaleza hidrológica de una cuenca con las dinámicas de su cobertura vegetal. Utilizando el marco conceptual evento-estructura-evento, se hace un énfasis en reconocer la estructura y disposición de los elementos más explicativos de las ERUh, así como sus relaciones ante un evento detonante de procesos funcionales (precipitación).

La red de drenaje es un elemento cuyas características son el reflejo resultante de la interacción con la disposición y estructura de los otros elementos que constituyen a las ERUh. Distribuir los puntos potenciales a caracterizar un región con base en la red de drenaje, es una manera de organizar la información con un criterio integral.

La matriz de decisión representó el ejercicio de síntesis en el trabajo. Fue una herramienta útil para la sistematización de la información asociada al sistema, a través de los atributos de los

elementos comprendidos. El resultado de la matriz es una jerarquía de puntos que mejor explican al modelo.

Resultados

La cuenca del río Cuitzmala se dividió en 15 UREh (subcuencas de orden 3), de las cuales cuatro en realidad son cuencas que tienen una entrada de agua de cuencas localizadas en la parte más elevada del terreno.

Sobre la red de drenaje se seleccionaron 27 puntos potenciales de monitoreo, para ser jerarquizados y seleccionar los siete más importantes de acuerdo a la información disponible de la cuenca del río Cuitzmala.

La regionalización ecohidrológica de la cuenca del río Cuitzmala forma parte de un proyecto de la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (MEX-LTER). Su búsqueda es ampliar las escalas espaciales y temporales de los estudios ecológicos, el reconocer el contexto del uso del territorio, la generación de bases de datos sistematizadas y disponibles para el público en general. Generar investigación para el manejo integrado de los recursos naturales.

Bibliografía

- Aparicio, F.J. (2005) *Fundamentos de Hidrología de Superficie* Limusa, México, D.F.
- Baron, J.S., Poff, L., Angermeier, P.L., Dahm, C.N., Gleick, P.H., Hairston, N.G., Jackson, R.B., Johnston, C.A., Richter, B.D., & Steinman, A.D. (2003) Sustaining Healthy Freshwater Ecosystems. *Issues in Ecology*.
- Bastiaanse, W.G.M. (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, **229**, 87-100.
- Bastiaanse, W.G.M., Menenti, M., Feddes, A., & Holtslag, A.M. (1998a) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, **212-213**, 198-212.
- Bastiaanse, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., & van der Wal, T. (1998b) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, **212-213**, 213-229.
- Bennett, V. (1998) The Politics of Water. Urban Protest, Gender, and Power in Monterrey, Mexico. *Journal of Latin American Studies*.
- Bergkamp, G., Cerda, A., & Imeson, A.C. (1999) Magnitude-frequency analysis of water redistribution along a climate gradient in Spain. *Catena*, **37**, 129-146.
- Bullock, S.H. (1986) Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region of México. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, 297-316.
- Burgos, A., Maass, J.M., Ceballos, G., Equihua, M., Jardel, E., Medellín, R.A., Hernandez, L., Ayala, R., & Equihua, A. (enviado) La Investigación Ecológica a Largo Plazo (LTER) y su proyección en México. *Ciencia y Desarrollo*.
- Burgos, A.L. (1999) Dinámica Hidrológica del Bosque Tropical Seco de Chamela. Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, DF, México.
- Callahan, J. (1984) Long-Term Ecological Research. *BioScience*, **34**, 363-367.
- Caylor, K.K., Manfreda, S., & Rodríguez-Iturbide, I. (2004) On the coupled geomorphological and ecohydrological organization of river basins. *Advances in Water Resources*, **28**, 69-86.
- Cervantes, L., Maass, J.M., & Domínguez, R. (1988) Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia. *Ingeniería Hidráulica en México*, **1**, 30-42.
- CEUM (1992) Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- Chahine, M.T. (1992) The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 373-380.
- Chiang, S.M., Tsay, T.K., & Nix, S.J. (2002a) Hydrologic Regionalization of Watersheds. I: Methodology Development. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **28**, 3-11.
- Chiang, S.M., Tsay, T.K., & Nix, S.J. (2002b) Hydrologic Regionalization of Watersheds. II: Applications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **28**, 12-20.
- Christensen, N.L., Bartuska, A.N., Brown, J.H., Carpenter, S., Antonio, C.D., Francis, R., Franklin, J.F., MacMahon, J.A., Noss, R.F., Parsons, D.J., Peterson, C.H., Turner, M.G., & Woodmansee, R.G. (1996) The report of the Ecological Society of America Committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, **6**, 665-691.
- Closs, G., Downes, B., & Boulton, A. (2004) *Freshwater Ecology* Blackwell Publishing, United Kingdom.
- Conagua (2001-2006). Programa Nacional Hidráulico. Conagua.
- Conagua (2004). Estadísticas del Agua en México. CNA, México.
- Covich, A. (2005). Ecological and Hydrological Interactions. In *Encyclopedia of Hydrology*.
- Cummins, K.W. (1974) Structure and function of stream ecosystems. *BioScience*, 631-640.
- Dayton, P., Tegner, M., Parnell, P., & Edwards, P. (1992) Temporal and Spatial Patterns of Disturbance and Recovery in a Kelp Forest. *Community Ecological Monographs*, **62**, 421-445.

- Duckworth, J.C., Bunce, R.G.H., & Malloch, A.J.C. (2000) Vegetation-environment relationships in Atlantic European calcareous grasslands. *Journal of Vegetation Science*, **11**, 15-22.
- Falkenmark, M. & Lindh, G. (1993) *Water in Crisis: a guide to the world's fresh water resources* Oxford University Press.
- FAO (1995). Forest Resources Assessment 1990. FAO, Rome, Italy.
- García-Martinó, A.R., Warner, G.S., Scatena, F.N., & Civco, D.L. (1996) Rainfall, Runoff and Elevation Relationships in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, **32**, 41-24.
- García-Oliva, F., Camou, A., & Maass, J.M. (2002). El clima de la región central de la costa del Pacífico mexicano. In *Historia Natural de Chamela* (eds F.A. Noguera, J.H. Vega Rivera, A.N. García Aldrete & M. Quesada Avedaño), pp. 3-10. Instituto de Biología UNAM, Mexico D.F.
- García-Oliva, F., Ezcurra, E., & Galicia, L. (1991) Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific coast of México. *Geografiska Annaler*, **73**, 179-186.
- Gardner, R. (1998). Pattern, Process, and the Analysis of Spatial Scales. In *Ecological Scale, Theory and Application* (eds D. Peterson & T. Parker). Columbia University Press, NY
- Klopatek, J.M. and R.H. Gardner, New York.
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., & Sitch, S. (2003) Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, **286**, 249-270.
- Gleick, P.H. (2000) *The World's water 2000-2001 The Biennial Report on Freshwater Resources* Island Press, Wasington, D.C. & Covelo, California.
- Gonzalo-Duque, E. (1998) *Manual de Geología para Ingenieros* UN de C., Colombia, Manizales.
- Gregory, K.J. & Walling, D.E. (1973) *Drainage Basin Form and Process, a geomorphological approach* Edward Arnold, Australia.
- Harrold, L., Schwab, G.O., & Bondurant, B.L. (1982) *Agricultural and Forest Hydrology* Agricultural Engineering Department, Ohio State University, USA.
- Heissenbuttel, A. (1996) Ecosystem Management-Principles for Practical Application. *Ecological Applications*, **6**, 730-732.
- Hershey, A.E., Gettel, G.M., McDonald, M.E., Miller, M.C., Mooers, H., O'Brien, W.J., Pastor, J., Richards, C., & Schuldt, J.A. (1999) A geomorphic-trophic model for landscape control of arctic food webs. *BioScience*, 887-897.
- Hewlett, J.D. (1982) *Principles of Forest Hydrology* The University of Georgia Press, Athens, Georgia EU.
- Holling, C.S. (1978) *Adaptive Enviromental Assesment and Management* Wiley, London, UK.
- Hutjes, R.W.A., Kabat, P., Running, S.W., Shuttleworth, W.J., Field, C., Bass, B., da Silva Dias, M.F., Avissar, R., Becker, A., Claussen, M., Dolman, A.J., Feddes, A., Fosberg, M., Fukushima, Y., Gash, J.H.C., Guenni, L., Hoff, H., Jarvis, P.G., Kayane, I., Krenke, A.N., Changming, L., Meybeck, M., Nobre, C.A., Oyebande, L., Pitman, A., Pielke, R.S., Raupach, M., Saugier, B., Schulze, E.D., Sellers, P.J., Tenhunen, J.D., Valentini, R., Victoria, R.L., & Vörösmarty, C.J. (1998) Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle. *Journal of Hydrology*, **212**, 1-21.
- Hynes, H.B.N. (1975) The stream and its valley. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung fur Theoretische und Angerwandte Limnologie*, 1-15.
- INE, SEMARNAT, & Instituto de Geografía, U. (2000) Uso de Suelo y Vegetación 2000 escala 1:250, 0000, Cobertura preparada para el análisis de cambio de uso del suelo. INE, México D.F.
- INEGI (2000). XII Censo Nacional de Población y Vivienda. INEGI, México.
- Jakson, R.B., Carpenter, S., Dahm, C.N., McKnight, D., Naiman, R.J., Postel, S.L., & Runnung, S.W. (2001) Water in a changing world. *Ecological Applications*, **11**, 1027-1045.

- Janauer, G.A. (2000) Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological Engineering*, **16**, 9-16.
- Jáuregui, O.E. (1973) Hacia una planeación de la Red Meteorológica Nacional. *Revista Recursos Hidráulicos*, **II**, 98-112.
- Kates, R.W., Clarck, W.C., Corell, R., Hall, M.J., Jaeger, C.C., Lowe, I., McCarthy, J.J., Schellnhuber, H.J., Bolin, B., Dickson, N.M., Faucheux, S., Gallopin, G.C., Grüber, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N.S., Kasperson, R.E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore III, B., O'Riordan, T., & Svedin, U. (2001) Environment and development. *SCIENCE*, **292**, 641-642.
- King, H.W., Wisler, C.O., & Woodburn, J.G. (1991) *Hidráulica Trillas*.
- King, J., Brown, C., & Sabet, H. (2003) A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Research and Applications*, 619-639.
- Kling, G.W., Kipphut, G.W., Miller, M.C., & O'Brien, W.J. (2000) Integration of lakes and streams in a landscape perspective: The importance of material processing on spatial patterns and temporal coherence. *Freshwater Biology*, 477-497.
- Likens, G. (1989) *Long-Term Studies in Ecology. Approaches and Alternatives* Springer-Verlag, New York.
- Ludwig, J.A., Tongway, D.J., Freudenberg, D., Noble, J., & Hodgkinson (1997) *Landscape ecology, function and management: principles from Australia's Rangelands* CSIRO Publications, Collingwood, Australia.
- Maass, J.M. (1995). Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. In *Seasonally dry tropical forests* (eds S.H. Bullock, H. Mooney & E. Medina), pp. 337-360. Cambridge University Press, Cambridge.
- Maass, J.M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G.C., Mooney, H., Ehrlich, P.R., M., Q., Miranda, A., Jaramillo, V., García-Oliva, F., Martínez-Yrizar, A., Cotler, H., López-Blanco, J., Pérez-Jiménez, A., Búrquez, A., Tinoco, C., Ceballos, G., Barraza, L., Ayala, R., & Sarukhán, J. (2005) Ecosystem Services of Tropical Dry Forests: Insights from Long-Term Ecological and Social Research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, **10**.
- Maass, J.M., Jaramillo, V., Martínez-Yrizar, A., & García-Oliva, F. (enviado). El Manejo de Ecosistemas: una estrategia integral de manejo de recursos naturales. In *Estudios y perspectivas en el manejo de recursos naturales y conservación de sistemas vegetales* (ed M. Martínez-Ramos). CONABIO.
- Maass, J.M., Jaramillo, V., Martínez-Yrizar, A., García Oliva, F., Pérez-Jiménez, A., & Sarukhán, J. (2002). Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. In *Historia Natural de Chamela* (eds F.A. Noguera, J.H. Vega Rivera, A.N. García Aldrete & M. Quesada Avedaño), pp. 525-542. Instituto de Biología, UNAM, México.
- Maass, J.M., Swank, W.T., Araiza, S., López-Guerrero, A., & Sarukhán, J. (en creación) Hydrological characterization of dry tropical forested watersheds in west Mexico.
- Magnuson, J. (1990) Long-Term Ecological Research and the Invisible Present. *BioScience*, **40**, 495-501.
- Mekonnen, S. (2005) Assessment of Catchment Water Balance Using GIS and Remote Sensing; Roxo, Portugal, ITC, Enschede, Netherlands.
- Meléndez, J.F. (1999) Hidrogeografía de la cuenca del río Cuitzmala, Jalisco. Maestría, UNAM, México D.F.
- Meyer, J.L. & Swart, R.J. (1996) Ecosystem Management Challenges Ecologists. *Ecological Applications*, **6**, 738-740.
- Middleton, N.J. & Thomas, D.S.G. (1997) World atlas of desertification. *Ecological Modelling*, **71**, 107-130.

- Ornstein, R. & Ehrlich, P.R. (1989) *New world new mind: moving toward conscious evolution* Doubleday, NY.
- Pielke, R.S., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A.J., Zeng, X., & Denning, A.S. (1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology*, **4**, 461-475.
- Postel, S.L., Daily, G.C., & Ehrlich, P.R. (1996) Human appropriation of renewable fresh water. *SCIENCE*, **217**, 785-788.
- Pringle, C.M. (2001) Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, **11**, 981-998.
- Puigdefabregas, J., Sole, A., Gutiérrez, L., del Barrio, G., & Boer, M. (1999) Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science*, **48**, 39-70.
- Ramanathan, V. (1988) The greenhouse theory of climate change: a test by an inadvertent global experiment. *SCIENCE*, **240**, 293-299.
- Ramanathan, V. & Srinivas, V.V. (2005) Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 57-79.
- Reichman, O.J. & Pulliman, R.H. (1996) The scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, **6**, 694-696.
- Rodríguez-Iturbide, I. (2000) Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, **36**, 3-9.
- Rodríguez-Iturbide, I. (2003) Hydrologic dynamics and ecosystem structure. *Water Science & Technology*, **47**, 17-24.
- Saldaña, A. (2005) Mapa de poblaciones y carreteras basado en CETENAL 1975. En proceso, México.
- Sartori, G. & Mazzoleni, G. (2003) *La Tierra explota. Superpoblación y desarrollo* Taurus, México.
- Sarukhán, J. & Maass, J.M. (1988). Evaluación del impacto que tienen diferentes grados de perturbación en la Estructura y Fisiología de un Ecosistema Tropical Estacional. Propuesta para CONACYT
Centro de Ecología, UNAM, D.F., México.
- Sarukhán, J. & Maass, J.M. (1990). Evaluación del impacto que tienen diferentes grados de perturbación en la Estructura y Fisiología de un Ecosistema Tropical Estacional. Propuesta para CONACYT
Centro de Ecología, UNAM, D.F., México.
- Schlesinger, W.H. (1997) *Biogeochemistry: an analysis of global change* Academic Press, San Diego, California, USA.
- Schmitt, R.W. (1995) The ocean component of the global water cycle. *Reviews of Geophysics*, 1395-1409.
- Schwartz, H.E., Emel, J., Dickens, W.J., Rogers, P., & Thompson, J. (1990). Water quality and flows. In *The Earth as transformed by human action* (eds B.L. Turner II, W.C. Clark, R.W. Kates, J.F. Richards, J.T. Mathews & W.B. Meyer), pp. 253-270. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Shachak, M., Sachs, M., & Moshe, I. (1998) Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, **1**, 475-483.
- Soranno, P.A., Webster, K.E., Riera, J.L., Krast, T.K., Bason, J.S., Bukaveckas, P.A., Kling, G.W., White, D.S., Caine, N., Lathrop, R.C., & Leavitt, P.R. (1999) Spatial variation among lakes within landscapes: Ecological organization along lake chains. *Ecosystems*, 395-410.
- Stanford, J.A. & Poole, G.C. (1996) A protocol for ecosystem management. *Ecological Applications*, **6**, 741-744.

- Strahler, A. (1952) Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 923-37.
- Strahler, A. (1990) *Geografía física* Omega, Barcelona.
- Thornthwaite, C. & Mather, J. (1957) *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance* Centerton, N.J.: Laboratory of Climatology.
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, S.D., Oropeza-Mota, J.L., & Mejía-Saenz, E. (2004) Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, **22**, 437-444.
- Tortajada, C.H. (2005) *Hacia una gestión del agua en México: retos y alternativas* Grupo Editorial Miguel Ángel Porrúa, México.
- Valentin, C. & d'Herbes, M. (1999) Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena*, **37**, 231-256.
- Wallace, J.B. & Hutchens, J.J. (2000). Effects of invertebrates in lotic ecosystem process. In *Invertebrates as a webmasters in ecosystems* (eds D. Coleman & P.F. Hendrix). CABI, United Kingdom.
- Walters, C.J. (1986) *Adaptative management of renewable resources* McGraw-Hill, NY, USA.
- Ward, R. (1975) *Principles of Hydrology* McGraw-Hill Book Company, UK.
- Whiles, M.R. & Dodds, W.K. (2002) Relationships between stream size suspended particles and filter-feeding macroinvertebrates in a Great Plains drainage network. *Journal of Environmental Quality*, 1589-1600.
- Wilcox, B.P., Breshears, D.D., & Allen, C.D. (2003) Ecohydrology of a Resource-Conserving Semiarid Woodland: Effects of Scale and Disturbance. *Ecological Monographs*, **73**, 223-239.
- Zalewski, M. (2002) Ecohydrology-The use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. *Hydrological sciences*, **47**, 823-831.

**Anexo
Tablas 1**

14007	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	36	22	0	0	12	269	405	326	382	163	48	11	1675
Evapotr. Potencial	37	35	36	50	83	112	110	105	97	87	58	44	854
Evapotransp. Actual	37	33	28	33	51	112	110	105	97	87	57	41	791
Escorrentía TOTAL	19	10	5	2	1	4	149	185	235	155	78	39	883
Balance Hídrico	-19	-10	-5	-2	-1	3	145	36	50	-80	-78	-39	1

14042	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	20	3	5	0	5	77	136	165	202	75	42	23	754
Evapotr. Potencial	72	71	74	90	120	140	178	164	156	142	107	86	1399
Evapotransp. Actual	24	7	8	3	7	78	137	164	156	89	51	29	754
Escorrentía TOTAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Balance Hídrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

14079	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	26	6	0	4	3	129	276	297	263	97	42	56	1200
Evapotr. Potencial	67	76	86	99	103	142	138	131	122	113	92	80	1251
Evapotransp. Actual	34	17	9	10	7	129	138	131	122	102	56	62	819
Escorrentía TOTAL	10	5	2	1	1	0	0	63	159	80	40	20	381
Balance Hídrico	-10	-5	-2	-1	-1	0	0	63	96	-80	-40	-20	0

14085	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	30	5	6	2	7	121	205	229	280	98	29	28	1038
Evapotr. Potencial	67	73	88	114	151	161	149	143	128	122	102	76	1375
Evapotransp. Actual	39	17	16	11	12	122	149	143	128	110	58	42	846
Escorrentía TOTAL	6	3	1	1	0	0	0	0	96	48	24	12	191
Balance Hídrico	-6	-3	-1	-1	0	0	0	0	96	-48	-24	-12	1

14117	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	25	6	7	2	11	220	390	377	407	157	37	28	1667
Evapotr. Potencial	71	77	95	122	147	157	145	129	115	118	95	77	1348
Evapotransp. Actual	51	40	38	31	32	157	145	129	115	118	86	62	1006
Escorrentía TOTAL	16	8	4	2	1	1	41	145	218	129	64	32	662
Balance Hídrico	-16	-8	-4	-2	-1	-1	41	104	73	-90	-64	-32	-1

Chamela	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	41	2	1	1	10	102	129	145	217	80	19	14	763
Evapotr. Potencial	76	80	78	89	116	152	157	151	135	129	101	89	1352
Evapotransp. Actual	46	11	7	5	14	103	130	145	135	97	41	28	763
Escorrentía TOTAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Balance Hídrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Balances de las seis estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio de la cuenca del río Cuitzmalá.

2

Estaciones	14007	14042	14079	14085	14117	Chamela
UREh1	97	0	2	0	1	0
UREh2	15	0	35	0	50	0
UREh3	0	0	8	0	92	0
UREh4	98	0	2	0	0	0
UREh5	8	0	92	0	0	0
UREh6	0	0	66	0	34	0
UREh7	52	0	45	0	3	0
UREh8	0	0	70	0	30	0
UREh9	0	0	34	21	46	0
UREh10	12	0	82	0	5	0
UREh11	7	0	64	0	0	29
UREh12	0	58	17	9	0	15
UREh13	0	0	1	0	0	99
UREh14	0	12	0	0	0	88
UREh15	0	1	0	0	0	0

Porcentaje de superficie ocupada por estación meteorológica en cada una de las quince UREh.

UREh	Poblados #	Cobertura	Transformación %	Hidrología mm
1	4	agricultura , encino, pino -encino, mesófilo montaña, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	44	P1665/AEt794/Ro871
2	12	agricultura , encino, pino -encino, mesófilo montaña, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	53	P1504/AEt909/Ro595
3	5	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	68	P1631/AEt991/Ro640
4	0	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	30	P1667/AEt792/Ro875
5	8	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y sbcaducifolia	52	P1239/AEt816/Ro422
6	2	agr, encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	47	P1358/AEt882/Ro476
7	10	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	49	P1461/AEt810/Ro651
8	4	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	23	P1342/AEt876/Ro467
9	5	agricultura , encino, pradera, selva caducifolia y sbcaducifolia	60	P1379/AEt909/Ro469
10	3	encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	27	P1284/AEt825/Ro458
11	6	encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	37	P1109/AEt801/Ro308
12	8	agricultura, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	16	P859/AEt775/Ro84
13	1	encino, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	45	P768/AEt763/Ro5
14	0	pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	2	P762/AEt762/Ro0
15	3	agriculutra, pradera, selva caducifolia y subcaducifolia	46	P754/AEt754/Ro0

Atributos de las UREh. Drenaje indica el orden de corriente del cauce principal y # de cauces tributarios. La pendiente es el intervalo dominante. La hidrología es precipitación (P), evapotranspiración actual (AEt) y escorrentía (Ro) en mm.

UREh	Drenaje	Pendiente	Litología	Área (km ²)
1	8 tributarios a cauce ord 3	17º-35º	aluvial, caliza, granito y volcanoclástico	84
2	11 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	aluvial, caliza, granito y volcanoclástico	105
3	7 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	aluvial, caliza y granito	80
4	2 tributarios a cauce ord 3	17º-35º	aluvial y granito	30
5	9 tributarios a cauce ord 4	0º-35º	aluvial, caliza y granito	98
6	5 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	aluvial, caliza y granito	34
7	10 tributarios a cauce ord 3	17º-35º	aluvial, caliza y granito	88
8	11 tributarios a cauce ord 5	0º-35º	caliza, granito y volcanoclástico	63
9	6 tributarios a cauce ord 3	17º-35º	aluvial, caliza y granito	59
10	4 tributarios a cauce ord 5	17º-35º	aluvial, granito y volcanoclástico	65
11	9 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	granito, riolita y volcanoclástico	77
12	21 tributarios a cauce ord 5	0º-35º	aluvial y granito	137
13	3 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	granito y riolita	41
14	3 tributarios a cauce ord 3	0º-35º	aluvial y granito	33
15	10 tributarios a cauce ord 5	0º-35º	aluvial, arenisca y conglomerado, granito, litoral, volcanoclástico	93

Atributos de las UREh. Drenaje indica el orden de corriente del cauce principal y # de cauces tributarios. La pendiente es el intervalo dominante. La hidrología es precipitación (P), evapotranspiración actual (AET) y escorrentía (Ro) en mm.

MES	UREh10			UREh11			UREh12			UREh13			UREh14			UREh15		
	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro
E	27	35	12	31	38	8	25	31	2	41	46	0	39	44	0	20	24	0
F	8	20	6	6	16	4	4	11	1	3	11	0	3	11	0	3	8	0
M	1	13	3	1	10	2	4	9	1	1	7	0	2	7	0	5	8	0
A	3	14	1	3	11	1	1	5	0	1	5	0	1	5	0	0	3	0
M	5	14	1	6	13	1	6	9	0	10	14	0	10	13	0	5	7	0
J	151	129	1	131	121	1	94	95	0	103	104	0	99	100	0	77	78	0
J	298	135	21	243	133	11	166	137	0	131	130	0	130	130	0	136	137	0
A	305	128	82	256	133	54	191	154	11	147	145	1	148	148	0	165	164	0
S	285	119	172	258	124	119	222	145	37	217	135	2	215	138	0	202	156	0
O	108	101	92	97	100	62	82	94	18	80	97	1	80	96	0	75	89	0
N	43	58	46	36	52	31	37	51	9	20	41	1	22	42	0	42	51	0
D	49	59	23	41	50	16	28	36	5	15	28	0	15	28	0	23	29	0
	1284	825	458	1109	801	308	859	775	84	768	764	5	762	762	0	754	754	0

4

Valores de precipitación (P), evapotranspiración actual (Aet) y escorrentía (Ro) a nivel mensual por UREh en mm.

Valores de precipitación (P), evapotranspiración actual (Aet) y escorrentía (Ro) a nivel mensual por UREh en mm.

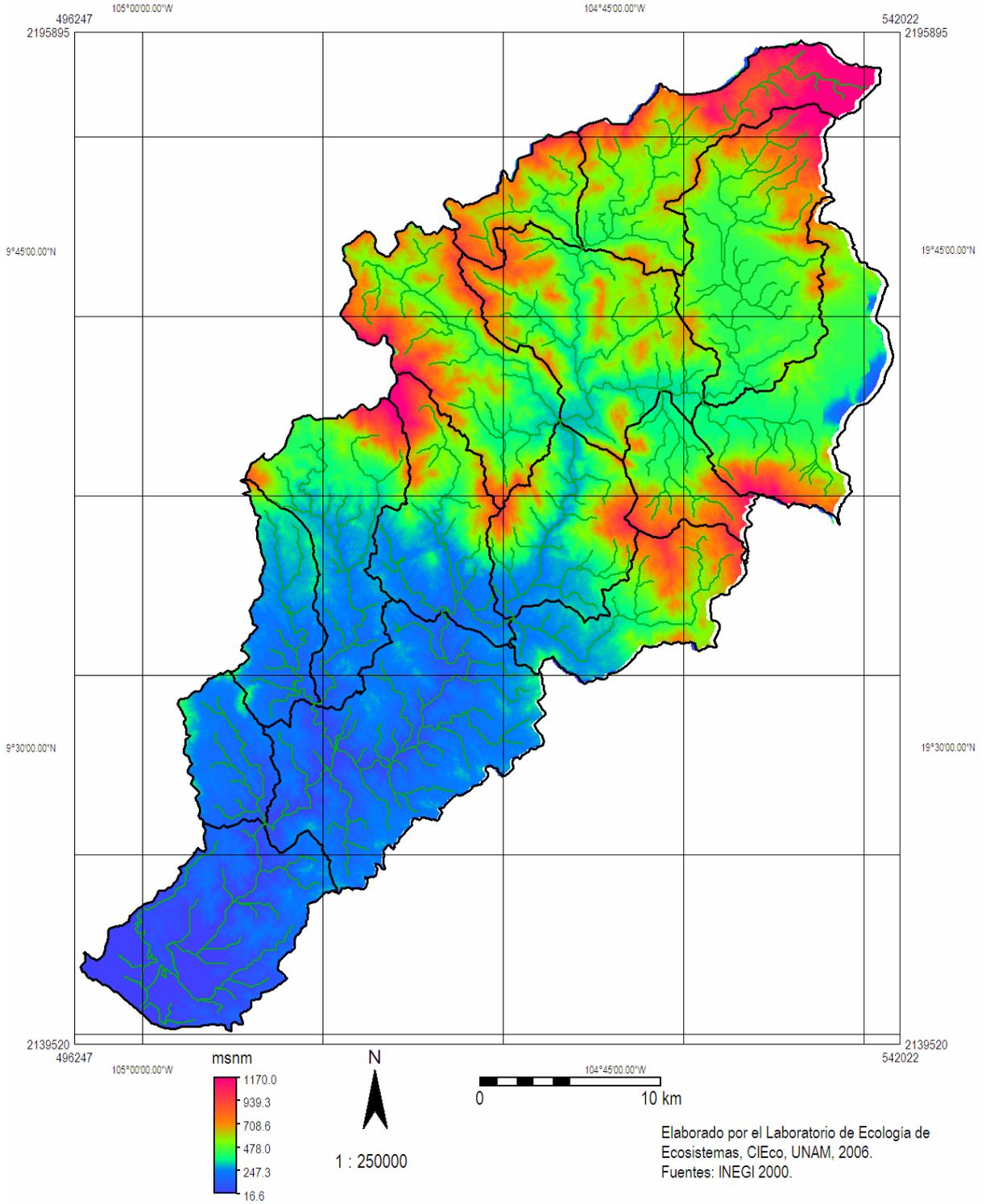
M E S	UREh4			UREh5			UREh6			UREh7			UREh8			UREh9		
	P	Aet	Ro															
E	36	37	19	27	34	11	25	40	12	31	36	15	25	39	12	26	43	12
F	22	32	10	8	18	5	6	25	6	15	26	8	6	24	6	6	27	6
M	0	28	5	0	11	3	3	19	3	0	20	4	2	18	3	4	24	3
A	0	33	2	4	12	1	3	18	2	2	23	2	3	17	2	3	20	2
M	12	50	1	4	11	1	6	16	1	8	31	1	6	15	1	8	20	1
J	267	112	4	140	128	1	160	139	0	204	121	2	157	138	0	169	141	0
J	401	111	147	287	136	12	315	140	14	346	124	79	311	140	13	313	144	19
A	326	105	183	300	129	73	324	130	91	315	117	129	322	130	88	320	132	87
S	380	98	234	272	120	165	312	120	180	329	109	200	307	120	177	332	120	173
O	162	88	154	102	101	86	117	108	96	133	95	120	115	107	95	125	111	95
N	48	57	77	43	56	43	40	66	48	45	58	60	40	65	47	37	70	48
D	12	41	39	52	60	22	47	62	24	32	51	30	48	62	24	38	58	24
	1667	792	875	1239	816	422	1358	882	476	1461	810	651	1342	876	467	1379	909	469

Valores de precipitación (P), evapotranspiración actual (Aet) y escorrentía (Ro) a nivel mensual por UREh en mm.

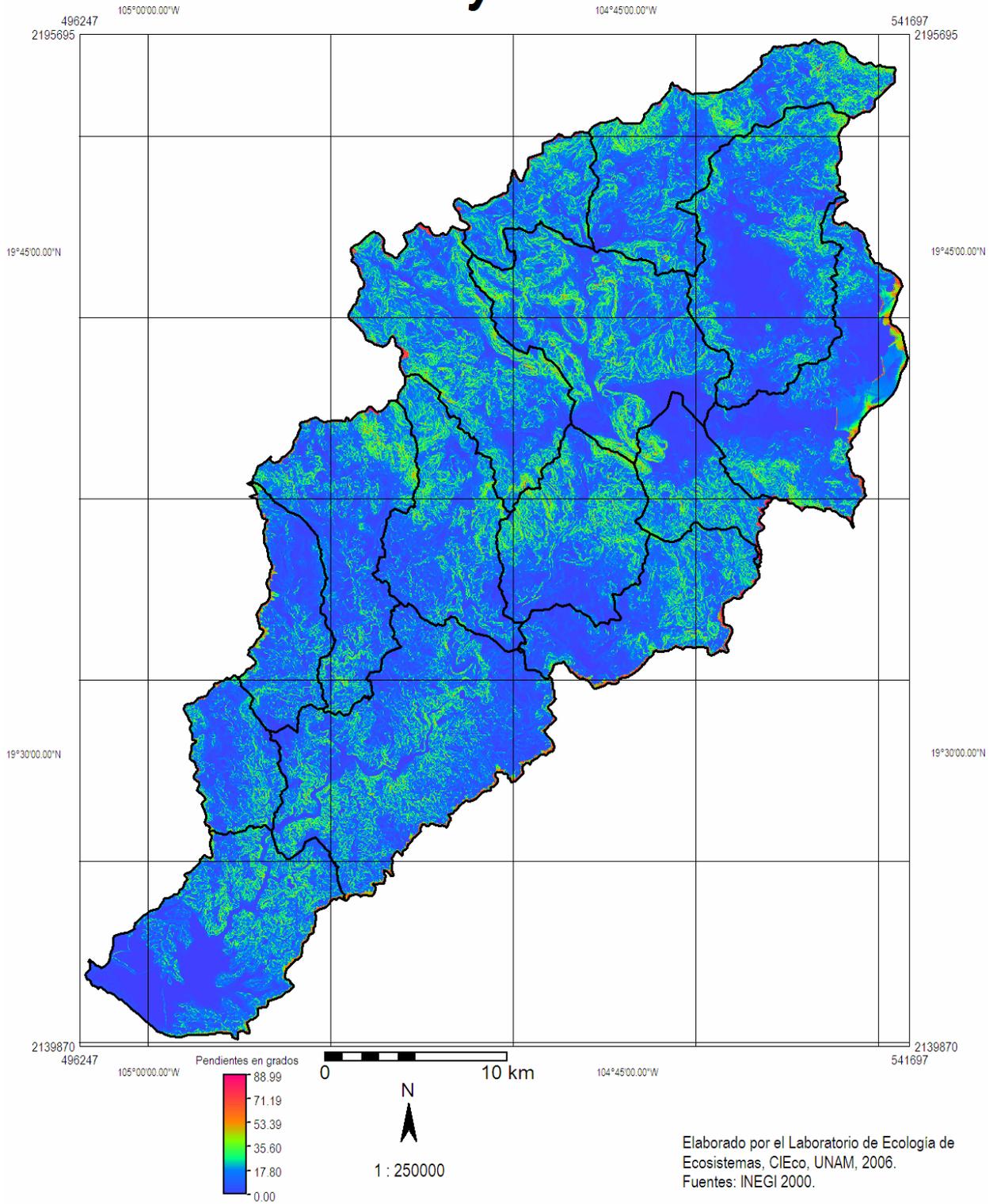
MES	UREh1			UREh2			UREh3		
	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro	P	Aet	Ro
E	36	37	19	27	43	14.	25	50	16
F	22	32	10	9	31	7	6	38	8
M	0	28	5	4	27	4	6	36	4
A	0	33	2	2	24	2	2	30	2
M	12	50	1	9	26	1	11	31	1
J	266	113	4	195	141	1	213	155	1
J	402	111	146	352	138	43	381	145	38
A	326	106	183	342	126	122	371	129	139
S	380	98	233	353	115	200	396	116	214
O	162	88	154	137	108	115	153	117	125
N	48	58	77	40	71	58	37	84	63
D	12	42	38	36	59	29	31	62	3
Total	1665	794	871	1504	909	595	1631	991	640

Anexo
Mapas
1

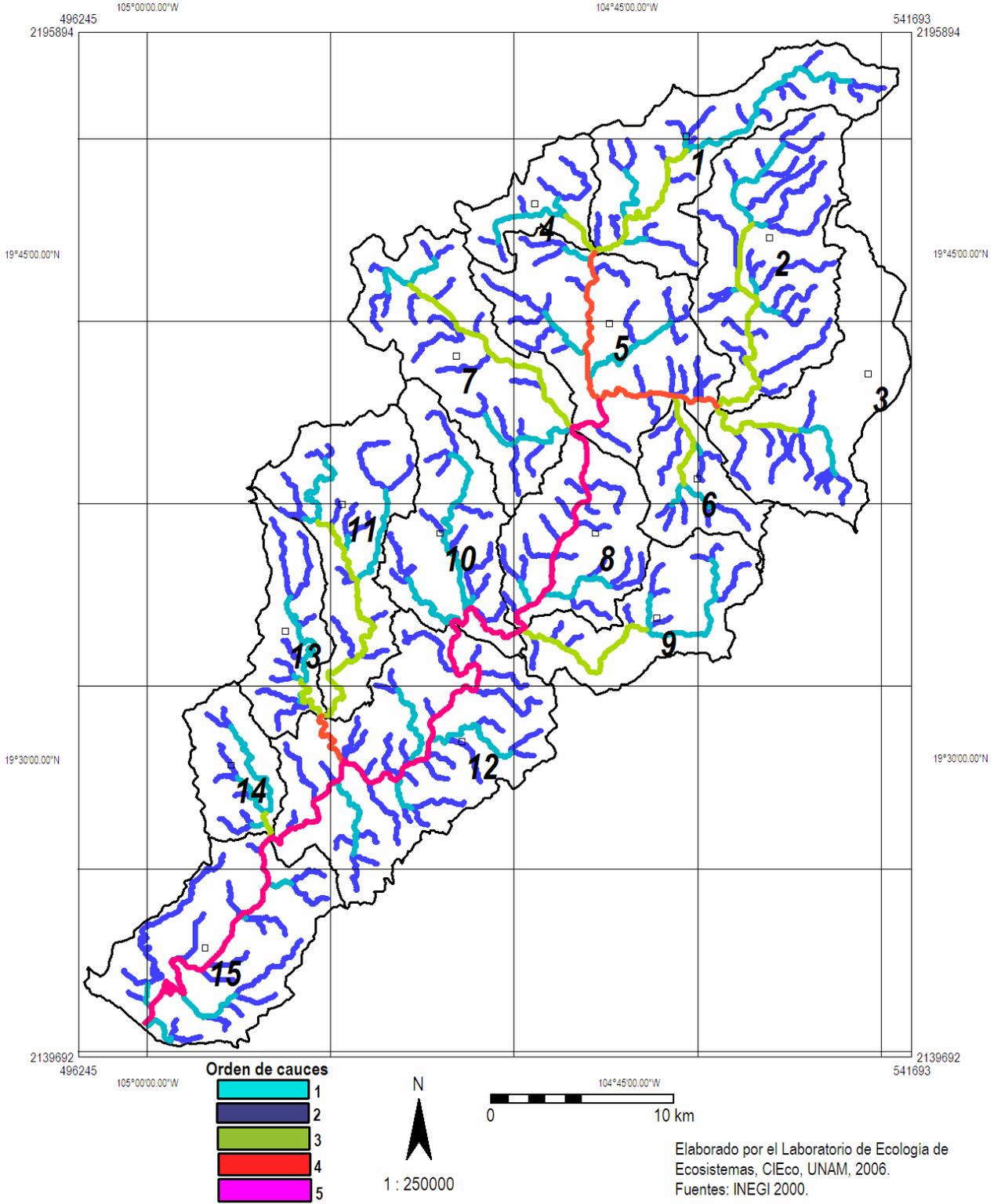
Modelo Digital de Elevación, red hidrológica y subcuencas del río Cuitzmala



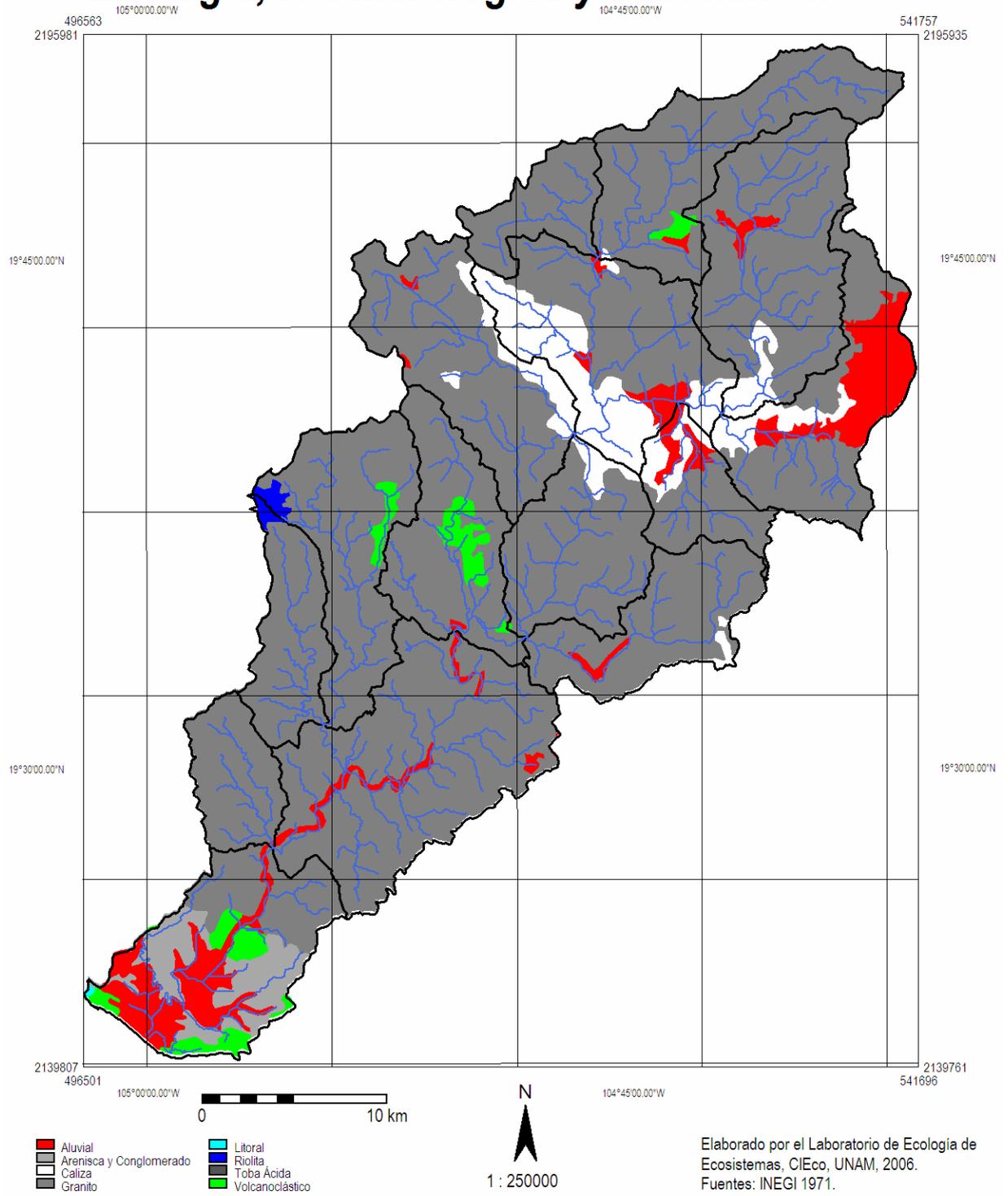
Pendientes y subcuencas



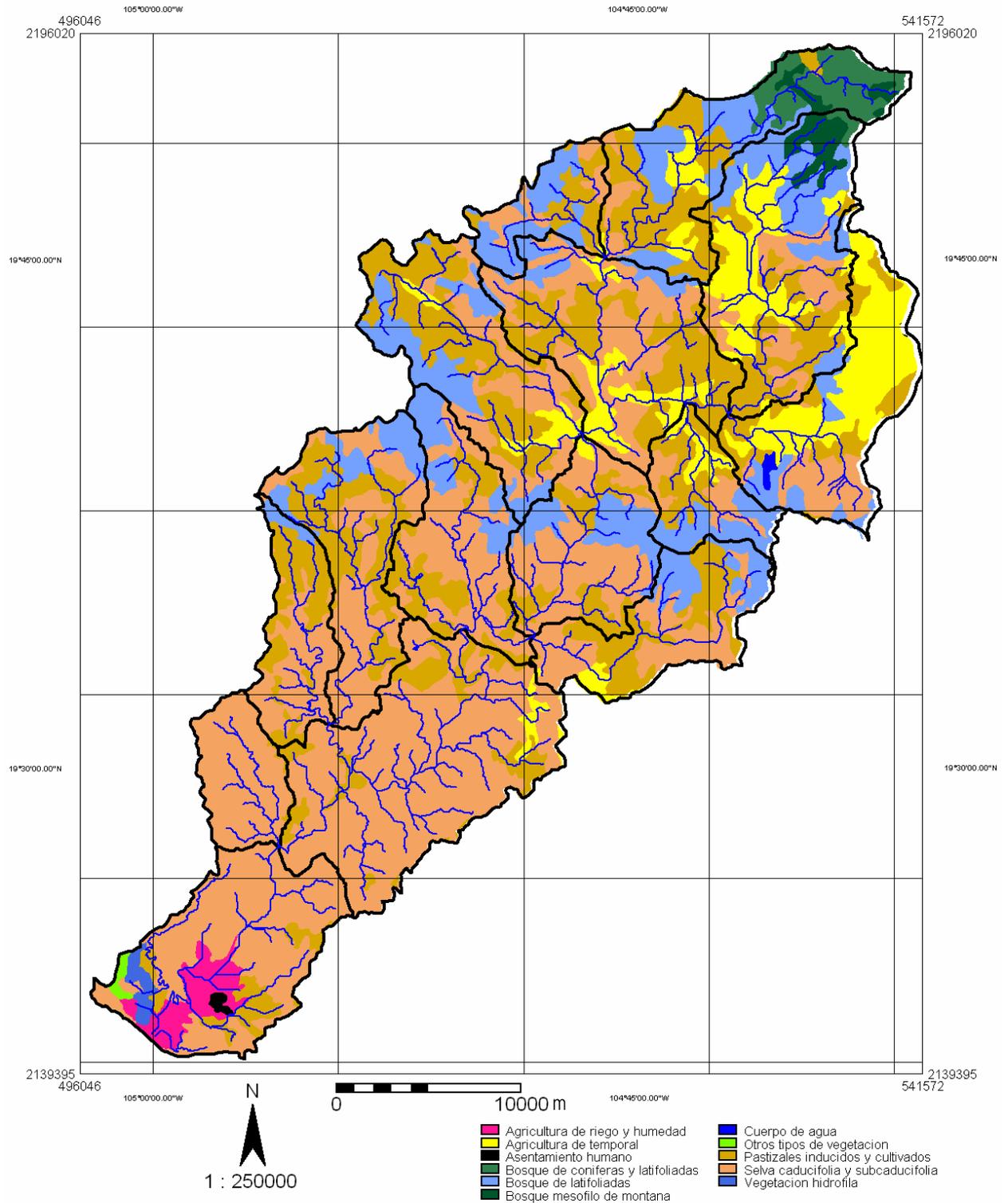
Orden de Cauces y Subcuencas del río Cuitzmala



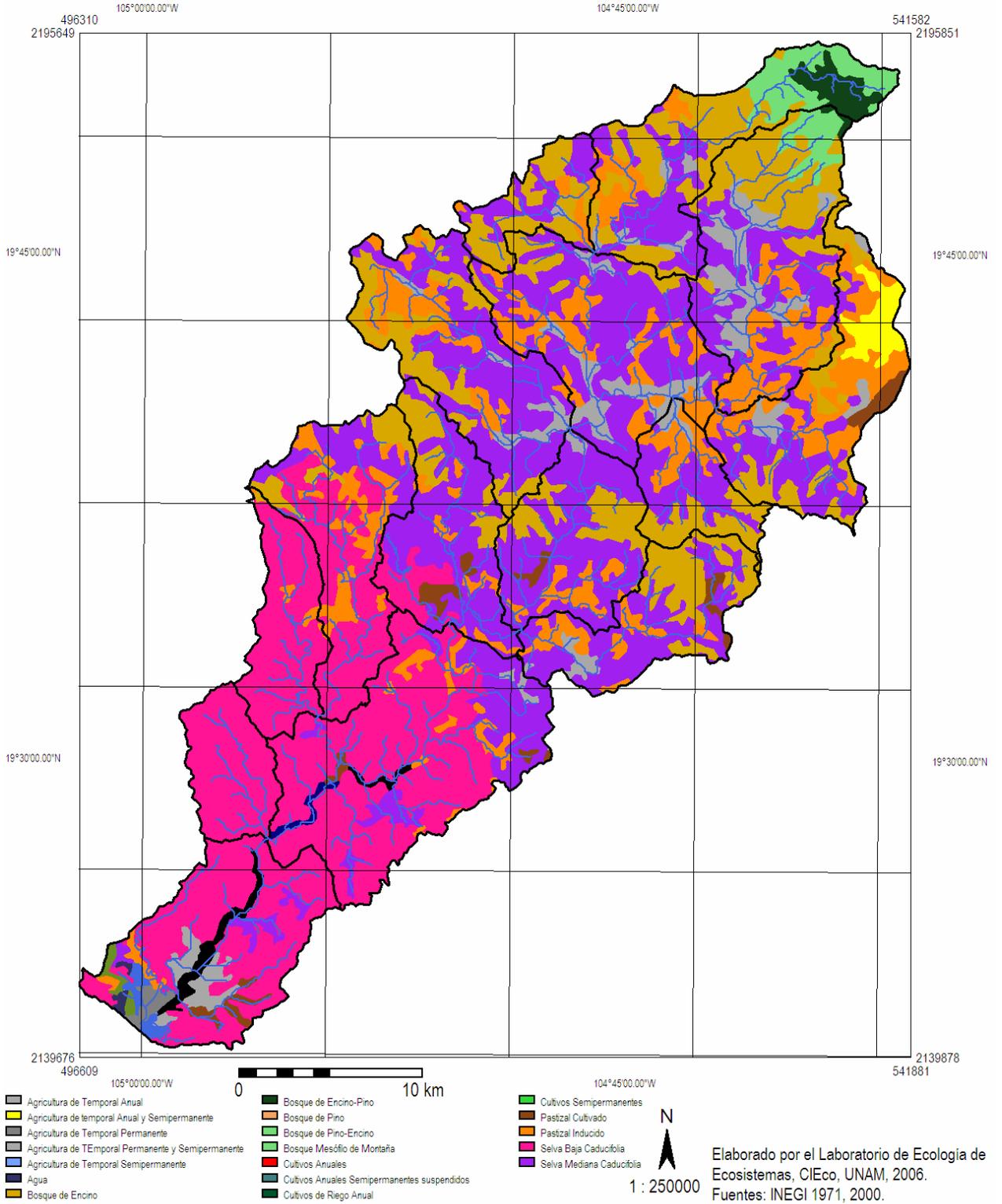
Litología, red hidrológica y subcuencas



Inventario Nacional Forestal, red hidrológica y subcuencas



Uso del Suelo, red hidrológica y subcuencas del río Cuitzmala



7 Poblados en la cuenca del río Cuitzmala (Saldaña, 2005)

