



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

FACULTAD DE FILOSOFÍA

FACULTAD DE CIENCIAS POLÍTICAS Y SOCIALES

FACULTAD DE QUÍMICA

MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS

“MODELACIÓN HIDROLÓGICA COMO BASE PARA EL PAGO POR
SERVICIOS AMBIENTALES EN LA MICROCUENCA DEL
RÍO MAGDALENA, DISTRITO FEDERAL”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS

Presenta

TERESA MARGARITA GONZÁLEZ MARTÍNEZ
Expediente 158986

Dirigido por

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza

Codirigido por: Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar

C.U. Santiago de Querétaro, Qro. Noviembre de 2008



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ciencias Naturales
Facultad de Ingeniería
Facultad de Química
Facultad de Psicología
Facultad de Filosofía
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

**"MODELACIÓN HIDROLÓGICA COMO BASE PARA EL PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO MAGDALENA, DISTRITO FEDERAL"**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Teresa Margarita González Martínez

Dirigido por:

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza

Codirigido por:

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar

SINODALES

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza
Presidente



Firma

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar
Secretario



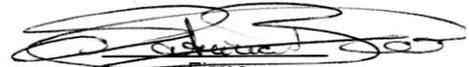
Firma

Mtra. Patricia Roitman Genoud
Vocal



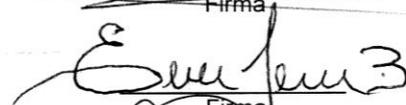
Firma

Dra. Patricia Balvanera Levy
Suplente



Firma

Mtra. Elibeth Torres Benites
Suplente



Firma



Biol. Jaime Ángeles Ángeles
Director de la Facultad de Ciencias Naturales



Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2008
México

RESUMEN

La microcuenca del río Magdalena se ubica al surponiente del Distrito Federal, México. Es considerada una importante zona de recarga del acuífero y la principal fuente local de abastecimiento superficial. Con el objetivo de encontrar estrategias que permitan su conservación, se analizaron algunos componentes hidrológicos y sociales clave para sustentar la generación de un esquema de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH). Se cuantificó la oferta de agua generada por flujo base, mediante técnicas de separación de hidrogramas; se describió el uso y aprovechamiento actual del agua dentro y fuera de la microcuenca; se identificó y caracterizó a los actores sociales que pueden actuar como oferentes, usuarios y mediadores dentro de un esquema de PSAH; y se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para analizar la respuesta hidrológica, identificar áreas de importancia por sus características hidrológicas y estudiar dos escenarios de uso de suelo y vegetación con diferente grado de conservación. De 1999 al 2001, se registró un caudal promedio, de 0.70 m³/s, del cual el 80.65% correspondió a escurrimiento base y el 19.35% se generó a partir de escurrimiento directo. El agua de la microcuenca es utilizada para distintas actividades productivas dentro de su territorio, sin embargo, su principal aprovechamiento es externo, beneficiando a una población aproximada de 118,237 habitantes. El principal grupo social que puede actuar como oferente para el PSAH es la Comunidad Agraria de La Magdalena Atlitic. Los Beneficiarios están representados por los usuarios del agua fuera de la microcuenca. Dentro de los Mediadores se identificaron algunas instituciones de apoyo como la CONAFOR, CORENA, SACM, entre otras. Mediante el análisis de la respuesta hidrológica se determinó que el principal componente que contribuye a la generación del servicio ambiental de provisión de agua es el escurrimiento subsuperficial. Las zonas más importantes de la microcuenca por sus propiedades de infiltración y escurrimiento se encuentran en la parte media y alta de la microcuenca. El empleo de escenarios permitió comprobar que la vegetación tiene un efecto importante sobre los procesos hidrológicos que permiten la generación del servicio ambiental de provisión de agua.

Palabras clave: Pago por servicios ambientales, provisión de agua, evaluación ecológica, conservación.

SUMMARY

The micro basin from the Magdalena River is located southwest from the Federal District, Mexico. It is considered an important recharge source for the aquifer and the main local source of flowing surface water. With the objective to find strategies to allow its conservation, some key hydrological and social components were analyzed in order to support and design a hydrological environmental payments scheme (PSAH). The water supply was quantified via a water flow base, through techniques where the hydrograms were divided; the actual water use and utilization were described from within and outer use from the micro basin; the social actors were identified and characterized as suppliers, users and intermediaries within the PSAH scheme; and a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to analyze the hydrological response and to identify core areas based on their hydrological characteristics in order to study two scenarios for soil and vegetation use with different conservation degrees. Between 1999 to 2000 an average flow of $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ was registered, where 80.65% corresponded to the wring of surface water base and 19.35% was directly created. Water from micro basin is currently utilized for various productive activities within its territory, however, the main utilization is outer are benefiting a population of approximately 118,237 inhabitants. The main social group which would act as a PSAH supplier is the Magdalena Atlitic Agrarian Community. The Beneficiaries are represented by water outer users of the micro basin. The Mediators were identified from various supporting institutions such as CONAFOR, CORENA, SACM amongst others. Through the hydrological response analysis we determine that the main component which contributes to the environmental service of provision of water was the wring of surface water. The fundamental region of the micro basin is determined due to its infiltration and wring properties which are in the mid and upper region of the micro basin. The use of scenarios allowed us to prove that vegetation has an important impact on the hydrological process which supports the generation of the environmental service of water provision.

Key words: Payment for environmental services, water provision, ecological evaluation, conservation.

DEDICATORIA

A mi esposo Juan Carlos:

Has sido el más grande apoyo en esta etapa de mi vida.
Gracias por darme cariño, aliento, confianza y fuerza,
por estar junto a mí todo el tiempo,
por reconocer y fomentar mi crecimiento profesional,
por construir conmigo un proyecto de vida.
Te amo con todo mi corazón.

A mi hijo Arturo:

Este logro en parte también es tuyo,
porque has tenido que convertirte en Cuencólogo honorario
y batallar a mi lado contra todas las desavenencias de la vida.
Quiero que sepas que agradezco mucho tu paciencia y apoyo.
Ten siempre presente que eres muy importante para mí.
Te quiero mucho.

Al resto de mi familia, que siempre me ha apoyado.
Especialmente a mi madre,
gracias por tu ejemplo y cariño,
gracias por tu largo camino de lucha.

AGRADECIMIENTOS

Hago un reconocimiento muy especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado, sin el cual no habría podido concluir mis estudios de maestría y mi proyecto de tesis.

Agradezco enormemente a mis sinodales por su asesoría durante la realización de este trabajo de Tesis. Realmente todos tuvieron contribuciones muy importantes sin las cuales el resultado habría sido completamente diferente.

Dr. Enrique Cantoral Uriza, gracias por invitarme a colaborar en el Macroproyecto "Manejo de ecosistemas y desarrollo humano en la cuenca del río Magdalena, D.F." Gracias también por todo el tiempo dedicado y su gran paciencia.

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar, los consejos aportados cambiaron el rumbo de mi investigación, mejorando enormemente los alcances y el aprovechamiento de mis datos. Muchas gracias por su apoyo.

Mtra. Patricia Roitman Genoud, sin duda tener una visión interdisciplinaria e integral ha sido uno de los mayores retos a lo largo de esta maestría y especialmente durante la construcción de la Tesis. Sus contribuciones colaboraron enormemente a lograrlo.

Dra. Patricia Balvanera Levy, ha sido un honor contar con su participación, gran parte del conocimiento adquirido en el campo de los servicios ambientales se lo debo a usted.

Mtra. Elibeth Torres Benites, su ayuda llegó cuando más la necesitaba, mil gracias por compartir conmigo su experiencia y tenerme tanta paciencia.

Agradezco también a todas aquellas instituciones y organizaciones que brindaron información para la realización de este trabajo de Tesis: CONAGUA, SACM, CORENA, Comisión de Asuntos Agrarios del D.F., Asociación de comerciantes unidos de los Dínamos, Comunidad de La Magdalena Atlitic, Grupo Luis Cabrera, y muy especialmente al programa Universidad Nacional Autónoma de México, SDEI-PTID-02.

Finalmente quiero agradecer a todos los profesores y compañeros de la maestría en Gestión Integrada de Cuencas, compartir con ustedes esta experiencia fue muy gratificante, creo que juntos nos reinventamos y nos retroalimentamos. Me voy con una visión completamente diferente a la que tenía cuando ingresé, con muchas ganas de trabajar por mi país y con mucha esperanza.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| RESUMEN | I |
| SUMMARY | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| ÍNDICE | V |
| ÍNDICE DE CUADROS | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Estado del arte..... | 4 |
| 1.2. Justificación | 9 |
| 1.3. Objetivo general..... | 11 |
| 1.4. Objetivos particulares. | 11 |
| 2. MARCO TEORICO..... | 12 |
| 2.1. Gestión integral de los recursos hidrológicos a nivel de cuencas..... | 12 |
| 2.2. Servicios ambientales y provisión de agua. | 13 |
| 2.3. El pago de los servicios ambientales y la conservación de las cuencas..... | 16 |
| 2.4. Desarrollo histórico de los esquemas de PSA. | 17 |
| 2.4.1. El caso de México..... | 20 |
| 2.5. Evaluación ecológica del servicio ambiental de provisión de agua..... | 22 |
| 2.5.1. Ciclo hidrológico. | 23 |
| 2.5.2. Separación de escurrimiento base | 25 |
| 2.5.2.1. Métodos manuales. | 27 |
| 2.5.2.2. Métodos automatizados..... | 28 |
| 2.5.3. Modelación hidrológica. | 29 |
| 2.5.3.1. Descripción del modelo SWAT. | 30 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 35 |
| 3.1. Caracterización biofísica y socioeconómica del área de estudio. | 35 |
| 3.1.1. Ubicación..... | 35 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1.2. | Fisiografía y Topografía..... | 35 |
| 3.1.3. | Edafología. | 37 |
| 3.1.4. | Geología..... | 38 |
| 3.1.5. | Hidrología. | 41 |
| 3.1.6. | Clima. | 42 |
| 3.1.7. | Vegetación..... | 43 |
| 3.1.8. | Tenencia de la tierra. | 46 |
| 3.1.9. | Población y vivienda. | 47 |
| 3.1.10 | . Actividades productivas. | 48 |
| 3.2. | Procedimiento metodológico..... | 49 |
| 3.2.1. | Recopilación y preparación de información. | 49 |
| 3.2.2. | Cuantificación de la oferta de agua. | 50 |
| 3.2.3. | Descripción del uso y distribución actual del agua de la microcuenca..... | 52 |
| 3.2.4. | Identificación y caracterización de actores sociales. | 54 |
| 3.2.5. | Modelación hidrológica. | 56 |
| 4. | RESULTADOS..... | 59 |
| 4.1. | Cuantificación de la oferta de agua..... | 59 |
| 4.2. | Descripción del uso actual del agua de la microcuenca..... | 62 |
| 4.2.1. | Uso y aprovechamiento del agua al interior de la microcuenca..... | 62 |
| 4.2.2. | Uso y distribución externa del agua de la microcuenca..... | 65 |
| 4.3. | Identificación y caracterización de actores sociales..... | 68 |
| 4.3.1. | Oferentes..... | 68 |
| 4.3.2. | Beneficiarios..... | 70 |
| 4.3.3. | Mediadores. | 71 |
| 4.4. | Modelación hidrológica..... | 74 |
| 4.4.1. | Calibración y validación del modelo. | 74 |
| 4.4.2. | Descripción de los procesos hidrológicos de la microcuenca. | 77 |
| 4.4.2.1. | Precipitación. | 78 |
| 4.4.2.2. | Escurrimiento..... | 78 |
| 4.4.2.3. | Infiltración profunda..... | 82 |
| 4.4.2.4. | Evapotranspiración..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.3. Escenarios modelados. | 83 |
| 5. DISCUSIÓN | 87 |
| 5.1. El papel del escurrimiento base en la oferta de agua. | 87 |
| 5.2. Implicaciones del uso actual del agua en la microcuenca. | 90 |
| 5.3. El papel de los actores sociales en la gestión de un esquema de PSAH. | 93 |
| 5.3. La modelación hidrológica como base para el PSAH. | 96 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 101 |
| 7. RECOMENDACIONES | 104 |
| LITERATURA CITADA..... | 105 |
| ANEXOS | 120 |
| Anexo 1. Formato de entrevista..... | 120 |
| Anexo 2. Información de entrada para el modelo SWAT..... | 121 |
| Anexo 3. Principales características de la UE y URH. | 123 |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Definiciones para el término “Servicios Ambientales”. | 14 |
| 2 | Clasificación de los “Servicios Ambientales”. | 15 |
| 3 | Espacios internacionales que favorecieron el surgimiento de los esquemas de PSA. | 18 |
| 4 | Tipos de escurrimiento que alimentan a los ríos. | 26 |
| 5 | Métodos automatizados de separación de hidrogramas. | 29 |
| 6 | Modelos hidrológicos distribuidos. | 31 |
| 7 | Tipos de vegetación y uso de suelo dentro de la microcuenca; áreas de cobertura. | 45 |
| 8 | Estaciones pluviométricas seleccionadas y área de influencia según el método de Polígonos de Thiessen. | 52 |
| 9 | Fuentes de abastecimiento de las colonias que son beneficiadas por el servicio ambiental de provisión de agua de la microcuenca río Magdalena. | 66 |
| 10 | Núcleos agrarios cuyo territorio forma parte de la microcuenca del río Magdalena. | 69 |
| 11 | Comparación estadística de los escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual. | 75 |
| 12 | Comparación estadística de los escurrimientos medidos y simulados a nivel diario. | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Ciclo hidrológico. | 24 |
| 2 | Tipos de escurrimiento. | 25 |
| 3 | Diagrama del escurrimiento. | 27 |
| 4 | Métodos manuales de separación de escurrimiento base. | 28 |
| 5 | Secuencia general de los procesos utilizados por SWAT para modelar el ciclo hidrológico. | 34 |
| 6 | Ubicación geográfica de la microcuenca del río Magdalena; delegaciones y municipios que la integran. | 35 |
| 7 | Principales elevaciones de la microcuenca río Magdalena y rangos de elevación. | 36 |
| 8 | Edafología. Unidades y asociaciones de suelo presentes en la microcuenca. | 38 |
| 9 | Tipos de roca y origen de formación. | 39 |
| 10 | Formaciones geológicas que influyeron sobre la microcuenca río Magdalena, fracturas geológicas. | 40 |
| 11 | Corrientes perennes e intermitentes dentro de la microcuenca. | 42 |
| 12 | Tipos de vegetación y usos de suelo presentes en la microcuenca. | 44 |
| 13 | Núcleos agrarios cuyos territorios se ubican parcialmente dentro de la microcuenca. | 46 |
| 14 | Localidades y área urbana dentro de la microcuenca. | 47 |
| 15 | Esquema metodológico. | 49 |

| | | |
|----|--|----|
| 16 | Delimitación de los polígonos de Thiessen y estaciones pluviométricas con influencia dentro de la microcuenca. | 51 |
| 17 | Precipitación mensual acumulada para los años 1999 a 2001. | 59 |
| 18 | Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 1999. | 60 |
| 19 | Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 2000. | 61 |
| 20 | Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 2001. | 61 |
| 21 | Colonias beneficiadas con el servicio ambiental de provisión de agua. | 65 |
| 22 | Fuentes superficiales de agua en la microcuenca del río Magdalena. | 67 |
| 23 | Comparación de la lámina mensual acumulada de escurrimiento en la etapa de calibración mensual. | 74 |
| 24 | Comparación de la lámina mensual acumulada de escurrimiento en la etapa de validación mensual. | 75 |
| 25 | Hidrograma observado y simulado, para la etapa de calibración diaria. | 77 |
| 26 | Comparación del escurrimiento base, en la etapa de calibración. | 77 |
| 27 | Distribución espacial de la precipitación. | 78 |
| 28 | Contribución de cada tipo de escurrimiento al escurrimiento total, por UE. | 79 |
| 29 | Escurrimiento total de agua en cada UE. | 79 |
| 30 | Identificación de las UE con mayor escurrimiento subterráneo. | 80 |
| 31 | Identificación de las UE con mayor escurrimiento subsuperficial. | 81 |

| | | |
|----|--|----|
| 32 | Identificación de las UE con mayor escurrimiento directo | 81 |
| 33 | Infiltración profunda por UE. | 82 |
| 34 | Rangos de evapotranspiración actual dentro de las UE. | 83 |
| 35 | Escenario 1: con condición de conservación mejor que el estado actual. | 84 |
| 36 | Escenario 2: con condición de conservación menor respecto al actual. | 84 |
| 37 | Escurrimiento total de agua en los diferentes escenarios. | 85 |
| 38 | Escurrimiento directo generado en los distintos escenarios. | 85 |
| 39 | Escurrimiento base generado en los diferentes escenarios. | 86 |
| 40 | Infiltración profunda generada en los distintos escenarios. | 86 |

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores retos a los que nos enfrentamos actualmente es obtener agua de buena calidad con acceso suficiente para toda la población del planeta (UNESCO, 2003). La disponibilidad de este recurso está relacionada en primer lugar con la dotación natural, derivada de los fenómenos climáticos e hidrológicos propios de cada región. Sin embargo, también puede estar determinada por los patrones de crecimiento y distribución demográficos, los esquemas culturales de uso y el estado de conservación de las cuencas hidrológicas (Butze y Cárdenas, 2004).

Los problemas de escasez son especialmente graves en las cuencas con poblaciones urbanas y alto grado de transformación del medio natural. Ésta condición está rebasando los límites de la naturaleza para preservar las funciones hidrológicas y bioquímicas de los ecosistemas que permiten contar con fuentes de abastecimiento de agua. Asimismo, el explosivo crecimiento demográfico y el cambio en los estándares de vida, asociados a una mayor demanda de bienes y servicios, agudizan la explotación de este recurso, poniendo en peligro las posibilidades de mantener el abastecimiento actual y asegurarlo para las futuras generaciones (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

Esta situación es determinante para el proceso de desarrollo de una región ya que el uso de volúmenes de agua mayores a la capacidad de reposición natural, puede generar sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento. Lo anterior pone en entredicho la capacidad de crecimiento a mediano o largo plazo, sobre todo en aquellas regiones donde la principal fuente de abastecimiento son las aguas subterráneas (Castelán, 2000).

Tal es el caso de la Ciudad de México, en donde incluso sumando las aportaciones de cuencas externas a las fuentes de abastecimiento locales, es cada vez más difícil satisfacer las necesidades de los distintos usuarios. La mayor parte del agua que abastece a la ciudad proviene del acuífero de la cuenca del Valle de México, lo que corresponde al 56% del caudal ofertado. El resto es extraído de cuencas alejadas, como es el caso del Sistema Cutzamala y del

acuífero de la cuenca alta del río Lerma, con 30% y 12% de las aportaciones, respectivamente; y finalmente, el 2% proviene de algunos manantiales internos y del río Magdalena (SACM, 2005).

En la actualidad, el caudal medio anual ofertado es de 32.86 m³/s, sin embargo, las necesidades de abastecimiento alcanzan los 34.62 m³/s en promedio. Si a esto le sumamos las pérdidas físicas que existen en el sistema se obtiene un déficit de agua del orden de 1.76 m³/s, lo que ocasiona que una parte de la población aún no cuente con el servicio de agua potable y que otra parte reciba menor cantidad de agua de la necesaria. El déficit de agua equivale a una población de 1.10 millones de personas con una dotación promedio de 141 l/hab/día y aumentará paulatinamente en el futuro próximo (*Op. cit.*).

La solución a esta crisis no puede limitarse a la explotación creciente de los acuíferos y a la importación de agua de cuencas cada vez más lejanas (Izazola, 2001). En general, la forma más efectiva para asegurar las fuentes de abastecimiento de agua potable a largo plazo, es proteger las zonas de captación de este recurso, especialmente aquellas que proveen a grandes centros urbanos (Dourojeanni *et al.*, 2002). Para ello, es necesario un proceso de gestión que promueva la realización de actividades de manejo y conservación, desde una perspectiva integradora de los procesos biofísicos y socioeconómicos que influyen en la disponibilidad del agua (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

En este sentido, la gestión integral del agua a nivel de cuenca nos plantea la posibilidad de analizar integralmente las problemáticas relacionadas con este recurso, ya que ocupa un espacio geográfico delimitado naturalmente, en el que interactúan, en un proceso permanente y dinámico, el agua con los sistemas físico, biótico y social (Dourojeanni *et al.*, 2002). Sin embargo, la protección de las cuencas hidrográficas requiere de la participación real y plena de los actores sociales involucrados, por lo cual, es necesario buscar mecanismos que aseguren un manejo adecuado de los recursos naturales, mediante la acción colectiva (Jiménez, 2004).

Una estrategia que está surgiendo cada vez con mayor auge para promover actividades de conservación a nivel de cuenca es el **Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos** (PSAH) (Aburto y Ogier, 2005). El principio

para el PSAH consiste en que los usuarios del agua compensan a los dueños o a los usuarios de tierras de aptitud forestal situadas en la parte alta de las cuencas, para la ejecución de actividades de conservación o reforestación de sus terrenos. Esto con la finalidad de asegurar el mantenimiento o promover el mejoramiento de la cantidad o calidad del servicio ambiental de provisión de agua, mismo que es aprovechado en las partes medias y bajas de las cuencas, o incluso fuera de ellas. De esta manera, se trata de conciliar los intereses e incentivos de los proveedores del servicio, con los de la sociedad que se beneficia de este último (Fregoso, 2006; Alvarado, 2004).

No obstante, muchos proyectos de pago por servicios ambientales hidrológicos carecen de estudios científicos profundos a nivel local, que analicen el funcionamiento hidrológico de las cuencas. La ausencia de bases científicas sólidas sobre la relación efectiva entre uso del suelo y sus efectos sobre el servicio ambiental de provisión de agua, limita seriamente la viabilidad futura de estos mercados al no poder garantizar a largo plazo su generación. Por ello, una comprensión y cuantificación efectiva del servicio ambiental es una etapa básica en el diseño de medidas efectivas y eficientes de manejo de cuencas que contribuyan a la conservación (Porras, 2003).

A partir de este enfoque, es primordial poner especial atención en las cuencas con mayor potencial de captación y recarga de acuíferos, a fin de valorar la capacidad de sus ecosistemas para generar el servicio ambiental de provisión de agua y sentar las bases para el establecimiento de mecanismos de PSAH. Esta situación es particularmente importante para el caso de la Ciudad de México, destacando la microcuenca del río Magdalena, ubicada en la sierra de las Cruces al surponiente del Distrito Federal, ya que cuenta con el único río permanente en la ciudad que mantiene la calidad de sus aguas en buen estado y es una de las pocas fuentes locales de abastecimiento superficial de agua potable (SACM, 2000).

1.1. Estado del arte.

Las experiencias para la valoración del servicio ambiental de provisión de agua difieren dependiendo de los objetivos planteados y la metodología empleada. Sin embargo, las propuestas más recientes, ponen de manifiesto la necesidad de una correcta evaluación de la capacidad de los ecosistemas para proveer de este servicio (Robertson y Wunder, 2005).

En este sentido, una de las herramientas que ha probado ser muy útil es el empleo de modelos hidrológicos ya que permiten representar la relación agua-suelo-vegetación dentro de las cuencas hidrográficas y de esta manera, estimar el efecto de dichos componentes en el servicio ambiental de provisión de agua. Uno de los modelos hidrológicos más utilizado para este fin es el **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool). Existen múltiples experiencias en las que este modelo ha permitido entre otras cosas, ubicar las Unidades de Respuesta Hidrológica con mayor potencial para ofertar servicios ambientales hidrológicos y cuantificar los servicios que éstas generan. También ha permitido generar arreglos crediticios que fomentan nuevas prácticas agrícolas en las zonas identificadas como prioritarias para la disminución de externalidades ambientales negativas. Así como la evaluación de los impactos que generan los cambios de uso de suelo en los servicios ambientales a corto, mediano y largo plazo (CONDESAN, 2006; Martínez de Anguita *et al.*, 2006; Estrada y Quintero, 2004).

Destacan los trabajos realizados por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN), el cual ha logrado implementar una metodología para establecer esquemas de PSAH dentro de 100 cuencas (2,500 Unidades de Respuesta Hidrológica) en 4 países de la zona andina, mediante una metodología en la que el empleo de la interfase de Arcview 3.1 para SWAT resultó fundamental para las etapas de planeación y monitoreo de sus proyectos (CONDESAN, 2006; Estrada y Quintero, 2004).

Estas experiencias se están comenzando a replicar en otros países, como es el caso de la ciudad de Siguatepeque y su territorio rural, en el centro de Honduras, en donde se pretende integrar los servicios ambientales a la formulación de planes de desarrollo rural, a la planificación territorial del espacio rural y al abastecimiento de agua potable a ciudades, todo ello partiendo de la

información obtenida mediante una metodología muy similar a la utilizada por el CONDESAN (Martínez de Anguita *et al.*, 2006).

En México hay poca información disponible en relación a la evaluación ecológica del servicio ambiental de provisión de agua, pero lo que hay muestra una relación positiva. El principal objetivo de los estudios realizados hasta el momento es generar información para sustentar esquemas de PSAH o para evaluar la importancia de las zonas en donde ya existen programas de PSAH (Muñoz *et al.*, 2006).

La base para la evaluación de un servicio ambiental de este tipo, está relacionada con el estudio de los procesos del ciclo hidrológico en su conjunto, enfatizando las relaciones entre los usos de suelo, la vegetación y la respuesta hidrológica de las cuencas. Para ello ha sido usual el empleo de modelos hidrológicos y el análisis del paisaje, utilizando herramientas de **Sistemas de Información Geográfica** (SIG) (Abad, 2006; Pérez *et al.*, 2006; García *et al.*, 2004).

Tal es el caso de la modelación hidrológica realizada por Abad (2006), empleando el modelo SWAT en las cuencas El Chuveje y Arroyo Real en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, mediante la cual se logró la identificación de las áreas más importantes para su manejo y conservación, en términos de la respuesta hidrológica y por ende su capacidad para ofertar servicios ambientales hidrológicos, así como el planteamiento de escenarios de manejo y conservación. Los resultados se pretenden utilizar para valorar económicamente los servicios ambientales hidrológicos en la zona.

Otro ejemplo es el estudio realizado en la cuenca del río Gavilanes (Coatepec, Veracruz), en el que se identificaron los paisajes hidrológicos que, por sus características naturales y de presión por uso circundante, presentan mayor potencial para ser beneficiados con el pago por servicios ambientales. Los criterios utilizados fueron, por un lado, los elementos del balance hidrológico y por otro, el riesgo de deforestación al cual están sometidos los paisajes de la cuenca. Se emplearon modelos matemáticos y geográficos mediante un SIG (García *et al.*, 2004; García, 2002).

Asimismo, Pérez *et al.* (2006) realizaron un estudio piloto en Coatepec Veracruz, el cual se encuentra enmarcado dentro del “Programa Nacional de Pago por Servicios Ambientales Hídricos”, con el objetivo de generar una metodología accesible a nivel nacional para la evaluación de los servicios ambientales hidrológicos. Con base en un modelo conceptual se construyó un modelo de simulación utilizando el programa Setella Research, versión 8.0 para Windows.

Algunos estudios se han enfocado a estudiar la importancia de elementos aislados del ciclo hidrológico dentro de la oferta del servicio ambiental de provisión de agua, como son: los escurrimientos superficiales, la infiltración y la recarga de los acuíferos. Estos estudios también han resaltado la relación que existe entre los elementos estudiados y los diferentes usos de suelo y vegetación dentro de los ecosistemas (Equihua *et al.*, 2007; Carrillo *et al.*, 2006; Perevochtchikova *et al.*, 2005; Thomas, 2002).

Thomas (2002), analizó los factores que inciden sobre las dinámicas hidráulicas, incluyendo cantidad y calidad del agua superficial y subterránea en los bosques de la Sierra Gorda de Querétaro. A partir de los resultados obtenidos, se planteó una propuesta para la toma de decisiones en materia de conservación y uso sustentable de los recursos naturales, a través de un esquema de pago de servicios ambientales.

Igualmente importante es el estudio realizado en la parte alta de la cuenca del río La Antigua, ubicada en la vertiente oriental del sistema montañoso Cofre de Perote-Pico de Orizaba (Veracruz). El objetivo fue caracterizar y cuantificar los componentes que controlan los procesos eco-hidrológicos en el bosque mesófilo de montaña maduro y secundario, y en un cafetal bajo sombra, con el propósito de proveer información científica necesaria para la evaluación y futuro desarrollo de un programa de PSAH. La información que sirvió de base para el estudio consistió en variables climáticas, interceptación horizontal y vertical de la lluvia, transpiración y caudal (Equihua *et al.*, 2007).

Perevochtchikova *et al.* (2005), estudiaron 20 ejidos de un total de 271 predios inscritos en el 2003 en el “Programa Nacional de Pago por Servicios Ambientales Hídricos”, con el objetivo de identificar el comportamiento del flujo de agua subterránea y superficial, su situación geográfica y definir algunos

indicadores de impacto al recurso hídrico. El trabajo mostró que este programa de PSAH cubre en algunos casos sólo un 5% del área de interés hidrológico para la recarga; esto es muy importante ya que muestra que el territorio real y sobre el cual no existe control ó seguimiento, es de mayor extensión y mantiene un uso de suelo que en algunos casos incluye hasta la tala del bosque con permiso oficial.

Otro estudio con este enfoque fue realizado por Carrillo *et al.* (2006) en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, Estado de México, para establecer la viabilidad del PSAH en esa región, bajo la perspectiva del modelo de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea.

Los estudios realizados hasta el momento, en relación con la valoración ecológica del servicio ambiental de provisión de agua en México, están sentando las bases que permitirán sustentar la implementación de esquemas PSAH. Asimismo, proporcionan valiosa información para entender los procesos y las interrelaciones que favorecen la generación de los servicios ambientales, lo cual es de vital importancia para una correcta toma de decisiones en el campo de la conservación. Sin embargo, los trabajos realizados abarcan solo una pequeña parte del territorio nacional, por lo que es importante generar nuevos estudios que complementen la información ya existente. Si bien toda la información generada resulta adecuada para contribuir al conocimiento general, los análisis parciales son insuficientes cuando se pretende planificar y manejar un área específica (Carrillo *et al.*, 2006)

En lo que respecta a la zona de estudio (microcuenca del río Magdalena), se han realizado algunos estudios relacionados con los recursos hidrológicos, los cuales manifiestan la importancia de conservar esa zona captadora de agua. Tal es el caso del “Diagnóstico geológico y geohidrológico preliminar de la microcuenca del río Magdalena” y el “Estudio para la recarga del acuífero en el suelo de conservación del Distrito Federal”, los cuales fueron elaborados por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2002 y 2000 respectivamente). En ellos se manifiesta que por las características de vegetación y geología que presenta el área en que se encuentra la microcuenca, el régimen hidrológico juega un importante papel en los procesos de recarga del acuífero y,

de esa manera, se asegura parcialmente el funcionamiento del ciclo del agua al nivel local en la zona.

Jujnovsky en el 2006 realizó una revisión de los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua que pueden ser ofertados por la microcuenca del río Magdalena, menciona al bosque de *Abies religiosa*, ubicado entre los 3,000 y 3,500 msnm, como la zona de mayor captación de agua y expresa la necesidad de realizar un manejo adecuado de los recursos hídricos para incrementar el aprovechamiento de agua potable, toda vez que en la época de lluvias existe un caudal muy importante que no es aprovechado por la planta potabilizadora ubicada en la parte baja del río y que es contaminada por desagües irregulares al entrar en la zona urbana.

Finalmente, cabe señalar que el presente estudio es una contribución que se desarrolló en colaboración con el Macroproyecto “Manejo de ecosistemas y desarrollo humano en la cuenca del río Magdalena, D.F.”, de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo objetivo principal es generar un diagnóstico ambiental del Suelo de Conservación Ecológica de la Magdalena Contreras, que permita obtener información sobre el estado actual de la flora, fauna y vegetación de los ecosistemas forestales, como base para proponer acciones en el contexto del manejo de ecosistemas para la conservación y restauración del área.

1.2. Justificación

Actualmente la Ciudad de México presenta problemas crecientes para satisfacer las demandas de agua de la población y de las actividades económicas y productivas que alberga. Esto ha traído como consecuencia que un gran número de personas padezcan de desabasto y tandeo del agua. Aunado a esto, la sobreexplotación del acuífero está llegando a niveles alarmantes debido a que se extrae más agua de la que se recarga mediante la infiltración, provocando hundimientos en toda la ciudad y poniendo en peligro el abastecimiento para las generaciones actuales y futuras (SACM, 2005).

Dado que se requiere garantizar un abasto permanente de agua, mediante alternativas que contemplen el correcto manejo de los recursos naturales, es importante voltear la vista a los procesos hidrológicos de las cuencas, poniendo énfasis en la conservación de las zonas de captación. En este sentido, la zona de estudio, por su extensión llamada microcuenca del río Magdalena, está considerada como una importante zona de recarga del acuífero y como la principal fuente local de abastecimiento superficial del Distrito Federal (SMA, 2002; 2000).

Sin embargo, el área enfrenta un sostenido proceso de degradación de sus recursos naturales debido a las actividades antropogénicas, entre las principales amenazas se encuentra el crecimiento de la mancha urbana, el establecimiento de asentamientos irregulares en la zona forestal y la venta de terrenos (Fernández *et al.*, 2002), provocando que se pierda parte de los ecosistemas que facilitan los procesos hidrológicos y por lo tanto que se altere la capacidad de proveer servicios ambientales. Otro problema que enfrenta el área es la degradación de sus ecosistemas forestales a consecuencia de las actividades productivas como el pastoreo, la agricultura y el turismo descontrolado, además de los efectos de incendios y las plagas forestales (SMA, 2004, Jujnovsky, 2003). La problemática antes mencionada evidencia la necesidad de establecer estrategias que permitan revertir el estado de deterioro de los recursos naturales en la microcuenca, con la finalidad de mantener la capacidad de sus ecosistemas para proporcionar el servicio ambiental de provisión de agua.

En este sentido, los sistemas de PSAH constituyen una herramienta novedosa que pretende invertir una situación de desabastecimiento y degradación

ambiental mediante la lógica de mercado y transformar zonas de alto valor y riesgo ambiental, a causa de altas presiones demográficas, en áreas en las que se logre un desarrollo sostenible (Martínez de Anguita *et al.*, 2006). Para poder llegar a establecer un mecanismo de PSAH, es necesario en primera instancia contar con información que permita comprender el funcionamiento del servicio ambiental.

Por ello, el presente estudio plantea la evaluación ecológica del servicio ambiental de provisión de agua, a través del análisis del escurrimiento base y la modelación hidrológica, como un antecedente que permita generar parte de la información básica necesaria para fundamentar correctamente un esquema de PSAH desde el punto de vista hidrológico. Adicionalmente, se generará información referente al aprovechamiento del agua de la microcuenca y de los actores sociales, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de información necesaria que permita establecer un sistema de PSAH.

1.3. Objetivo general

Analizar los componentes hidrológicos y sociales claves, para sustentar un esquema de pago por el servicio ambiental de provisión de agua en la microcuenca del río Magdalena, Ciudad de México.

1.4. Objetivos particulares.

- Cuantificar la oferta de agua que se genera por escurrimiento base.
- Describir el uso y aprovechamiento actual del agua dentro y fuera de la microcuenca.
- Identificar y caracterizar a los actores sociales que pueden actuar como oferentes, usuarios, mediadores y reguladores dentro de un esquema de PSAH.
- Aplicar el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para analizar la respuesta hidrológica de la microcuenca.

2. MARCO TEORICO

2.1. Gestión integral de los recursos hidrológicos a nivel de cuencas.

La problemática actual de abastecimiento, calidad y distribución del agua está relacionada con muy diversos ámbitos, como son el social, el ambiental y el político. Por ello, es necesario buscar mecanismos de gestión que permitan un aprovechamiento sustentable de este recurso, desde una perspectiva integradora (GWP, 2000). Este enfoque ha sido recogido dentro de la **Gestión Integral de los Recursos Hidrológicos** (GIRH), la cual es definida como: “Proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (SEMARNAT, 2004a).

La unidad geográfica ampliamente aceptada en el mundo para la GIRH es la cuenca hidrográfica (Dourojeanni *et al.*, 2002), aunque no es el único ámbito dentro del cual se pueden dirigir y coordinar acciones de gestión de los recursos hídricos (CEPAL, 1994). Sin embargo, una comprensión básica de la interrelación fundamental entre sociedades humanas y procesos biofísicos en el contexto de los paisajes de cuenca hidrográfica, facilita el análisis de la extrema complejidad del papel multifuncional del agua en los ecosistemas. También permite vincular en un mismo marco conceptual los procesos biofísicos y humanos relacionados con la GIRH (Toledo, 2006). Por estas cualidades de unidad hidrológica y de medio integrador de los procesos naturales y antrópicos, la cuenca puede llegar a ser también una unidad política, administrativa, de gestión ambiental o de manejo de los diversos recursos naturales que alberga (Llerena, 2004).

La gestión integral de cuencas puede llevarse a cabo a diversas escalas espaciales, sin embargo, la posibilidad de manejar de manera integral una cuenca está muy relacionada con su complejidad. Las experiencias que hay en el tema, indican que en la mayoría de los casos es preferible iniciar el manejo de cuencas en unidades territoriales pequeñas como las microcuencas, sin perder de vista el entorno más amplio que es la cuenca (Jiménez, 2004). Hasta la fecha, la gestión

integral de cuencas ha florecido en unidades territoriales relativamente reducidas, que por lo general corresponden a subcuencas (FAO, 2007).

En México, el manejo de cuencas fue institucionalizado durante la década de los cincuenta, mediante la creación de Comisiones de cuencas hidrográficas. Actualmente la **Comisión Nacional del Agua** (CONAGUA) mantiene un sistema participativo de gestión del agua en el ámbito de cuencas que cubre todo el territorio nacional. Sin embargo, sus alcances sólo han tenido impacto en el manejo sectorial del agua dejando de lado aspectos más avanzados de la GIRH como la conservación de ecosistemas. Otras instituciones gubernamentales y no gubernamentales se encuentran trabajando en nuestro país a nivel de microcuencas con distintos objetivos y procedimientos, en general están dispersas en el país sin articularse a un plan de desarrollo regional. Algunas de ellas son: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Ecología (INE), Fundación Manantial y Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), esta última tiene un plan a nivel nacional para el desarrollo rural sustentable de las microcuencas del país (Carabias *et al.*, 2005; Chávez y Martínez, 2000).

2.2. Servicios ambientales y provisión de agua.

Independientemente de la escala espacial a la que se lleve a cabo la GIRH, se requiere estudiar las interrelaciones entre los componentes y procesos de las cuencas. Ya que de su interpretación y especialmente de su comprensión, socialización y consenso, es que pueden surgir políticas públicas coherentes que articulen los diferentes intereses y los orienten hacia objetivos comunes que permitan una gestión integral del agua (Chávez, 2004).

Las cuencas, desde el punto de vista ambiental, están constituidas por cuatro dimensiones básicas: longitudinal, lateral, vertical y temporal, cada una de las cuales está integrada por componentes altamente interconectados y acoplados que son el producto de procesos físicos, químicos y biológicos que operan a través de un canal principal y su red de drenaje, los cuales definen los procesos y patrones de sus paisajes hidrológicos. El sistema fluvial y su red de drenaje están estrechamente ligados a la estructura de la cuenca y a la dinámica de los ecosistemas que la integran (Toledo, 2006). Si bien la cuenca y el ecosistema son

categorías y escalas teóricamente distintas, en el mundo real, una GIRH ambiental, social y económicamente eficiente debe realizarse integrando ambas aproximaciones, haciendo necesario que en cualquier política relativa al agua se incorpore una visión integral y sistémica, en la que se valoren correctamente los beneficios que los ecosistemas nos prestan (Guerrero, 2007; Kosten y Guerrero, 2005).

Estos procesos y características de los ecosistemas, que son una fuente de beneficios tangibles e intangibles, a los cuales la gente puede acceder y que son útiles a la sociedad humana, se definen como Servicios Ambientales. Existen múltiples definiciones para este término, algunas se muestran en el cuadro 1, sin embargo en todas ellas, el ecosistema es entendido como un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales, microorganismos y el medio ambiente inorgánico que interactúan como una unidad funcional e integral (Guerrero *et al.*, 2006; MA, 2005).

Cuadro 1. Definiciones para el término “Servicios Ambientales”

| AUTOR (AÑO) | DEFINICIÓN |
|-----------------------|--|
| Daily (1997) | “Los servicios ambientales son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los conforman sostienen y nutren a la vida humana” |
| SEMARNAT (2004b) | “Son los procesos y las funciones de los ecosistemas que, además de influir directamente en el mantenimiento de la vida, generan beneficios y bienestar para las personas y las comunidades” |
| MA (2005) | “Todos los beneficios que los humanos obtienen de los ecosistemas” |
| Boyd y Banzhaf (2007) | “Componente de la naturaleza que es directamente consumido, disfrutado, o que conduce a aumentar el bienestar humano” |

Es necesario aclarar que, aunque la mayoría de las definiciones existentes han sido concebidas desde una perspectiva vinculada al desarrollo humano, las

personas y sus actividades también son parte integral de los ecosistemas, por lo que la sostenibilidad en la generación de los servicios ambientales no solo depende de factores físicos y biológicos, también de factores antrópicos (Andrade y Navarrete, 2004).

Para facilitar su estudio, los servicios ambientales fueron clasificados por la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio” (2005), en cuatro grandes grupos, basándose principalmente en las funciones que realizan los ecosistemas y en la manera en que éstas benefician al ser humano (Cuadro 2)

Cuadro 2. Clasificación de los “Servicios Ambientales” (MA, 2005).

| TIPO DE SERVICIO | DESCRIPCIÓN |
|-------------------------|--|
| Servicios de base | Necesarios para la producción de los demás servicios de los ecosistemas; formación del suelo, ciclos biogeoquímicos, producción de materias primas, etc. |
| Servicios de regulación | Reguladores de la calidad del aire, del clima, de la calidad del agua, de la erosión, de enfermedades, de plagas, de la polinización, de riesgos naturales, etc. |
| Servicios culturales | Valores espirituales, valores estéticos, recreación y ecoturismo, etc. |
| Servicios de provisión | Alimento, fibras, combustibles, aire, agua, etc. |

La capacidad de los ecosistemas para abastecer de agua en cantidad y calidad suficiente para las necesidades humanas y el mantenimiento de las funciones propias del ecosistema forma parte de los servicios ambientales de provisión (MA, 2005). Para su estudio, se ha retomado el enfoque de cuencas como la perspectiva de análisis que permite circunscribir la oferta natural del servicio a una unidad geográfica funcional, ya que resulta del comportamiento del ciclo hidrológico dentro de las cuencas, como producto de la capacidad de sus ecosistemas para captar agua y así mantener la oferta hídrica disponible para el bienestar de la sociedad (Fregoso, 2006; Toledo, 2006). El reto es por tanto,

mantener este servicio ambiental mediante la conservación de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, buscando un balance entre las variables sociales, económicas y ambientales dentro de las cuencas (Smith y Maltby, 2003).

2.3. El pago de los servicios ambientales y la conservación de las cuencas.

Cuando empleamos un servicio ambiental, generalmente se pierde de vista el verdadero costo social y ambiental de su uso, dejando de lado el mantenimiento y la conservación de los recursos naturales y procesos que hacen posible tales servicios ambientales (Espinoza *et al.*, 1999).

Una herramienta que pretende cubrir este vacío son los **Pagos por Servicios Ambientales** (PSA), que están definidos como: transacciones voluntarias mediante las cuales un servicio ambiental bien definido (o un uso de la tierra que promueva la provisión de ese servicio) es comprado (por un consumidor o beneficiario) a un proveedor (oferente) si y solo si el proveedor asegura la provisión continua del servicio (Wunder *et al.*, 2007).

De esta manera, el PSA es una solución relativamente novedosa que puede revertir una situación de desabastecimiento y degradación ambiental mediante la lógica de mercado y transformar zonas de alto valor ambiental en áreas con un desarrollo sostenible (Machín, 2008). Por ello, se plantea el PSAH como una herramienta que permita contribuir a la conservación de las cuencas.

El objetivo que persigue el PSAH, es generar incentivos para quienes manejan la tierra, que les motive a considerar la conservación de los ecosistemas entre los usos rentables del suelo. Y que de esta manera, se puedan modificar o cambiar las actividades productivas que generan algún deterioro en las cuencas y realizar actividades de protección, conservación y mantenimiento, para que se mantenga o mejore la provisión de los servicios ambientales (Machín, 2008; Pagiola *et al.*, 2006).

El proceso de diseñar y poner en práctica un sistema de PSAH requiere que se aborden varios temas distintos, pero relacionados entre sí, algunos pasos claves se centran en los siguientes puntos (Martínez de Anguita *et al.*, 2006; Pagiola, 2006; Estrada y Quintero, 2004; Mayrand *et al.*, 2004):

- Identificar y cuantificar los servicios ambientales (evaluación ecológica).
- Identificación de actores (oferentes, beneficiarios y mediadores).
- Planificación física de las áreas de la cuenca con mayor importancia para el mantenimiento del recurso hídrico.
- Valoración económica del servicio ambiental.
- Negociación y establecimiento de mecanismos de pago e instituciones de apoyo.
- Realización de actividades piloto y de retroalimentación del diseño del mercado.

Las políticas ambientales tradicionales han tenido un enfoque coercitivo y subsidiario que no ha sido efectivo para controlar las externalidades negativas causadas por las prácticas agropecuarias insostenibles (Aburto y Ogier, 2005). El PSA parte de un enfoque opuesto, en el que los instrumentos utilizados son de tipo voluntario y se apoyan en el fortalecimiento del capital social y la responsabilidad compartida. Esto resulta clave para permitir la acción concertada de los distintos actores y para asegurar una gestión adecuada en función de metas comunes (Machín, 2008).

Además, los esquemas de PSA le apuestan a crear un sistema de incentivos para la conservación, más que a instrumentar un conjunto de obligaciones legales (*Op. cit.*). Cabe señalar que los PSA no son una panacea para la exclusión social y degradación ambiental en los espacios rurales, pero pueden catalizar esfuerzos que revaloricen integralmente el papel de las comunidades rurales en la gestión de los recursos naturales (Rosa *et al.*, 2004).

2.4. Desarrollo histórico de los esquemas de PSA.

Algunos servicios ambientales han sido estudiados durante varias décadas, sin embargo, el enfoque sistemático para asignarles un valor monetario, y el establecer una conexión entre las funciones del ecosistema y los servicios que nos prestan es más reciente (Campos *et al.*, 2006). Algunos eventos importantes para que se llegara a establecer a los PSA como una herramienta de conservación se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Espacios internacionales que favorecieron el surgimiento de los esquemas de PSA (Cuellar y López, 2002; Mejías y Segura, 2002; Martínez, 2000)

| Fecha | Reunión | Contribución |
|-------|---------------------------------------|--|
| 1987 | Informe Brundtland | Primer antecedente que incluyó a los servicios ambientales dentro de las políticas de conservación de los recursos naturales. |
| 1992 | Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro | Se reconoció formalmente al mercado de los bienes y servicios ambientales, como una estrategia para alcanzar objetivos de conservación y desarrollo sostenible. Agenda 21, estableció la obligación de las autoridades nacionales de fomentar la internalización de los costos ambientales y adoptar el principio “de quien contamine pague”. |
| 1997 | Conferencia de las Partes en Kyoto | Nacimiento explícito de la estrategia del PSA con el Fondo Prototipo de Carbono (venta de bonos de carbono). Aunque estas iniciativas no han prosperado en su totalidad. |

Las iniciativas internacionales, que comenzaron a impulsarse a mediados de los noventa, tomaban como actores sólo a los países o gobiernos nacionales. El argumento principal de esta estrategia era que los países pobres con alta biodiversidad no debían sacrificar ingresos potenciales en la conservación de un bien que es del mundo, por lo que los países ricos debían apoyarlos con transferencias monetarias; es decir, pagar por los servicios ambientales (SEMARNAT, 2004b).

A finales de la década de los noventa, el discurso comenzó a tomar en cuenta el papel de los propietarios de los recursos, ya que eran ellos quienes realmente podían custodiar y proveer los bienes y servicios ambientales. Fue así como las comunidades y hogares rurales se convirtieron en receptores de los apoyos provenientes de los beneficiarios de los servicios ambientales (*Op. cit.*). El

análisis del tema ha pasado de ser un esfuerzo por desarrollar métodos racionalistas de valoración, hacia la búsqueda de mecanismos prácticos, que permitan la internalización de los costos de conservación de los recursos naturales (Cuellar y López, 2002).

Actualmente, existen alrededor del mundo numerosas experiencias relacionadas con el PSA. En una revisión mundial realizada por Landell y Porras (2002) se conjuntó un total de 287 casos de diversos países de América, el Caribe, Europa, África, Asia y el Pacífico. Cabe resaltar que del total de experiencias analizadas, 80 corresponden a iniciativas relacionadas con la protección de cuencas hidrográficas y sus recursos hídricos, las cuales se han desarrollado mayoritariamente en el continente americano y el Caribe.

En América Latina, la creciente escasez de agua en muchas áreas de alto consumo ha motivado la búsqueda de formas alternativas de mejorar el suministro, dando como consecuencia que el PSAH se esté convirtiendo en el esquema más utilizado actualmente (Robertson y Wunder, 2005). El sistema costarricense fue el primer programa de PSAH que se implementó a nivel nacional, está a cargo de la administración del estado a través del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), sistema que es complementado por iniciativas individuales y locales (Mejías y Segura, 2002). Sin duda, este es el mecanismo más avanzado entre los países en desarrollo, destacando el reconocimiento legal que se le confiere a la producción de recursos hídricos, como un servicio ambiental (Pagiola *et al.*, 2006).

Otros países de América Latina y el Caribe que están proyectando y aplicando esquemas de PSAH son: Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, El Salvador, Honduras, Panamá y República Dominicana (Bonfil y Madrid, 2006; Hartmann y Petersen, 2006; Muñoz *et al.*, 2006; Robertson y Wunder, 2005; Mayrand *et al.*, 2004; Rosa *et al.*, 2004; Mejías y Segura, 2002). En la mayor parte de los casos el enfoque más usado es el establecimiento de áreas protegidas, más que la creación de sistemas de que permitan mejorar las prácticas de gestión entre los usuarios del recurso y los dueños de las tierras de captación. No obstante, los esquemas de PSAH con base en cuencas hídricas, están teniendo

cada vez mayor auge y se han puesto a funcionar en varios países, entre ellos México (Mayrand *et al.*, 2004).

2.4.1. El caso de México.

La historia del PSAH en México es muy reciente, sin embargo, algunos programas de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, más recientemente en la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Nacional de Zonas Áridas y otras, sirvieron como el primer antecedente a este tipo de iniciativas. Dichos programas surgieron del reclamo de productores forestales de Chihuahua y Durango por una retribución a lo que ellos llaman “producción de agua” y el reconocimiento de su contribución a la producción agrícola de los distritos de riego de Sinaloa, Sonora y la Laguna (Torres y Guevara, 2002).

No obstante, la implementación de un esquema de PSAH como tal, se instituyó en México hasta el año 2003, en Coatepec Veracruz, convirtiéndose así en el primer municipio de la república en establecer este tipo de mecanismos. La finalidad del programa fue realizar proyectos de conservación y desarrollo en zonas boscosas y garantizar el abasto de agua a zonas urbanas. En un inicio el programa se financió con contribuciones individuales de carácter voluntario y con aportaciones del ayuntamiento, la Comisión Nacional Forestal y otros donantes menores, que sirvieron para formar un fideicomiso. Una vez logrado cierto nivel de consenso, los pagos se hicieron obligatorios mediante el cobro de una cuota en el recibo de agua, para financiar actividades de mantenimiento de la cubierta forestal cuenca arriba (SEMARNAT, 2004b).

Actualmente, la Comisión Nacional Forestal está ejecutando el “Programa de Pago por Servicios Ambientales Hídricos” a través del Fondo Forestal Mexicano a nivel nacional, que contempla un pago a los propietarios de predios forestales ubicados en “áreas prioritarias” que soliciten estar en el programa y cubran los requisitos. Dichas áreas se delimitaron como lugares críticos para la recarga de acuíferos que estuviesen vinculados al abastecimiento de agua potable de centros urbanos (SEMARNAT, 2003). Sin embargo, este mecanismo busca dar incentivos para mantener la cobertura forestal sin exigirle a los participantes ninguna tarea de conservación en específico, el único compromiso que adquieren

es conservar las masas forestales durante el tiempo que dura el contrato, lo cual limita enormemente el impacto del programa (Muñoz *et al.*, 2006).

El programa de PSAH en México nació con limitaciones de promoción, monitoreo, focalización, dispersión y sin promover mejores prácticas para satisfacer una demanda. Los usuarios más importantes de los servicios ambientales en México aún no se incluyen o se responsabilizan de un PSA. Por ello, la CONAFOR está previendo un ajuste en sus programas, que incluye la promoción de nuevos mecanismos basados en instrumentos compensatorios a proveedores de los servicios ambientales, a partir de fuentes de financiamiento derivadas de usuarios locales y globales, sin excluir el pago del gobierno (CONAFOR, 2006).

Otra de las modificaciones que se está buscando en el programa, es el cambio en la elección de las áreas de implementación del PSAH. Actualmente se están eligiendo sitios con información, programas y organización social previa, así como antecedentes en la aplicación de mecanismos económicos factibles para su operación a nivel nacional. Existen ocho proyectos considerados áreas promisorias para la promoción de Servicios Ambientales (APROMSA) estas son: Cancún (Quintana Roo); Cerro Grande (Colima-Villa de Álvarez); Copalita (Crucecita-Huatulco, Oaxaca); Oaxaca de Juárez (Oaxaca); Valle de Bravo (Estado de México); Xalapa-Coatepec (Veracruz); Zapalinamé (Saltillo, Coahuila) y la Zona Metropolitana de Monterrey (Carrillo *et al.*, 2006; CONAFOR, 2006). Destaca que no se contempla ninguna iniciativa que involucre directamente al Distrito Federal.

Asimismo, han existido otras experiencias piloto que no han llegado a concretarse en programas a largo plazo, tal es el caso del fideicomiso para la canalización de recursos financieros para la conservación de la cuenca Lerma-Chapala en 1995 (de orden Federal) y el Fondo de Conservación de Agua y Tierra (FOCAT), en el Distrito Federal. Otras iniciativas locales se encuentran actualmente a nivel de proyecto, tal es el caso de la Reserva de la Biosfera “El Triunfo” en el estado de Chiapas, que tendrá como beneficiario a los habitantes de las Cuencas de Cuapa y Cuxtepequez (Burstein *et al.*, 2002).

2.5. Evaluación ecológica del servicio ambiental de provisión de agua.

Cabe señalar que el simple hecho de tener el dinero disponible, no ayuda por sí sólo a garantizar la prestación de servicios ambientales (Pagiola *et al.*, 2006). Por ello es importante valorar los servicios ambientales adecuadamente de tal manera que se fundamenten planes y acciones para asegurar su provisión continua (Kaimowitz, 2001). En la actualidad no existe un método establecido que valore los servicios ambientales, sin embargo, hoy se reconocen tres enfoques distintos (de Groot *et al.*, 2002):

- La valoración ecológica, que hace referencia a aquellos procesos principales, producto de las interacciones entre los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas;
- la valoración económica, que se enfoca a estimar la contribución de los ecosistemas al bienestar humano y el desarrollo económico y
- la valoración cultural, que se basa en el valor que tienen ciertos elementos de los ecosistemas para la sociedad a partir de diferentes percepciones socioculturales de su entorno natural.

Los tres tipos de valoración de los servicios ambientales son fundamentales para la implementación del sistema de PSA, en tanto permiten estimar los montos para el pago (Mejías y Segura, 2002). Sin embargo, para que un esquema de PSAH sea exitoso es imprescindible realizar en primera instancia, una evaluación ecológica del servicio. Es decir, evaluar la capacidad de los ecosistemas para proveer agua a las diferentes comunidades de organismos que lo habitan, incluidas las sociedades humanas, así como la capacidad para sostenerse a largo plazo (Toledo, 2006; Rosa *et al.*, 2004).

La evaluación ecológica de los servicios ambientales, tiene por objeto entonces, establecer las bases para la planificación de las actividades humanas de acuerdo con los principios biofísicos que regulan la estructura y función de los ecosistemas, de tal modo que se puedan mantener los servicios ambientales y se garantice una alta calidad de vida de las comunidades que las habitan (Toledo, 2006).

Por ello, antes de realizar cualquier acción que contemple establecer un valor monetario a los servicios ambientales es necesario entender los procesos e interrelaciones que permiten su existencia. En el caso de la evaluación ecológica del servicio de provisión de agua, es necesario el análisis de los diferentes componentes del ciclo hidrológico y los vínculos de estos componentes con el paisaje (Tognetti *et al.*, 2004).

2.5.1. Ciclo hidrológico.

Como se mencionó con anterioridad, una parte fundamental para evaluar el servicio ambiental de provisión de agua es conocer los procesos del ciclo hidrológico. Ya que, gracias a esa circulación espontánea y continua, el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a las fuentes, haciendo del agua un recurso natural renovable y disponible (Llerena, 2004).

En las cuencas, el ciclo hidrológico se puede esquematizar como un estímulo constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida; entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos como la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento mismo del agua (Figura 1) (Aparicio, 2001). Para entender mejor este proceso, hay que mencionar que la cuenca es un sistema ecológico dinámico y abierto que depende de insumos, transferencias y productos de masas y energía. La energía solar y la precipitación son los mayores insumos que movilizan a este sistema biofísico. Su mecanismo de transferencia y regulación lo constituyen la cobertura vegetal, los suelos y el sustrato geológico. Sus productos son las aguas superficiales y subterráneas de sus corrientes y acuíferos, además de las pérdidas por la evapotranspiración en sus ecosistemas (Toledo, 2006).

Durante este ciclo, el agua que se encuentra sobre la superficie del suelo o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor generado se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae a la tierra en forma de precipitación (Aparicio, 2001).

Al caer, el agua precipitada puede volver a evaporarse en el camino o ser interceptada por las plantas o las construcciones. Dependiendo de la naturaleza de la geología, de los suelos y de la vegetación que cubre la cuenca, una variada

proporción de esta agua puede infiltrarse para correr de manera subsuperficial o infiltrarse profundamente para recargar los acuíferos subterráneos, algunos de los cuales emergen en forma de manantiales para alimentar el cauce de los ríos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada hacia la atmósfera casi en su totalidad (Maderey y Jiménez, 2005). Otra parte fluye por gravedad, normalmente por caminos ya establecidos que pueden cambiar lentamente a través del tiempo. Estos caminos se combinan para formar redes de arroyos y ríos en las cuencas hidrográficas, y algunas pueden llegar hasta el mar (UNESCO, 2003).

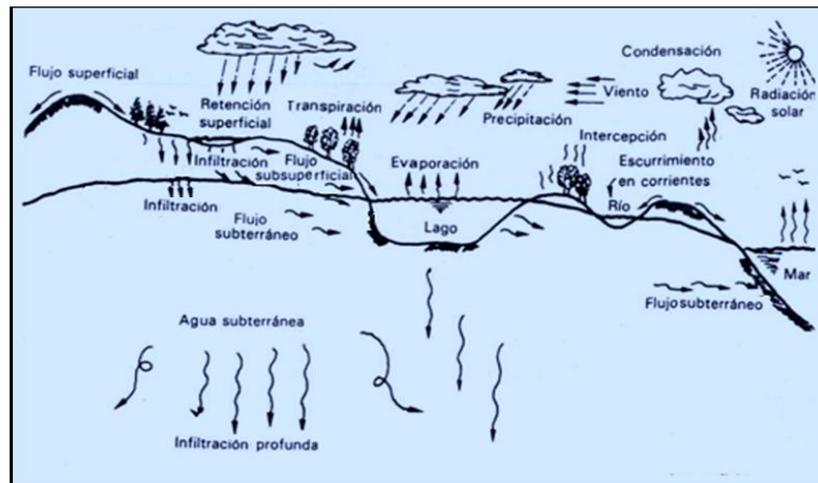


Figura 1. Ciclo hidrológico (Fuente: Aparicio, 2001).

Como ecosistema, geomorfológica y bióticamente, la cuenca es un mosaico muy complejo de paisajes acuáticos y terrestres estrechamente interconectados, cuyo comportamiento y evolución opera en un amplio rango de escalas espaciales y temporales que se verán reflejadas en su respuesta hidrológica (Toledo, 2006). De esta manera, si se consideran los procesos del ciclo hidrológico al interior de la cuenca, en un período de tiempo dado, es factible comprender cómo el agua circula en su interior. Lo cual ayuda planear su aprovechamiento y establecer estrategias de conservación más adecuadas (Aparicio, 2001). En el presente documento se presentan dos herramientas para tal efecto: separación de caudal base y modelación hidrológica.

2.5.2. Separación de escurrimiento base

Las aguas que componen la corriente de un río pueden llegar por uno ó varios caminos desde que alcanzan la tierra en forma de precipitación, de manera que podemos diferenciar tres vías principales: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Linsley *et al.*, 1977) (Fig. 2).

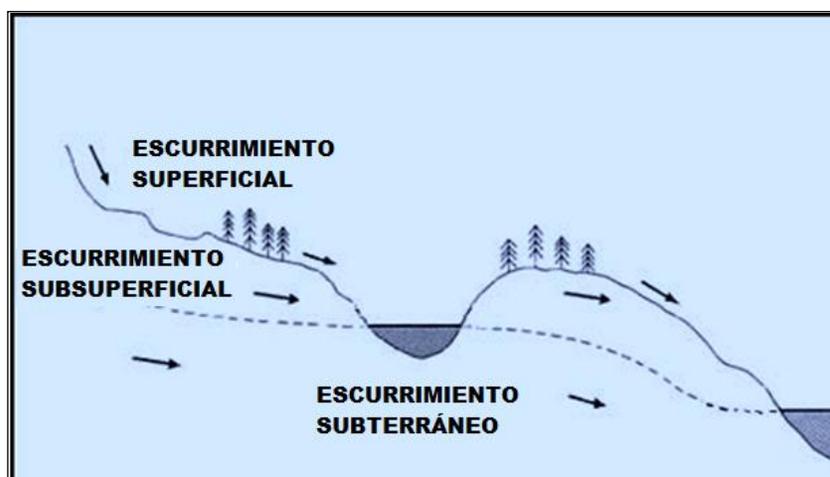


Figura 2. Tipos de escurrimiento (Figuroa, 2005).

Cada uno de estos componentes tiene características propias que se expresan de manera distinta en los hidrogramas observados a la salida de una cuenca, lo cual hace posible hacer una diferenciación aproximada entre sus aportaciones al cauce (cuadro 4) (Remeiras, 1974). Sin embargo, con la finalidad de facilitar su análisis, el flujo total de un río se separa únicamente en dos partes: escurrimiento directo y escurrimiento base. La distinción se hace sobre la base del tiempo de llegada a la corriente y no con relación al camino seguido (Linsley *et al.*, 1977).

El escurrimiento directo es el que llega más rápido a la salida de la cuenca, está relacionado con una tormenta en particular y consiste principalmente de la escorrentía superficial, por lo que su aprovechamiento para las actividades humanas es muy difícil. En cambio, el escurrimiento base es el que llega más lentamente a la salida de la cuenca, está integrado por escurrimientos subterráneos y, dependiendo de las características de las cuencas, también puede estar constituido por escurrimientos subsuperficiales (*Op. cit.*) (Figura 3).

Cuadro 4. Tipos de escurrimiento que alimentan a los ríos (Maderrey y Jiménez, 2005; Linsley et al., 1977; Remeiras, 1974).

| ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL: | ESCURRIMIENTO SUBSUPERFICIAL: | ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO: |
|---|--|---|
| Avanza sobre la superficie del suelo, proviene de zonas impermeables o saturadas de agua. | Avanza a través de los horizontes superficiales del suelo. | Avanza a través de los acuíferos. |
| Su contribución al cauce de un río es rápida. | Puede avanzar rápidamente o lentamente, dependiendo del suelo y la geología. | Su contribución al cauce de un río es gradual y lenta. |
| Generalmente se relaciona con un evento de lluvia de gran intensidad. | Generalmente no tiene relación con un evento de lluvia en particular. | No se puede relacionar con un evento de lluvia en particular. |
| Es el componente principal del escurrimiento directo. | Puede formar parte del escurrimiento directo o del escurrimiento base, dependiendo de la velocidad con que llega a la salida de la cuenca. | Es un componente significativo del escurrimiento base. |

La importancia de separar el escurrimiento base, radica en que este componente es el único que alimenta a las corrientes después de un periodo amplio sin lluvias, lo cual permite que los cauces sean perenes o prolonguen su permanencia. De esta manera, se puede evaluar la capacidad de la cuenca para proporcionar el servicio ambiental de provisión de agua a lo largo del tiempo, especialmente durante los periodos de estiaje. Para analizar el escurrimiento directo y el escurrimiento base es necesario realizar un procedimiento conocido como separación de hidrogramas (Aparicio, 2001). Existen diversos métodos, los cuales están divididos en manuales y automatizados, algunos de ellos se describirán brevemente.

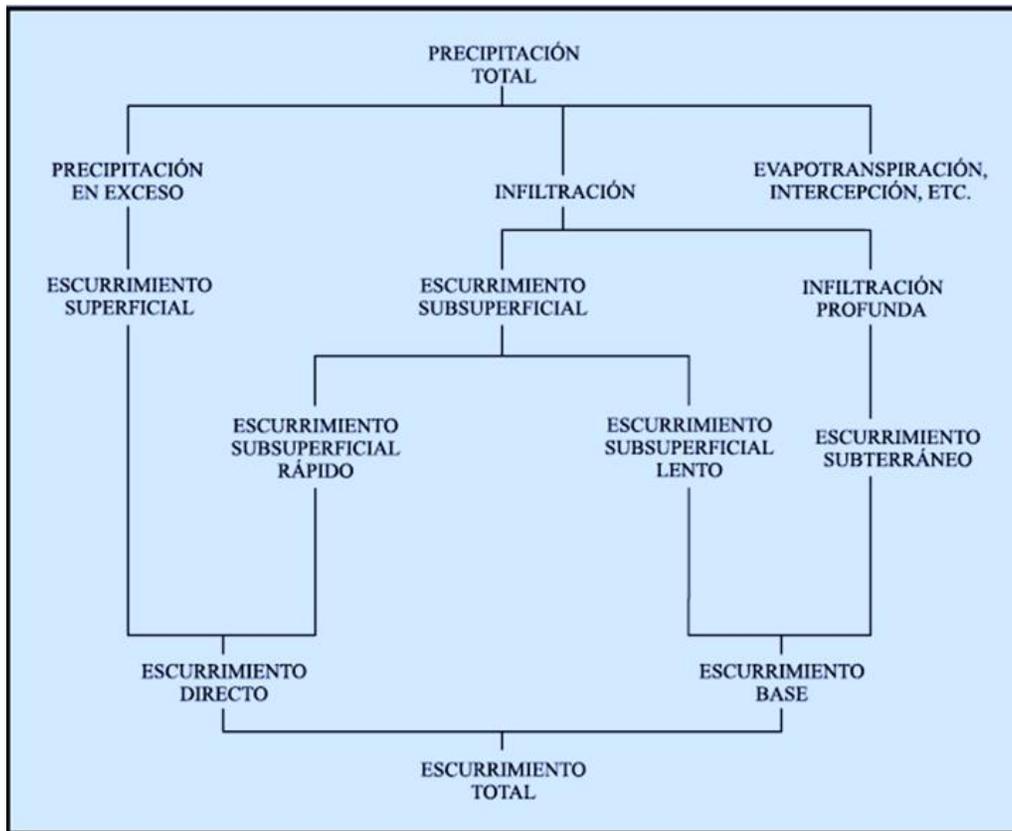


Figura 3. Diagrama del escurrimiento (Maderey y Jiménez, 2005).

2.5.2.1. Métodos manuales.

La mayoría de ellos utilizan un tiempo base, el cual representa el tiempo de vaciado del escurrimiento directo en días después que ocurre el pico del hidrograma, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$N=0.827A^{0.2}$$

Donde N= tiempo de vaciado del escurrimiento en días

A= área de la cuenca en Km²

de esta manera se estima el punto de inflexión en la curva de retroceso, en el que todo el flujo restante será escurrimiento base, N días después del pico del hidrograma (Linsley *et al.*, 1977).

Método de descarga constante. Asume que el escurrimiento base es constante durante el hidrograma de la tormenta. El mínimo flujo de corriente inmediatamente anterior a la curva ascendente es usado como un valor constante (1a, Figura 4).

Método de pendiente constante. Conecta el comienzo de la curva ascendente con el punto de inflexión de la curva de retroceso (1b, Figura 4).

Método cóncavo. Intenta representar el supuesto de disminución del escurrimiento base durante el inicio de la tormenta, para proyectar la tendencia de declinación del hidrograma directamente bajo la cresta en el hidrograma de flujo. Posteriormente conecta esta línea con el punto de inflexión de la curva de retroceso del hidrograma (1c, Figura 4) (*Op. cit.*). En el presente estudio se empleó este método para complementar la separación de los hidrogramas.

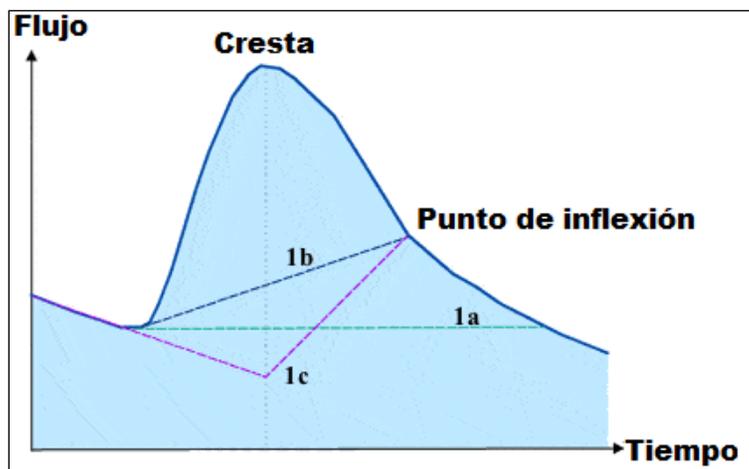


Figura 4. Métodos manuales de separación de escurrimiento base.

2.5.2.2. Métodos automatizados.

Los procedimientos automatizados implican predominantemente el uso de filtros digitales para el análisis y procesamiento de los datos, aplicando reglas matemáticas para separar el escurrimiento base, algunos de ellos se muestran en el cuadro 5 (Evans y Neal, 2005). En el presente estudio se empleó el filtro de Lyne y Hollick.

Cuadro 5. Métodos automatizados de separación de hidrogramas.

| Nombre | Ecuación | Referencia |
|---|---|--|
| Mínimos cuadrados | Conecta los puntos de menor caudal a lo largo del hidrograma. | Instituto de Hidrología (1980) |
| Algoritmo de un parámetro | $q_b(i) = [k/(2-k)]*q_b(i-1) + [(1-k)/(2-k)]*q(i)$ | Chapman y Maxwell (1996) |
| Algoritmo de dos parámetros de Boughton | $q_b(i) = [k/(1+C)]*q_b(i-1) + [(C)/(1+C)]*q(i)$ | Boughton (1993) Chapman y Maxwell (1996) |
| Filtro Lyne y Hollick | $q_f(i) = \alpha*q_f(i-1) + (1+\alpha)/2 * [q(i) - q(i-1)]$ | Lyne y Hollick (1979); Nathan y McMahon, (1990); Arnold y Allen (1999) |
| <p>Donde: $q_b(i)$= caudal base filtrado al tiempo i; $q(i)$ es el caudal original al tiempo i; $q_f(i)$= es el caudal directo filtrado al tiempo i; $q_f(i-1)$= es el caudal directo filtrado al tiempo $i-1$; $q(i-1)$ =caudal original en el tiempo $i-1$; K= parámetro de filtrado dado por la constante de recesión ; C=es un parámetro que permite que la forma de la separación sea alterada; α=es un parámetro de filtrado.</p> | | |

2.5.3. Modelación hidrológica.

Los procesos del ciclo hidrológico que dan como resultado el servicio ecosistémico de provisión de agua, dependen de factores que varían espacial y temporalmente, como por ejemplo: pendiente del sitio, características y composición del suelo, tipos de vegetación, clima y regímenes de manejo, entre otros (Pérez *et al.*, 2005). Estos procesos incluyen la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento como principales componentes; y pueden ser representados mediante modelos hidrológicos (Chow *et al.*, 1994).

El modelado hidrológico consiste básicamente en utilizar un modelo matemático formado por un conjunto de ecuaciones que representan un proceso, mediante el cual las entradas son transformadas en las salidas del sistema (*Op. cit.*). Esto se lleva a cabo introduciendo en el modelo los datos hidroclimatológicos disponibles, así como los datos fisiográficos de la cuenca en estudio, los cuales hoy en día se pueden obtener de una manera rápida y eficiente, haciendo uso de

la información relacionada con los Sistemas de Información Geográfica (Guerra, 2007).

Simular estos procesos y el efecto de estos factores con base en modelos teóricos y métodos de evaluación consensuados puede ser de utilidad en varios sentidos: la simulación permite formular hipótesis sobre el efecto relativo que tiene cada una de las variables incluidas en el modelo (componentes biofísicos) sobre los procesos que generan servicios ambientales, al conocer este efecto es posible evaluar la importancia de las medidas de conservación y también se puede jerarquizar el tipo de información que es importante recabar o generar en caso de querer realizar proyecciones más confiables con el modelo; por otro lado, estos modelos incluso pueden generar proyecciones del estado futuro de estos servicios ambientales (Pérez *et al.*, 2005).

En base a la forma en que tratan o manejan los componentes espaciales, los modelos de cuencas se pueden dividir en dos tipos: modelos concentrados y distribuidos. Los modelos de parámetros concentrados consideran una cuenca como una sola unidad y sin tomar en cuenta la variabilidad espacial de los procesos, entradas, condiciones de frontera o propiedades hidrológicas de la cuenca. En contraste, los modelos distribuidos consideran la variabilidad espacial en la cuenca, resolviendo las ecuaciones para cada unidad de división (Abad, 2006). Algunos de los modelos distribuidos se muestran en el cuadro 6, en el presente trabajo se eligió el modelo de simulación hidrológica SWAT.

2.5.3.1. Descripción del modelo SWAT.

SWAT es un modelo desarrollado en Texas por el Dr. Jeff Arnold para el Departamento de Agricultura de los Estado Unidos (USDA), está avalado por su amplia aplicación a cuencas de todo el mundo con las más diversas características, contempla e integra un número considerable de submodelos. Surge como una evolución de los programas CREAMS (Knisel, 1980) y EPIC (Williams *et al.*, 1984), entre otros, con más de 25 años de experiencia en el cálculo hidrológico, de calidad de aguas y sedimentos. Los submodelos (módulos) que forman parte de SWAT se pueden agrupar en climáticos, hidrológicos, de

erosión, de nutrientes, agrícolas y urbanos. El módulo principal, que sirve de sustento a todos los demás, es el hidrológico (Herrero *et al.*, 2004).

Cuadro 6. Modelos hidrológicos distribuidos (Guerra, 2007).

| Nombre del modelo | Acrónimo | Autor (es) y año |
|--|-------------|---|
| Agricultural Non-Point Source Model | AGNPS | Young <i>et al.</i> (1989, 1995) |
| Hydrological Modeling System | ARC/EGMO | Becker y Pfützner (1987) |
| Cascade two dimensional Model | CAS2D | Julien y Saghafian (1991), Ogden (1998) |
| Model CEQUEAU | CEQUEAU | Morín <i>et al.</i> (1995, 1998) |
| Distributed Hydrology Soil Vegetation Model | DHSVM | Wigmosta <i>et al.</i> (1994) |
| Hidrologic Model System | HMS | Yu y Schwatz (1998), Yu <i>et al.</i> (1999) |
| Distributed Hydrological Model | HYDROTEL | Fortín <i>et al.</i> (2001) |
| Institute of Hydrology Distributed Model | IHDM | Beven <i>et al.</i> (1987), Calver y Word (1995) |
| Integrated Hydrometeorological Forecasting System | IHFS | Georgakakos <i>et al.</i> (1999) |
| Generalized River Modeling Package-System Hydrologique Europeen | MIKE-SHE | Refsgaard y Storm (1995) |
| Macroescale Hydrological Model-Land Surface Scheme | MODCOU-ISBA | Ledoux <i>et al.</i> (1989), Noilhan y Mahfouf (1996) |
| Systeme Hydrologique Européen/Systeme Hydrologique Europeen Sediment | SHE/SHESED | Abott <i>et al.</i> (1986), Bathurst <i>et al.</i> (1995) |
| Soil Water Assesment Tool | SWAT | Arnold <i>et al.</i> (1998) |

Los procesos espaciales están promediados según tramos homogéneos de tamaño no condicionado *a priori*, denominados **Unidades de Escurrimiento** (UE). Cada tramo está definido por un punto en un cauce (*outlet*) y lo componen todos los pixeles cuya escorrentía superficial alcanza el cauce entre ese punto y el punto inmediatamente aguas arriba del mismo. A su vez, cada UE está dividida en **Unidades de Respuesta Hidrológica** (URH), que son definidas en función de características homogéneas de uso de suelo y tipo de suelo (Herrero *et al.*, 2004).

El modelo SWAT parte de la ecuación básica del ciclo hidrológico (Neitsch *et al.*, 2002):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}$$

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm); SW_0 es el contenido inicial de agua en un día i (mm); t es el tiempo (días); R_{day} es la precipitación en el día i (mm); Q_{surf} es la escorrentía superficial producida el día i (mm); E_a es la evapotranspiración del día i (mm); W_{seep} es el contenido de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm); Q_{gw} es el caudal de retorno en el día i (mm).

Se describen a continuación los principales procesos usados por SWAT para modelar el ciclo hidrológico (Fig. 5) (*Op. cit.*):

Escurrimiento superficial. Este elemento utiliza la lámina de precipitación diaria y horaria para calcular el escurrimiento superficial y el escurrimiento máximo o pico, para cada URH. Emplea una modificación al método de curva numérica (Soil Conservation Service, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (1911). En el método de curva numérica, el valor de la curva varía de manera no lineal con el contenido de agua en el suelo; disminuye cuando éste se acerca al punto de marchitamiento permanente y aumenta casi a 100 cuando el suelo se acerca a la saturación, o bien cuando el suelo presenta condiciones de impermeabilidad.

Infiltración. Se refiere a la entrada de agua en el perfil del suelo desde la superficie. Es calculada como la diferencia entre la lámina de precipitación y el escurrimiento superficial.

Redistribución. Se refiere al movimiento continuo del agua a través del perfil del suelo, después de que la entrada de agua ha cesado. Es calculada mediante una técnica de ruta de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa del perfil en la zona de raíces del suelo. La infiltración hacia los acuíferos se inicia cuando la capacidad de campo se excede y la capa de suelo inferior no está saturada. El flujo está influenciado por la conductividad hidráulica del suelo y su temperatura.

Evapotranspiración. El modelo calcula la evaporación del suelo y las plantas de manera separada como lo describe Ritchie (1972). La evaporación potencial del suelo y la transpiración de las plantas es estimada como una función de la evapotranspiración potencial e índice del área foliar. La evaporación actual del suelo es estimada usando funciones exponenciales de la profundidad del suelo y su contenido de agua.

Escurrimiento lateral subsuperficial. Este escurrimiento se calcula de manera simultánea con la redistribución. Emplea un modelo cinemático de almacenamiento para predecir el escurrimiento lateral en cada capa del perfil del suelo. Este elemento responde a las variaciones en la conductividad, la pendiente y el contenido de agua en el suelo.

Pérdidas por transmisión. Se refiere a las pérdidas de los escurrimientos superficiales a través de la red de cauces. Se calculan en función del ancho y longitud de los cauces, así como de la duración del escurrimiento, mediante el método de Lane's (Soil Conservation Service, 1983).

Flujo del acuífero no confinado. Se refiere al escurrimiento originado en los acuíferos, que contribuye al escurrimiento total. Para su cálculo SWAT simula dos tipos de acuíferos: un acuífero no confinado, que contribuye al flujo base; y otro confinado que puede estar contribuyendo con escurrimientos fuera de la cuenca. El agua que se infiltra hasta estratos profundos, es dividida en dos fracciones, cada una de las cuales recarga a uno de los acuíferos. En adición, el agua del acuífero no confinado puede contribuir a la humedad del perfil del suelo en condiciones muy secas o ser extraída directamente por las plantas.

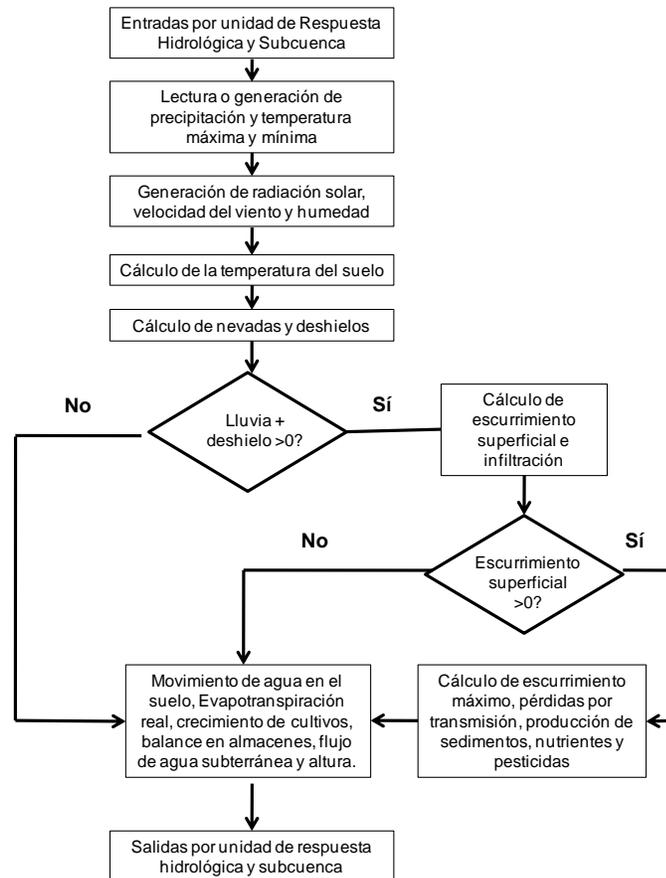


Figura 5. Secuencia general de los procesos utilizados por SWAT para modelar el ciclo hidrológico.

Este modelo permite la utilización de una extensión para ArcView denominada AvSWAT, que funciona como una interface grafica para SWAT, la cual permite al usuario ingresar la información de entrada, editar bases de datos, generar parámetros del sistema, calibrar las modelaciones, generar escenarios y extraer la información de salida (Di Lucio *et al.*, 2002).

3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización biofísica y socioeconómica del área de estudio.

3.1.1. Ubicación.

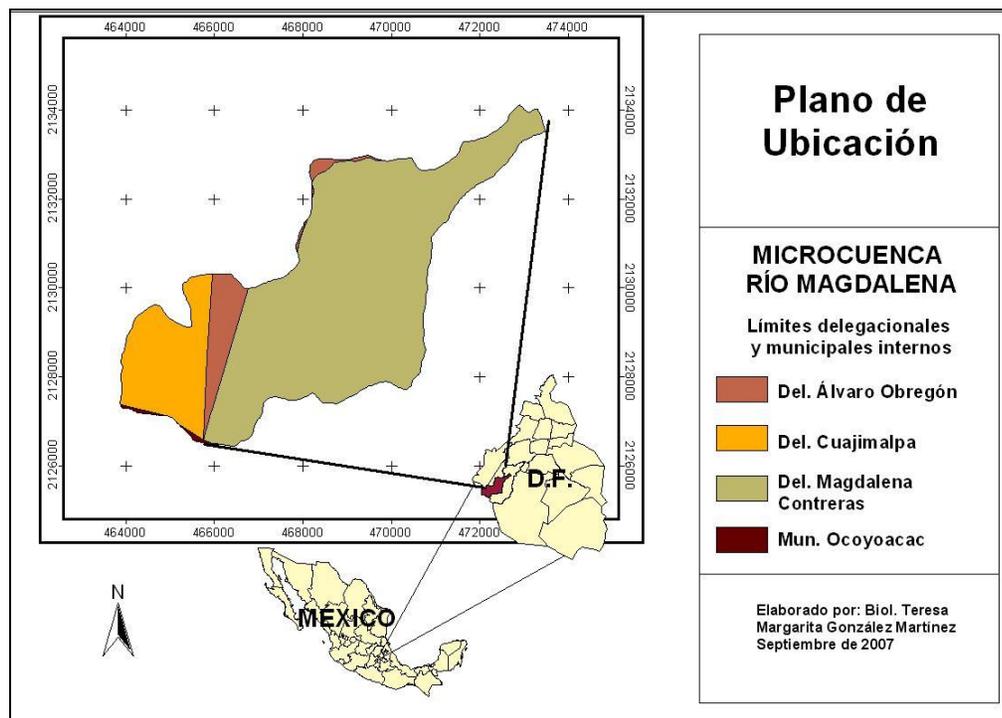


Figura 6. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Magdalena; delegaciones y municipios que la integran.

La microcuenca del río Magdalena se ubica al surponiente de la Ciudad de México. Tiene una superficie de 2,892.7 Ha, de las cuales la mayor parte pertenece al Distrito Federal abarcando parcialmente a las delegaciones La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa. Una pequeña franja ubicada al sureste corresponde al municipio de Ocoyoacac, Estado de México (Figura 6). Se encuentra dentro de los paralelos 19°14'35'' y 19°17'53'' LN y los meridianos 99°15'06'' y 99°20'18'' LO (SMA, 2004).

3.1.2. Fisiografía y Topografía.

Fisiográficamente, la microcuenca se ubica dentro del Eje Volcánico Transmexicano, formando parte de la cuenca del Valle de México en la vertiente occidental de la Sierra de las Cruces. Ésta región se continúa hasta la Sierra del

Chichinautzin, contribuyendo al parteaguas que divide esta cuenca con la del Balsas (Ávila, 2002).

Presenta un relieve montañoso con una altitud mínima de 2,550 msnm en el extremo noreste, desde donde comienza a ascender en dirección suroeste, hasta alcanzar la altitud máxima de 3,789 msnm en las cumbres del Cerro La Palma (Álvarez, 2000).

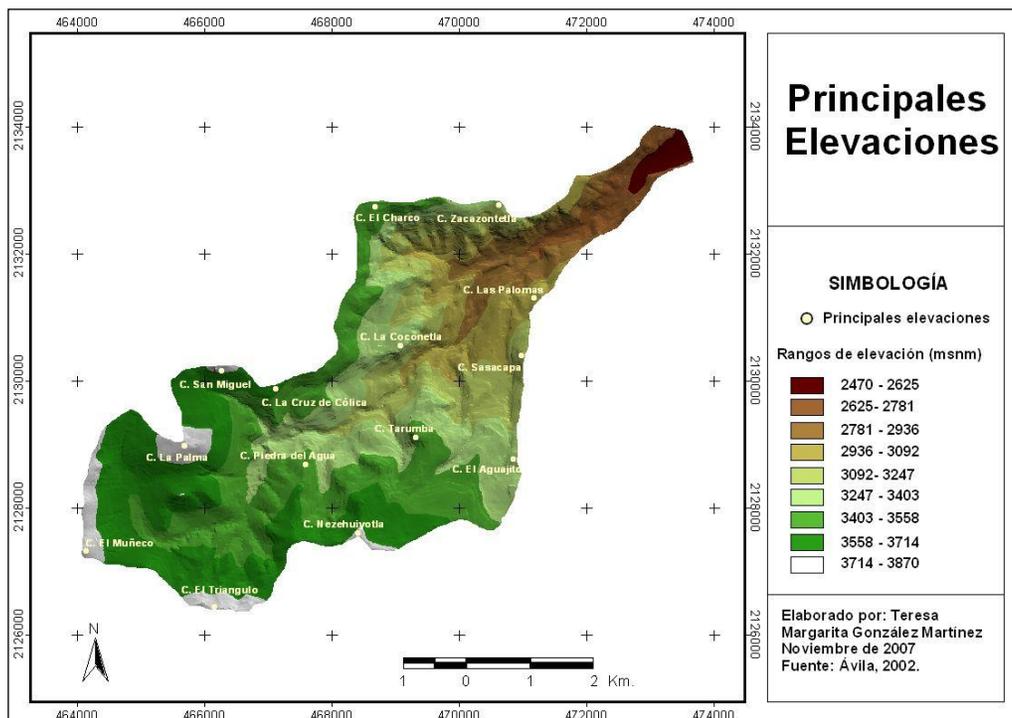


Figura 7. Principales elevaciones de la microcuenca río Magdalena y rangos de elevación.

La divisoria topográfica se encuentra constituida por varios cerros (Figura 7), que en conjunto le confieren a la microcuenca una forma alargada con un índice de Gravelius de 1.76 (el valor mínimo de este índice es 1 para una forma redonda, entre más alto sea el valor más alargada es la cuenca) y un Factor de Forma de 0.102 (entre más bajo sea este valor, más largo es el camino que debe recorrer el agua en su trayectoria hacia la salida). Estos índices muestran la relación existente entre la forma de la cuenca y su respuesta hidrológica, generalmente los volúmenes escurridos en cuencas alargadas como la microcuenca del río Magdalena, son más uniformes a lo largo del tiempo; en

cambio, en cuencas compactas el agua tarda menos en llegar a la salida, en donde se concentra en un tiempo relativamente corto (Maderey y Jiménez, 2005).

3.1.3. Edafología.

Dentro de la zona se distinguen tres unidades de suelo distintas (Figura 8), de las cuales la más ampliamente distribuida es el andosol. Está representada por tres subunidades siendo la más importante el andosol húmico, ya que se encuentra en el 82.76% del territorio como suelo dominante. Otras subunidades que se distribuyen en la microcuenca son el andosol ocrico y el andosol mólico, éstas abarcan un 11.58 % y 0.56 % respectivamente como suelos dominantes, aunque en todos los casos también se encuentran como suelos secundarios dentro de asociaciones (RAN, 2000a).

En general los andosoles son suelos oscuros muy ligeros, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico, los de tipo húmico presentan una capa superficial algo gruesa, oscura pero pobre en nutrientes, con terrones muy duros cuando están secos. Los andosoles ocricos son suelos muy limosos o arcillosos a menos de 50 cm de profundidad y tienen una capa superficial clara, pobre en materia orgánica y en nutrientes. En cambio, los andosoles mólicos presentan una capa superficial oscura, gruesa, rica en nutrientes y con buen contenido de materia orgánica (INEGI, 1998a).

Otra unidad de suelo en la microcuenca es el feozem, se caracteriza por presentar una capa superficial obscura, suave, algo gruesa, rica en materia orgánica y en nutrientes (*Op. cit.*). En el área se manifiestan dos subunidades como suelo dominante, el feozem lúvico que se encuentra en las partes bajas dentro del 0.43% del territorio, tiene un origen residual que le confiere un alto contenido de arcillas siendo el subsuelo más rico en este tipo de material que la capa superficial; y el háplico que presenta en el 1.25% del territorio, en este tipo de suelo es característico un horizonte cámbico, en su origen se agregó material coluvial, originado por la caída libre de material de las partes altas (SMA, 2004; RAN, 2000a).

La tercera unidad corresponde a los litosoles, que son suelos con una profundidad menor a 10 cm y yacen sobre la roca (INEGI, 1998a). Se encuentran distribuidos en el 3.43% del territorio como suelo dominante, tanto en la parte alta como en la parte baja de la microcuenca. Asimismo, se encuentran asociados a otros suelos de manera secundaria y terciaria (RAN, 2000a).

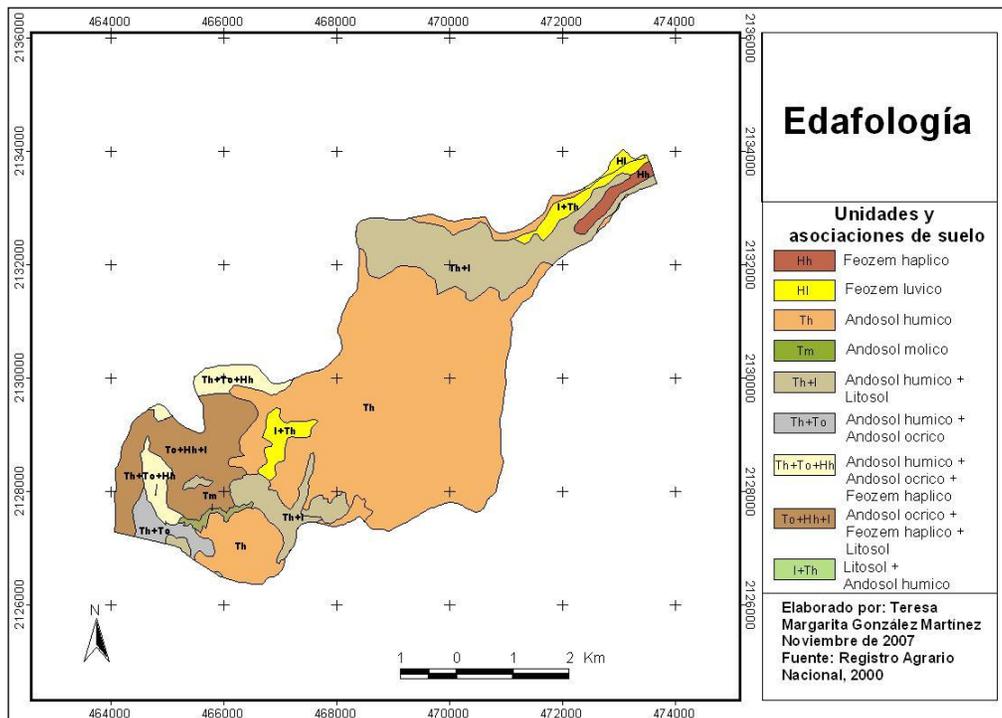


Figura 8. Edafología. Unidades y asociaciones de suelo presentes en la microcuenca.

Por otro lado, los suelos de la microcuenca presentan una textura media. Estos suelos, comúnmente llamados francos, generalmente están equilibrados en el contenido de arena, arcilla y limo (INEGI, 1992).

De acuerdo con Jujnovsky (2006), en la parte alta de la microcuenca los suelos presentan características de permeabilidad y conductividad hidráulica saturada muy alta (Tabla 1). Mientras que en el resto de la microcuenca los valores están en el rango de tipo moderado.

3.1.4. Geología.

El aspecto geológico desempeña un papel muy importante en el estudio de los componentes del ciclo hidrológico, ya que condiciona al escurrimiento en cuanto a

la permeabilidad e impermeabilidad de las estructuras que forman el terreno. Cuando el terreno es permeable, el sistema fluvial, durante la época de estiaje, se encuentra bien abastecido por el escurrimiento subterráneo. Cuando es impermeable, el volumen de escurrimiento se concentra más rápido en el punto de desagüe y en la época de estiaje el nivel de la corriente disminuye considerablemente o bien desaparece (Maderey y Jiménez, 2005).

La microcuenca del río Magdalena, está formada casi en su totalidad por material ígneo extrusivo, producto de manifestaciones volcánicas del terciario y cuaternario, dentro del período comprendido desde el plioceno hasta el holoceno. Las rocas que componen este substrato rocoso son dacitas, andesitas y tobas, con predominancia de las primeras; también se presentan formaciones de tipo aluvial (Ávila, 2002; INEGI, 1998b) (Figura 9).

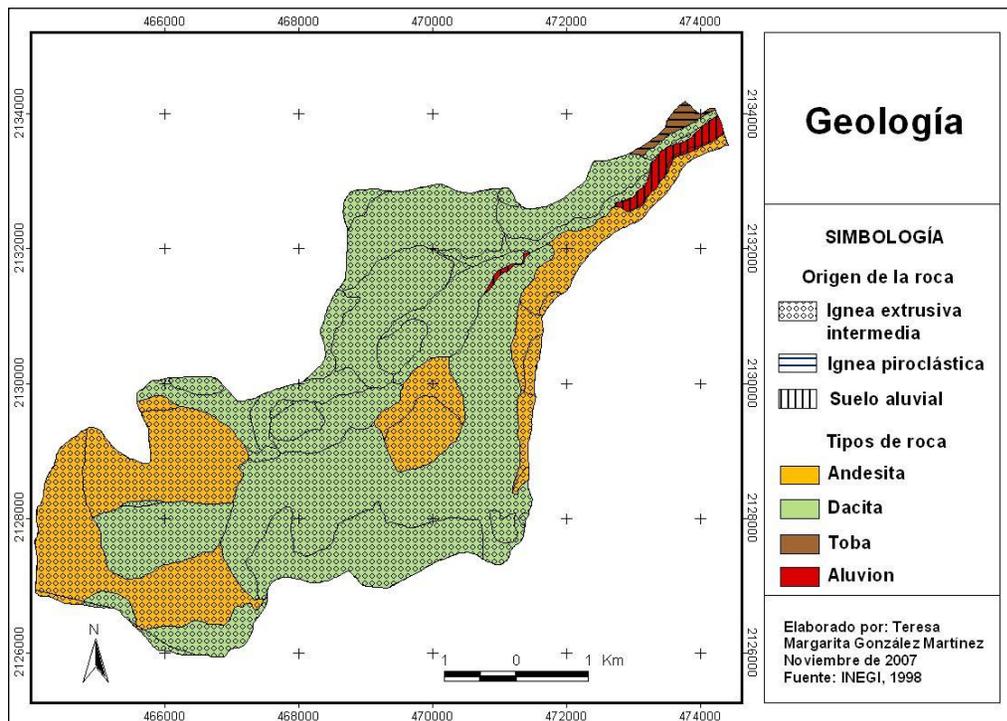


Figura 9. Tipos de roca y origen de formación.

El paisaje está conformado por una sucesión de derrames lávicos, brechas volcánicas y depósitos piroclásticos que provocan una alta complejidad geológico-estructural, en la que es posible identificar rocas volcánicas asociadas a las características de la sierra de las Cruces, entre las que se mencionan caldera

Santa Rosa-Judío, caldera Ocotol, volcán Tres Cruces, cráter de explosión San Miguel, además de la Formación Tarango (SMA, 2002) (Figura 10).

El funcionamiento hidrogeológico de esta zona está determinado por las diferencias en las características físicas de las diversas unidades litológicas que afloran en el área, así como por la abertura e interconexión de fracturas y las estructuras volcánicas presentes, las cuales juegan un papel importante en la infiltración, movimiento y descarga del agua (DGCOH, 2000a).

El terreno presenta diversas fracturas y fallas que en su mayoría tienen un rumbo hacia el oriente, aunque algunas siguen una dirección suroeste-noroeste y otras oeste-este (Figura 10). En la porción sur de la microcuenca rodeando el cráter de explosión San Miguel existen evidencias de fracturamiento y colapso en estructuras semicirculares. La caldera Ocotol también presenta testimonios de estructuras de la misma naturaleza al igual que las rocas relacionadas con la caldera Santa Rosa-Judío (SMA, 2002).

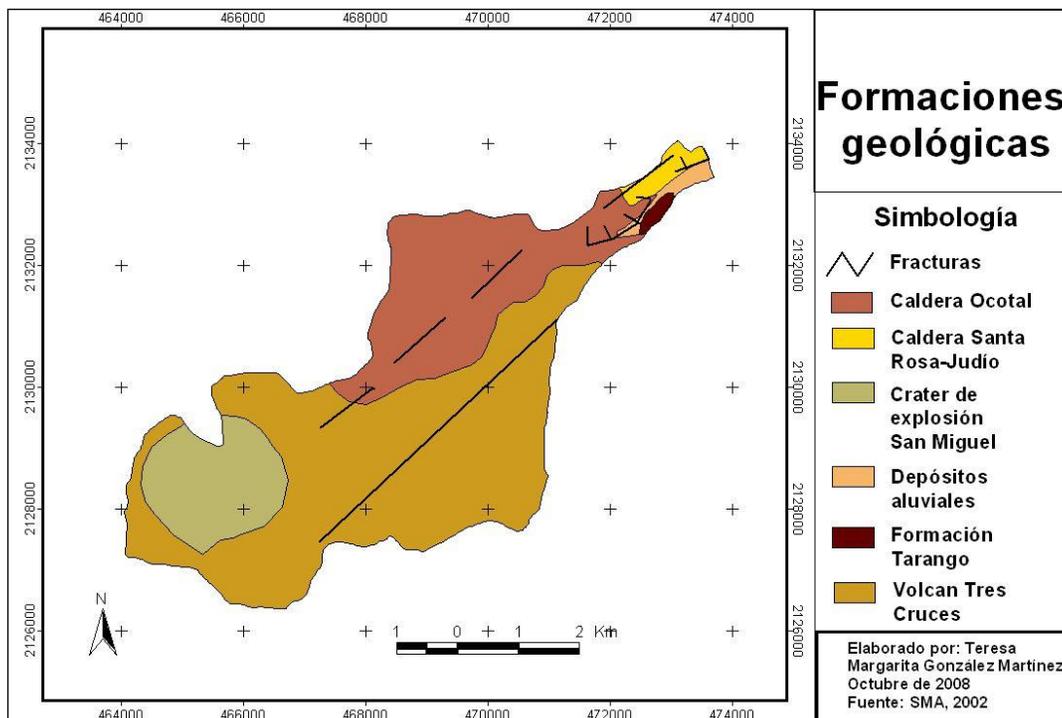


Figura 10. Formaciones geológicas que influyeron sobre la microcuenca río Magdalena, fracturas geológicas.

El cauce del río Magdalena se adapta completamente a la estructura derivada de algunas fallas normales alineadas a lo largo del contacto entre las rocas del Volcán Tres Cruces y las de la Caldera Ocotil, las cuales condicionan su cuenca alta y cuya manifestación más importante es el cañón de Contreras, ya que resulta de un fallamiento en bloques que da flancos abruptos casi cortados a pico en donde el río se encajona en márgenes estrechas (Ávila, 2002; DGCOH, 2000a).

A esas fracturas principales se asocian otras secundarias, permitiendo el incremento de la permeabilidad y en conjunto gobiernan la recarga y descarga de la zona. Por otra parte, la existencia de materiales granulares como arenas volcánicas y depósitos de talud, ayudan a que el movimiento del agua sea considerablemente más lento, regulando de esta forma la descarga del agua de lluvia infiltrada. Dichas características dan origen a numerosos manantiales (DGCOH, 2000a).

Cabe señalar que en la parte alta de la microcuenca del río Magdalena (aguas arriba del 2° Dínamo), las rocas andesíticas, que presentan una permeabilidad secundaria por fracturamiento, están clasificadas por la DGCOH con un grado de permeabilidad de 6 (7=mayor permeabilidad y 1=impermeable) (SMA, 2002).

3.1.5. Hidrología.

Antiguamente la microcuenca era tributaria de la cuenca endorreica del Valle de México. En la actualidad, con la apertura de la cuenca, pertenece artificialmente a la subcuenca del lago de Texcoco-Zumpango, a la cuenca del río Moctezuma, y a la región hidrológica del Pánuco (SMA, 2004).

El río de la Magdalena nace de los escurrimientos originados en los cerros la Palma, San Miguel, la Coconetla, los Cajetes y Meyuca que confluyen por el oeste, así como de los escurrimientos que provienen del este originados en los cerros Nezeuiloya, Tarumba, el Aguajito, Piedras Encimadas, Sasacapa y las Palomas (Figura 11). En su parte remontante se forma de la unión de los arroyos Cieneguillas y La Cerería. La longitud total del río es de 21.6 Km., de los cuales 15.11 Km se encuentran dentro de la microcuenca, después el río penetra en la

zona urbana de la delegación, se mezcla con otras corrientes y llega a la presa Anzaldo. A partir de ese punto, el agua es entubada y dirigida hacia el río Churubusco, continúa su recorrido por el gran canal de desagüe y finalmente sale de la cuenca del Valle de México por el tajo de Nochistongo, Estado de México, para incorporarse al río Tula en el estado de Hidalgo (Álvarez, 2000).

Como fuentes de alimentación del río se tienen los manantiales Agua azul, Cieneguillas, Cieneguillitas, Cañada de los cuervos, Libros, Piedra del agua, Lomita de paja, Campanario 1, Campanario 2, San Miguel, Palmas, Huayatitla, Temamatla, La cercería, Aile, Temaxcalco, San José, Apapaxtla, Las ventanas, Mal paso, Tepozanes I, Tepozanes II, Los pericos, y los arroyos Las ventanas, Pericos, Cieneguilla, Sehuaya, Malancoachac, Tepapatla, El potrero, Cerería, y Cuaxuyac (Ávila, 2002; DGCOH, 2001a).

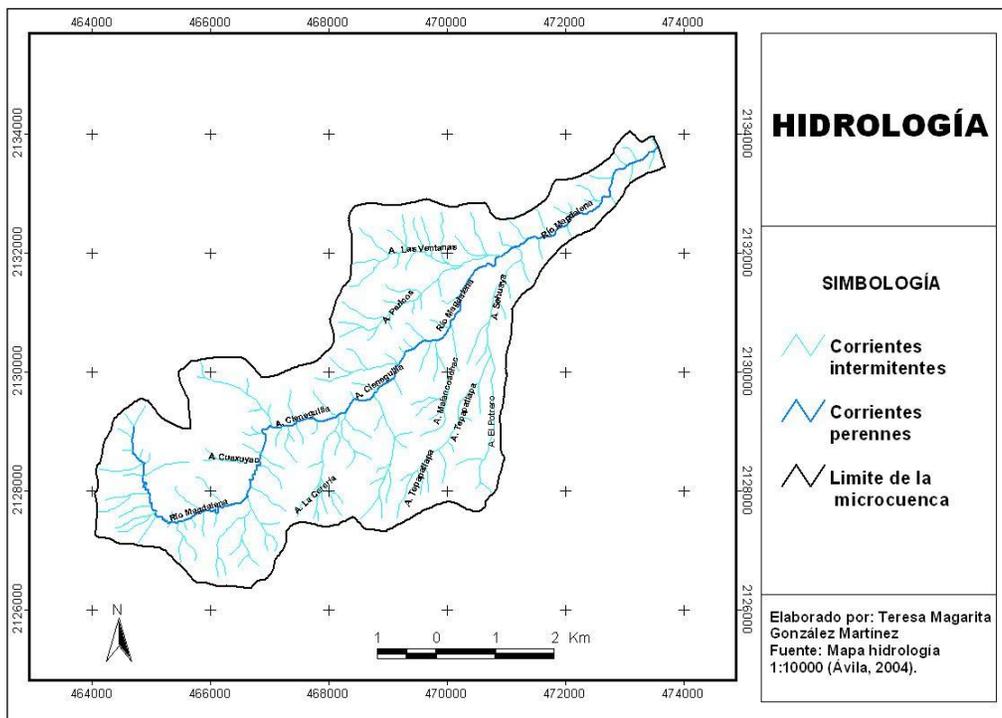


Figura 11. Corrientes perennes e intermitentes dentro de la microcuenca.

3.1.6. Clima.

Debido a las diferencias altitudinales, en el área se manifiestan dos climas distintos que van de templado a semifrío. De acuerdo al sistema de clasificación

climática de Köppen modificado por García (1981), la parte baja comprendida entre los 2,400 y 2,800 msnm de altitud se presenta el subtipo C(W)(w)b (i)g.

Este tipo de clima es templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias de verano y con un factor de pluviosidad de Lang (Precipitación media anual/Temperatura media anual) mayor de 55.3. Es templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 17 °C. La temperatura media del mes más frío es superior a 0 °C y la media del mes más caliente es superior a 18 °C, con poca oscilación térmica y marcha de temperatura de tipo Ganges, lo cual significa que el máximo de temperatura se presenta antes del solsticio de verano (SMA, 2004).

Por otra parte, en la parte alta se presenta el subtipo C(W)(w)b'ig, sólo difiere del anterior, por presentar un verano fresco corto "b'" y que la oscilación térmica es menor a cinco, lo que indica que es isotermal (*Op. cit.*).

3.1.7. Vegetación.

Desde una perspectiva biogeográfica, la región está inmersa en la cuenca del Valle de México, donde confluyen las regiones Neártica y la Neotropical. El contacto entre éstas y la mezcla de sus componentes bióticos ha favorecido la enorme riqueza biológica de la región. La flora predominante en la microcuenca es del tipo de los bosques templados a fríos (*Op. cit.*) (Figura 12). Las comunidades vegetales presentes en la microcuenca se definen como: bosque de *Abies* (Oyamel), bosque de *Pinus hartwegii* (Pino), bosque mixto, bosque de *Quercus* (Encino), Matorral de *Quercus* y Pastizal. Debido al gradiente altitudinal y climático, la vegetación presenta una disposición más o menos definida, observándose algunos solapamientos entre los límites de distintos tipos de vegetación (Ávila, 2002).

La Comunidad de bosque de *Abies religiosa*, comúnmente llamada bosque de Oyamel, se encuentra en altitudes que van de los 2,900 hasta los 3,500 msnm. En extensión es el bosque más amplio dentro de la cuenca (Cuadro 7). Se presenta en pendientes que van del 2 al 50% de inclinación, pero los rodales más vigorosos se desarrollan en pendientes de 30%. El estrato arbustivo en ocasiones puede ser muy denso, probablemente por perturbación. Algunas zonas presentan

daños graves por plagas e incendios (*Op. cit.*). Asimismo, las actividades antropogénicas han provocado que parte de este bosque se encuentre con diferentes grados de alteración, evidenciándose por la presencia de pastizales inducidos y vegetación secundaria. También existen algunos machones en la parte central de la microcuenca, en donde este tipo de vegetación se ha asociado a bosque de *Pinus* (Ávila, 2005).

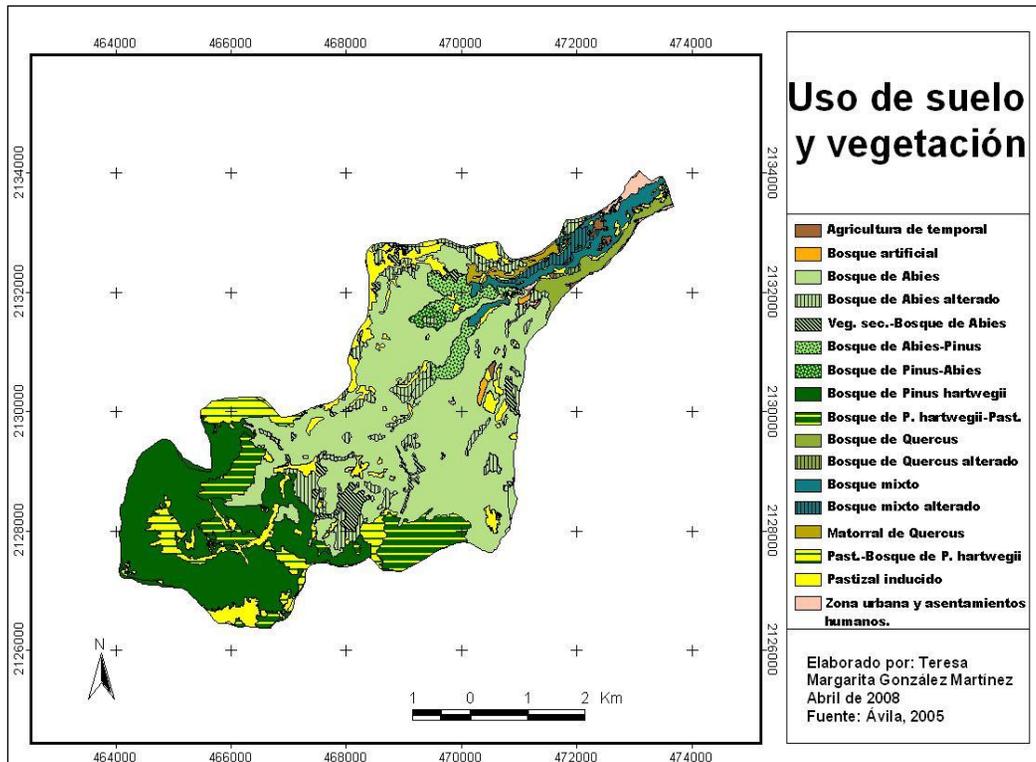


Figura 12. Tipos de vegetación y usos de suelo presentes en la microcuenca.

El bosque de pino se distribuye de los 3,400 a los 3,750 msnm. Se encuentra gravemente alterado por la incidencia de incendios y de plagas. En algunas cañadas protegidas y con orientación norte, se da un ecotono entre este bosque y el de *Abies*; en las partes más altas se asocia con zacatonales alpinos de manera primaria y secundaria. Las pendientes en que se desarrolla por lo general son planas aunque también se encuentra en laderas con pendientes de hasta 40% (Ávila, 2002).

El bosque mixto se encuentra en la parte media de la cuenca, de los 2,800 a los 2,300 msnm, así como en las partes altas de algunas laderas cercanas al segundo y tercer dínamo (*Op. cit.*).

El bosque de *Quercus* se encuentra entre los 2,600 y 3,000 msnm, aunque entra en ecotono con otras comunidades. Se desarrolla en pendientes de 20 a 60%. El suelo normalmente está cubierto por una capa de 10 a 15 cm de hojarasca. La regeneración es baja y la reforestación ha sido con cedro blanco principalmente. Esta comunidad abarca la parte baja de la microcuenca y ha perdido extensión debido al crecimiento de la mancha urbana. En este bosque se encuentran algunos asentamientos irregulares (*Op. cit.*).

Cuadro 7. Tipos de vegetación y uso de suelo dentro de la microcuenca; áreas de cobertura.

| Usos de suelo y vegetación | Área (Ha) | Área (% con respecto a la cuenca) |
|--|-----------|-----------------------------------|
| Agrícola | 11.89 | 0.41 |
| Bosque artificial | 6.17 | 0.21 |
| Bosque de <i>Abies</i> | 1,128.06 | 39.01 |
| Bosque de <i>Abies</i> alterado | 191.74 | 6.63 |
| Bosque de <i>Abies</i> - <i>Pinus</i> | 79.39 | 2.75 |
| Bosque de <i>Pinus</i> - <i>Abies</i> | 13.69 | 0.47 |
| Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> | 599.71 | 20.74 |
| Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - Pastizal | 199.59 | 6.90 |
| Bosque de <i>Quercus</i> | 57.36 | 1.98 |
| Bosque de <i>Quercus</i> alterado | 2.95 | 0.10 |
| Bosque mixto | 85.85 | 2.97 |
| Bosque mixto alterado | 33.56 | 1.16 |
| Matorral de <i>Quercus</i> | 23.07 | 0.80 |
| Pastizal - Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> | 139.75 | 4.83 |
| Pastizal inducido | 234.27 | 8.10 |
| Vegetación secundaria - Bosque de <i>Abies</i> | 61.02 | 2.11 |
| Zona urbana y Asentamientos humanos | 23.68 | 1.09 |

Los matorrales de *Quercus* se pueden encontrar al noreste de la microcuenca, en laderas que van de los 2,780 msnm a los 3,000 msnm; presentan

un estado de conservación aceptable, aunque su origen es secundario (Ávila, 2005).

Los pastizales inducidos se distribuyen de manera heterogénea en toda la microcuenca, a manera de pequeños manchones, que son utilizados para la actividad pecuaria, así como asociados a otros tipos de vegetación con algún grado de alteración. En general, este tipo de vegetación predomina en las zonas que, por su accesibilidad, reciben más presencia humana (SMA, 2004).

Las zonas dedicadas a las actividades agrícolas únicamente se restringen al 0.41% del territorio de la microcuenca, se encuentran ubicadas en la parte media y baja. El área urbana y los asentamientos humanos abarcan el 1.09% de la superficie y se ubican principalmente en la parte baja de la microcuenca (Ávila, 2005).

3.1.8. Tenencia de la tierra.

La mayor parte del área rural de la microcuenca corresponde a la comunidad de la Magdalena Atlitic, ya que ocupa el 68.77% del territorio (Figura 13). Este núcleo agrario actualmente está constituido por 1,779 comuneros y la tenencia de la tierra es de tipo comunal. (SMA, 2004).

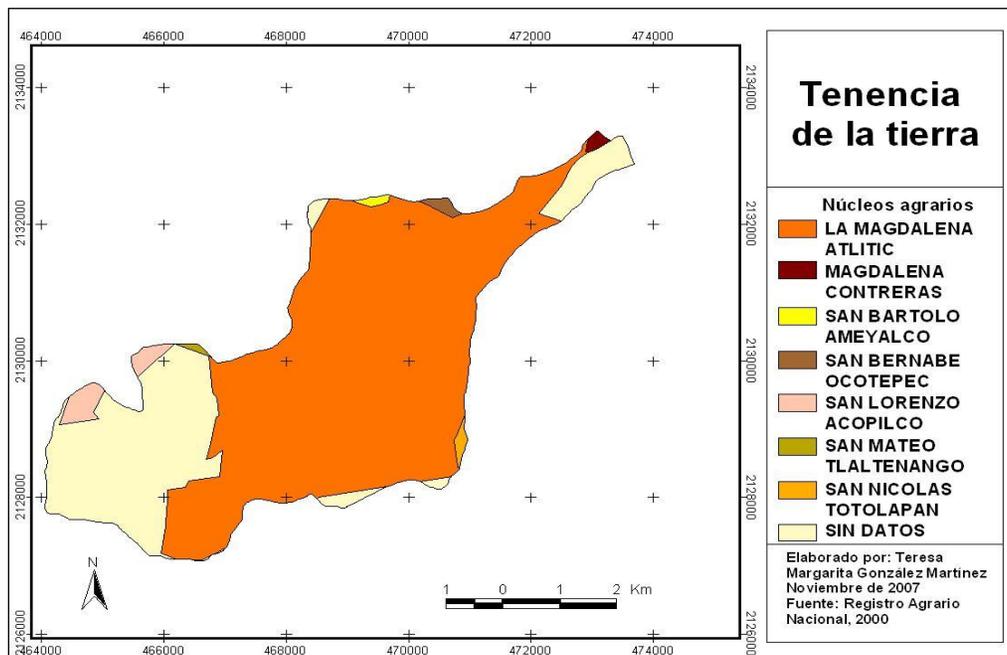


Figura 13. Núcleos agrarios cuyos territorios se ubican parcialmente dentro de la microcuenca.

Además de esta comunidad, dentro del territorio se encuentran algunos terrenos que corresponden a los ejidos de San Bartolo Ameyalco, San Nicolás Totolapan, San Bernabé Ocoatepec, San Lorenzo Acopilco, Magdalena Contreras y San Mateo Tlaltenango. En la parte baja de la microcuenca se localizan zonas de propiedad privada (Ávila, 2002; RAN, 2000b).

3.1.9. Población y vivienda.

El área urbana de la microcuenca se localiza en la parte baja del territorio. Tiene una población aproximada de 5,336 habitantes. Sólo el 36% de la población tiene una instrucción posprimaria y el 3.56% es analfabeta. Hay 1,281 viviendas habitadas, de las cuales 1,117 tienen drenaje conectado a la red pública y 143 a fosa séptica. Tienen energía eléctrica 1,262 viviendas particulares y 1,067 tienen agua entubada de la red pública (INEGI, 2008).

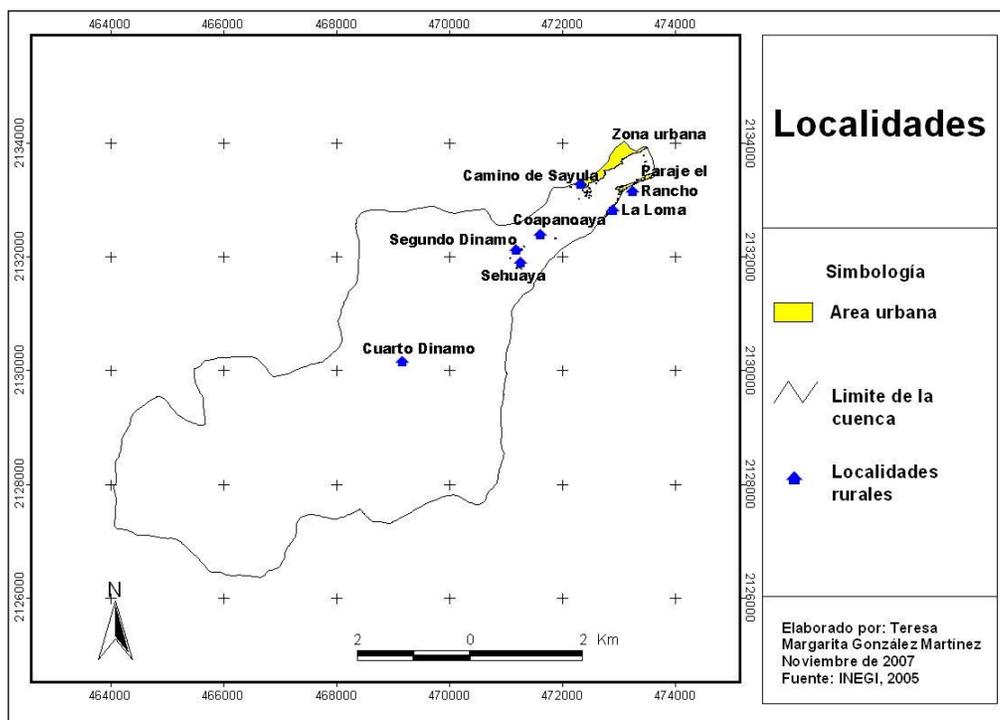


Figura 14. Localidades y área urbana dentro de la microcuenca.

Además de la población urbana, dentro de la microcuenca se localizan algunas localidades rurales con una población total de 66 habitantes, asentados en 7 localidades (Figura 14). Existen 29 viviendas pero solo 19 de ellas se encuentran habitadas. Solo una vivienda presenta agua entubada de la red pública

y drenaje, el resto de las viviendas habitadas tiene fosa séptica. En cuanto a la energía eléctrica, 14 viviendas poseen este servicio (INEGI, 2005).

3.1.10. Actividades productivas.

Dentro de las actividades productivas primarias, el sector agrícola ha tenido una transformación en algunas actividades, como es el caso de la producción de maguey, que fue importante en esta zona para la elaboración de pulque y que hoy en día ya no se practica. Algunos de los cultivos que siguen practicando son el de la papa, avena, haba y veza de invierno. Bajo invernadero se producen principalmente gladiolas y clavel. También se practica la agricultura de temporal con cultivos de maíz y avena localizados en los parajes de Cazulco y Xixalpa, los Llanos de Acopilco, Temamatla y Los Cajones, donde de acuerdo al Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal ésta actividad no está permitida (SMA, 2004).

Las actividades pecuarias son poco realizadas en la comunidad, en 1998 CORENA dio apoyo a distintos productores para la crianza de ganado ovino, en la actualidad existen entre 200 y 300 cabezas de ganado vacuno y ovino. Se practica el libre pastoreo identificado algunas zonas en donde prevalece, como es a lo largo del cauce del río Cieneguillas, entre los parajes Cieneguillas y La Compuerta, así como al poniente de la zona de la microcuenca, entre los cerros Cruz de Cólica y El Charco, además de Plaza de Gallos, el Triángulo, Cañada de Cuervos, Las Sepulturas, Corral de González y Llanos de Acopilco (SMA, 2004). Los tipos de de ganado que se trabajan son: el ovino, el caprino y el vacuno (Ávila, 2002).

Las actividades forestales no se practican debido a que en el año del 2000 entró en vigor el Programa General de Ordenamiento Ecológico para el Distrito Federal, siendo este un instrumento de carácter normativo para la zona de conservación ecológica del Distrito Federal, de la cual forma parte la microcuenca. Sin embargo, existen problemas de arbolado muerto en zonas como el Paraje Cabeza de Toro, Cineguillas y Cerro de San Miguel y arbolado plagado por el gusano barrenador y el descortezador en el paraje Cruz de Colostitla y cerca de la presa Cieneguillas (SMA, 2004).

Otras actividades que se realizan en la zona son el comercio y diversos servicios para la actividad turística, así como la piscicultura y la silvicultura.

Cabe señalar que dentro de la zona urbana de la microcuenca, el 39% de la población es económicamente activa, de la cual el 11% se encuentra empleada en el sector secundario y el 26% en el terciario. El 30% se encuentra ocupado como empleado u obrero y el 0.9% como jornalero o peón (Jujnovsky, 2003).

3.2. Procedimiento metodológico.

Para cumplir con los objetivos de la tesis se siguió el siguiente esquema metodológico (Figura 15).

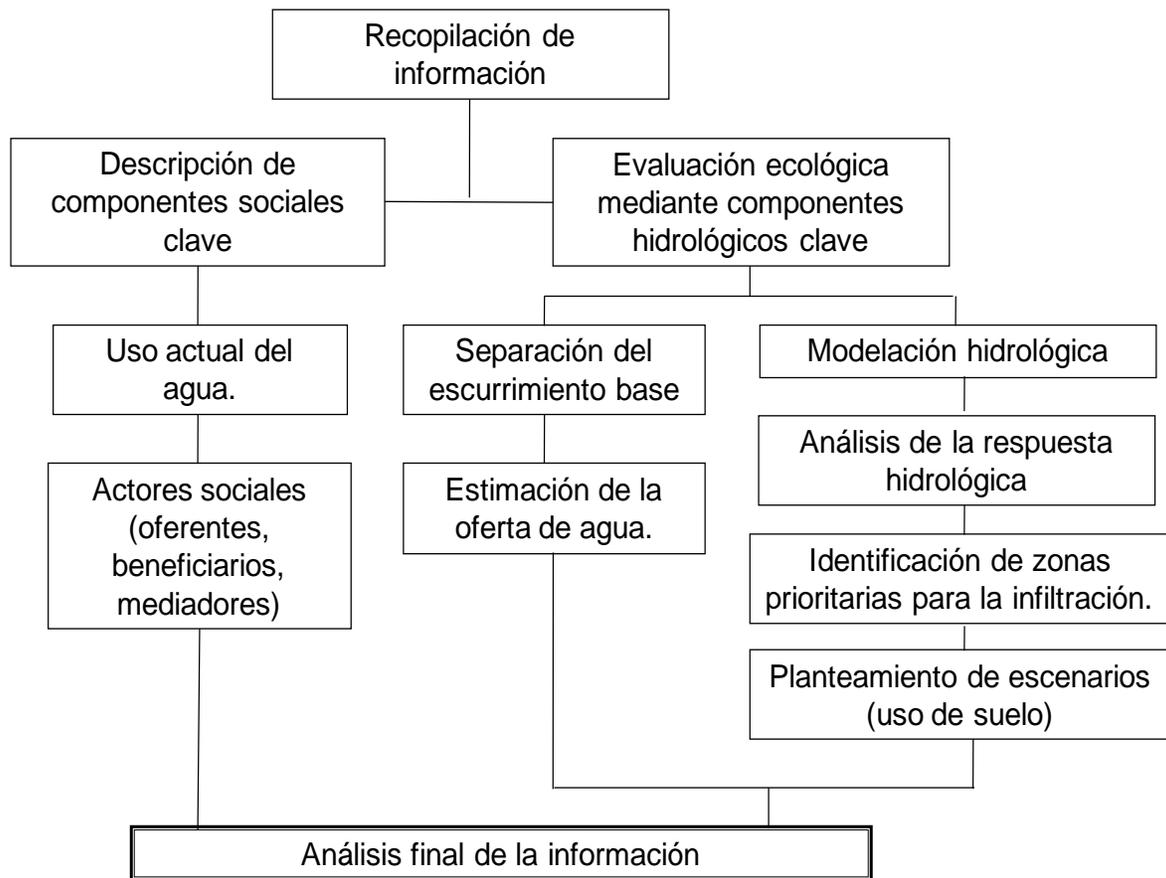


Figura 15. Esquema metodológico.

3.2.1. Recopilación y preparación de información.

La primera etapa de la presente investigación consistió en una intensa recopilación de información de estudios previos, registros, cartografía y bases de datos del área de estudio. Las principales fuentes de información fueron algunas

dependencias de gobierno como el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal. Asimismo, se contó con información generada por el equipo de investigación del Macroproyecto “Manejo de ecosistemas y desarrollo humano en la cuenca del río Magdalena, D.F.”, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dado que el estudio contempla el empleo de información hidrométrica, el parteaguas original de la microcuenca fue recortado para que la salida coincidiera con el punto en donde se encuentra ubicada la estación hidrométrica río Magdalena. Por esta razón sólo se contempló la información que se encontraba dentro del nuevo parteaguas.

3.2.2. Cuantificación de la oferta de agua.

La microcuenca tiene la enorme ventaja de contar con información hidrométrica, por lo que la oferta actual de agua que se produce a partir del caudal base se determinó a partir de los hidrogramas de escurrimiento registrados para los años 1999 a 2001 (DGCOH, 2001b; 2000b; 1999); para ello, se probaron distintos métodos de separación de hidrogramas con la finalidad de escoger el método más adecuado para el área de estudio. Con las pruebas realizadas se escogió el Filtro de Lyne y Hollick (1979):

$$q_f(i) = \alpha * q_f(i-1) + (1+\alpha)/2 * [q(i) - q(i-1)]$$

Donde, $q_f(i)$: Escurrimiento directo al tiempo i ,

$q_f(i-1)$: Escurrimiento directo al tiempo $i-1$,

$q(i)$: Caudal total al tiempo i ,

$q(i-1)$: Caudal total al tiempo $i-1$,

α : Parámetro de filtrado = 0.925 (\pm .025)

el cual se aplicó a los datos de caudal medio diario registrados para cada año mediante el sistema WHAT (Web-Based Hydrograph Analysis Tool) (Lim *et al.*, 2005). El parámetro de filtrado que se utilizó fue $\alpha = 0.950$, ya que esto permite calcular los valores más conservadores de escurrimiento base para este filtro.

Debido a que los filtros automatizados no discriminan entre días con lluvia y días sin lluvia, adicionalmente se realizó un filtrado manual, tomando como

escurrimiento base todo el flujo que se producía en los periodos de estiaje y los periodos en que no se excedía el umbral de precipitación. Asimismo, se realizó un filtrado mediante el método cóncavo, para los episodios aislados de lluvia que sobrepasaban el umbral de precipitación. Como umbral de precipitación se tomó un valor de 10 mm de lluvia acumulada, ya que este es un valor aceptable para la mayoría de las cuencas.

Para el análisis de los datos, adicionalmente se calculó la lámina de precipitación. En primer término se ubicó a las estaciones que tuvieran una influencia sobre el área de estudio y que contaran con registros de precipitación correspondientes a los años de estudio (1999 a 2001). El método empleado para definir la influencia de las estaciones fue el de Polígonos de Thiessen, encontrando únicamente tres estaciones que reunían las características necesarias (Figura 16). Las estaciones seleccionadas forman parte de la red automatizada de estaciones pluviométricas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Cuadro 8). Con la información obtenida se calcularon los volúmenes de precipitación y la precipitación media diaria, mensual y anual.

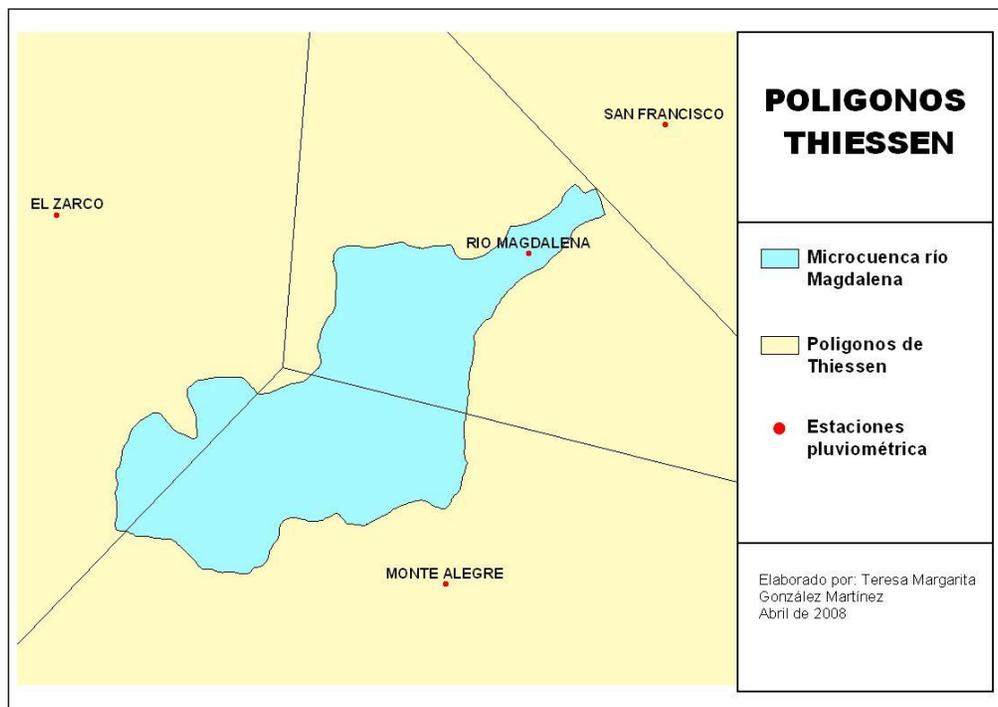


Figura 16. Delimitación de los polígonos de Thiessen y estaciones pluviométricas con influencia dentro de la microcuenca.

Cuadro 8. Estaciones pluviométricas seleccionadas y área de influencia según el método de Polígonos de Thiessen.

| Estación | Coordenadas | | Área de influencia (Km ²) |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | Longitud O | Latitud N | |
| 23 El Zarco | 99° 21´ 10.56004" | 19° 17´ 43.60172" | 3.30 |
| 25 Río Magdalena | 99° 15´ 52.63430" | 19° 17´ 19.68004" | 10.84 |
| 26 Monte Alegre | 99° 16´ 48.58886" | 19° 13´ 47.51804" | 14.78 |

Otros parámetros calculados fueron el tiempo de concentración y el coeficiente de escurrimiento diario, para lo cual se emplearon las siguientes fórmulas:

$$T_c = 0.26 (L / S^{0.35})^{0.75}$$

Donde: T_c: Tiempo de concentración (horas)

L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente media del cauce principal (m/m)

$$C = P_e / P_M$$

Donde: C: Coeficiente de escurrimiento

P_e: Lámina de escurrimiento directo

P_M: Lámina de precipitación

Con los valores estimados de escurrimiento directo y escurrimiento base, se estimó la aportación directa de la microcuenca en términos de la oferta hídrica o servicio ambiental de provisión de agua.

3.2.3. Descripción del uso y distribución actual del agua de la microcuenca.

Para establecer los usos del agua (potable y no potable) existentes dentro de la microcuenca, se llevó a cabo trabajo de campo mediante la aplicación de entrevistas semiestructuradas a personas que se dedican a diferentes actividades productivas en el área. Este tipo de herramienta es de gran utilidad en situaciones

en las que no hay buenas oportunidades para entrevistar a las personas (Vela, 2001).

Sin embargo, previamente se realizaron 5 entrevistas no estructuradas con actores sociales de la microcuenca (representantes de organizaciones sociales, instituciones de gobierno e instituciones educativas) a fin de obtener información preliminar que permitiera aplicar correctamente las entrevistas semiestructuradas. A pesar de la gran importancia que representa el trabajo de campo, lo que asegura un mejor acceso hacia la población sobre la cual se realizarán las entrevistas es la forma en que se tiene acceso a ella. En general cualquier entrevista debe ser precedida por un trabajo de campo preliminar en el cual el investigador establece la credibilidad y seriedad de la investigación, al tiempo que diagnostica la facilidad y/o complejidad para obtener la entrevista. En la entrevista no estructurada el papel del entrevistador tiende a ser pasivo y consiste en ofrecer estímulos necesarios para el desenvolvimiento del entrevistado (*Op. cit.*).

Una vez que se realizó el trabajo de campo previo, se aplicaron 23 entrevistas semiestructuradas entre los diferentes ámbitos productivos de la zona, de las cuales 14 correspondieron a comerciantes de comida de puestos fijos y semifijos, 2 a proveedores del servicio de baños públicos, 5 a productores de truchas, 2 a responsables de proyectos ecoturísticos y una se realizó en un invernadero de rosas. Para realizar las entrevistas se utilizó un guión que sirvió de base en dicho proceso, las preguntas estuvieron enfocadas a saber las actividades en las que se aprovecha el agua, los volúmenes y sus problemáticas (Anexo 1).

Este tipo de entrevistas tiene un fundamento principalmente cualitativo, aunque a través de su interpretación también se puede generar información cualitativa. Sin embargo, su principal objetivo es reconstruir la realidad, tal y como la observan los actores de un sistema social previamente definido (Hernández *et al.*, 2003).

Cabe señalar que no fue posible realizar entrevistas que representaran a las actividades de agricultura de temporal y ganadería, por lo que la información presentada es de tipo bibliográfico.

Una vez que se conto con la información de las entrevistas y la información bibliográfica pertinente, se realizó la descripción de las actividades en que el agua es utilizada, en algunos casos se realizaron promedios en función de las respuestas obtenidas, para dar una mejor representación de la información, sin embargo los datos no pueden ser manejados como si fueran encuestas u otra herramienta cuantitativa.

Por otro lado, para el caso del aprovechamiento de agua para uso doméstico, en las localidades rurales que se encuentran dentro de la microcuenca, se utilizaron datos de población y vivienda (INEGI, 2005). Esto con la finalidad de establecer un consumo aproximado de agua en función de la dotación media (l/hab/día) para zonas socioeconómicas de tipo popular (SACM, 2005).

Para describir el aprovechamiento externo de agua de la microcuenca, se realizó una revisión bibliográfica en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. De esta manera se definieron las colonias que son beneficiadas con el agua de la microcuenca, cual es el proceso de distribución y cuál es la situación de abastecimiento de agua potable. También se analizaron los registros de la planta potabilizadora Río Magdalena y el volumen captado desde los manantiales aforados de la microcuenca.

3.2.4. Identificación y caracterización de actores sociales.

Esta etapa metodológica consistió básicamente en la identificación y caracterización de los actores sociales que pueden fungir como oferentes, beneficiarios y mediadores dentro de un esquema de PSA. Se apoyó en las entrevistas no estructuradas descritas en el punto anterior (3.2.3), así como en información bibliográfica.

En este caso las entrevistas no estructuradas sirvieron para hacer un primer sondeo de actores, sin embargo no se realizó un trabajo a profundidad por lo que es muy posible que existan otros actores involucrados.

Oferentes. Se refiere a los actores sociales que son propietarios y (o) que hacen uso de las tierras en las cuencas donde se está generando el servicio ambiental, y que podrían implementar acciones de conservación y protección en las mismas a cambio de una compensación (Marín et al., 2006; Pérez et al., 2002).

Por ello, se describen algunos grupos sociales organizados que se encuentran dentro de la microcuenca, mismos que fueron identificados en la etapa previa de entrevistas no estructuradas utilizadas para la descripción del uso y distribución actual del agua de la microcuenca.

Beneficiarios. Dentro de un esquema de PSA los beneficiarios son los actores sociales que están dispuestos a pagar por el mantenimiento o la mejora de un servicio ambiental.

Para el caso del servicio ambiental de provisión de agua, los beneficiarios son los potenciales consumidores o usuarios del agua que se genera en una cuenca, por lo que su identificación es relativamente sencilla, dado que el servicio es muy evidente y la distribución institucionalizada del agua permite sondear el área de influencia de una determinada fuente de agua (Marín et al., 2006; Porras, 2003; Pérez et al., 2002).

En este caso, se describe socioeconómicamente a la población que actualmente está siendo beneficiada con la distribución de agua potable de la microcuenca. Misma que fue identificada previamente de acuerdo a la red de distribución del agua del **Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM)** (DGCOH, 2002; DGCOH, 2001a; DGCOH, 2000a).

Una vez que se identificaron las colonias beneficiadas, se calculó su población a nivel de **Unidades de Geoestadística Básica (AGEB)** y se realizó una breve caracterización socioeconómica (INEGI, 2008; 2000a).

Adicionalmente se calculó un consumo de agua promedio, en función del nivel socioeconómico de la población y la dotación media (l/hab/día) para zonas socioeconómicas de tipo popular (SACM, 2005).

Mediadores. Estos actores sociales tienen el papel de facilitar, moderar, interceder, ayudar y regular el proceso de gestión, durante las etapas de planeación, organización, negociación, operación y evaluación del mecanismo de pago por servicios ambientales (Blauert y Zadek, 1999). Asimismo, pueden llegar a realizar actividades de asesoría técnica, capacitación, e incluso asumir tareas esenciales para la operación de los esquemas de PSA (Merino, 2005).

En este sentido, se hizo una revisión de las instituciones que tienen una influencia en la toma de decisiones dentro de la microcuenca y se describió el posible papel que podrían desempeñar como mediadores dentro de un esquema de PSA. En primer término se seleccionó a las instituciones de los tres órdenes de gobierno que tienen funciones relacionadas con la conservación de los ecosistemas, con el recurso agua o con algún programa de PSAH. Adicionalmente, se incluyeron otras instituciones académicas que por sus actividades de investigación tienen alguna relación con la microcuenca del río Magdalena.

3.2.5. Modelación hidrológica.

Para la modelación hidrológica se empleó el modelo distribuido **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool) mediante el uso de la interfase AvSWAT versión 2003, para ArcView 3.2. De manera general, se llevaron a cabo 6 etapas de trabajo que incluyeron:

- preparación de información cartográfica y bases de datos de entrada
- ingreso de información y corrida del programa
- calibración de parámetros
- validación
- análisis estadístico
- elaboración de escenarios

Durante la etapa de preparación se adecuó la información cartográfica y las bases de datos a los formatos que pide la interface para ser ingresados durante la corrida del programa. Los datos de entrada se describen en el anexo 3.

Para la calibración se empleó la información generada por el programa para el año 1999, así como los registros hidrométricos de la estación Río Magdalena y los datos generados a partir de la etapa de separación del escurrimiento base, del mismo año.

El modelo genera bases de datos anuales, mensuales y diarios para diversos parámetros, entre ellos: precipitación (PREC), escurrimiento directo (SURQ), escurrimiento base proveniente del acuífero no confinado (GWQ), escurrimiento lateral subsuperficial (LATQ), contenido de agua en el suelo (SW),

evapotranspiración actual (ET), evapotranspiración potencial (PET) y rendimiento de agua (WATER_YIELD) que es la suma de SURQ+ LATQ+ GWQ menos las pérdidas por transmisión. Esto permite comparar los datos observados con los esperados.

En primer término se realizó una calibración anual que comparó el rendimiento total de agua, el escurrimiento directo y el escurrimiento base; en este último se incluyó al escurrimiento proveniente del acuífero no confinado y al escurrimiento lateral subsuperficial. Una vez que estos parámetros mostraron un comportamiento semejante con los valores observados, se procedió a afinar la calibración de los parámetros mediante los datos mensuales.

Los parámetros que ayudaron a corregir las curvas esperadas fueron los siguientes:

OV_N. Número de Curva Numérica

HYDGRP.Sol. Grupo hidrológico del suelo, el modelo lo emplea para asignar un valor de curva numérica.

SOL_AWC.Sol. Capacidad de agua disponible en el suelo.

GW_DELAY.Gw. Retraso del caudal proveniente del acuífero no confinado.

ALPHA_BF.Gw. Factor alfa del escurrimiento base.

LAT_TTIME.Hru. Tiempo de viaje del escurrimiento lateral subsuperficial.

SLSUBBSN.Hru. Longitud promedio de la pendiente.

ESCO.Hru. Factor de compensación de la evapotranspiración del suelo.

FFCV.Bsn. Contenido inicial de agua en el suelo.

Para la etapa de validación se emplearon los datos correspondientes al año 2000. La información arrojada en la calibración y la validación se sometió a un análisis estadístico mediante el índice de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \overline{Q_o})(Q_{c_i} - \overline{Q_c})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{c_i} - \overline{Q_c})^2}} \right]^2$$

Donde: NTD: índice de Nash-Sutcliffe

R^2 : coeficiente de determinación

Q_{o_i} : escurrimiento observado al tiempo i

Q_{c_i} : escurrimiento modelado al tiempo i

$\overline{Q_o}$: escurrimiento medio observado

$\overline{Q_c}$: escurrimiento medio modelado

Con la información generada por la modelación en la etapa de calibración, se analizó la respuesta hidrológica de la microcuenca y se identificaron las UE que representan una mayor importancia por sus características de infiltración y escurrimiento.

Por último se modificó el mapa de vegetación para establecer dos escenarios alternos de conservación de la cubierta vegetal, uno con una tendencia de recuperación (Escenario 1) y otro con una tendencia de deterioro (Escenario 2).

Para el escenario 1, todos los tipos de vegetación que presentaban algún grado de deterioro, pero que dominaba su vegetación original, se transformaron a bosques conservados. Los usos de suelo y vegetación con un alto grado de deterioro como los pastizales inducidos, las zonas de agricultura de temporal o aquellos en los que dominaba la vegetación secundaria, fueron transformados en bosques artificiales. Finalmente, las zonas urbanas y asentamientos urbanos se mantuvieron sin cambio.

Para el escenario 2, todos los bosques conservados se transformaron en bosque con vegetación secundaria o pastizal, los tipos de vegetación que ya presentaban vegetación secundaria o pastizal se transformaron en pastizales y se aumento la mancha urbana.

4. RESULTADOS

4.1. Cuantificación de la oferta de agua.

Durante los años 1999 al 2001, se registró un caudal promedio de 703.2 l/s, del cual el 81.29% correspondió al agua generada por escurrimiento base y el 18.70% se generó a partir de escurrimiento directo. Sin embargo, la distribución del caudal no es uniforme a lo largo del año, disminuye drásticamente durante los meses de estiaje ya que existe una marcada variación estacional de la precipitación.

La época de lluvias comienza a mediados de abril y termina a mediados de octubre con una precipitación promedio mensual de 150.55 mm. La época de secas abarca los meses restantes y únicamente se precipitan 5.66 mm en promedio al mes. En la figura 17 se puede apreciar la precipitación mensual acumulada y su distribución a lo largo del año.

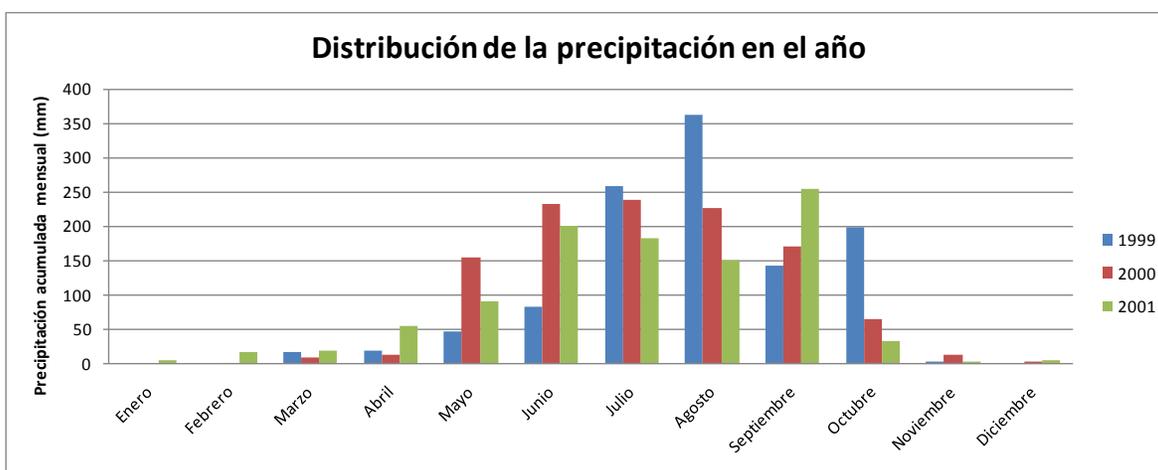


Figura 17. Precipitación mensual acumulada para los años 1999 a 2001.

Este patrón de humedad también es determinante para que los mayores volúmenes de escurrimiento base se concentren en los meses de lluvia. Sin embargo, gracias a las características de la microcuenca, el caudal del río se mantiene durante todo el año permitiendo un aprovechamiento continuo del agua. En promedio, durante los años 1999 y 2000, el escurrimiento base en la época de lluvias fue de 810 l/s y durante la época de estiaje fue de 488 l/s. No obstante es

importante señalar, que los hidrogramas presentaron patrones de distribución de sus escurrimientos muy distintos entre sí.

A partir de los procedimientos de separación de escurrimientos, durante el año 1999, se registro una lámina de escurrimiento anual total de 636.25 mm, de los cuales el volumen de agua ofertado por escurrimiento base fue de 513.29 mm. Esto equivale a un caudal medio de 470.28 l/s (14,790,182.9 m³ anuales) que se produjeron al interior de la microcuenca, a partir de los escurrimientos subsuperficiales y de flujo subterráneo (Figura 18). Es decir, de los 1,117.77 mm de lluvia que cayó sobre la microcuenca, el 46% se convirtió en escurrimiento base, mientras que únicamente el 11% escurrió de manera directa. La precipitación media diaria en este año fue de 3.06 mm.

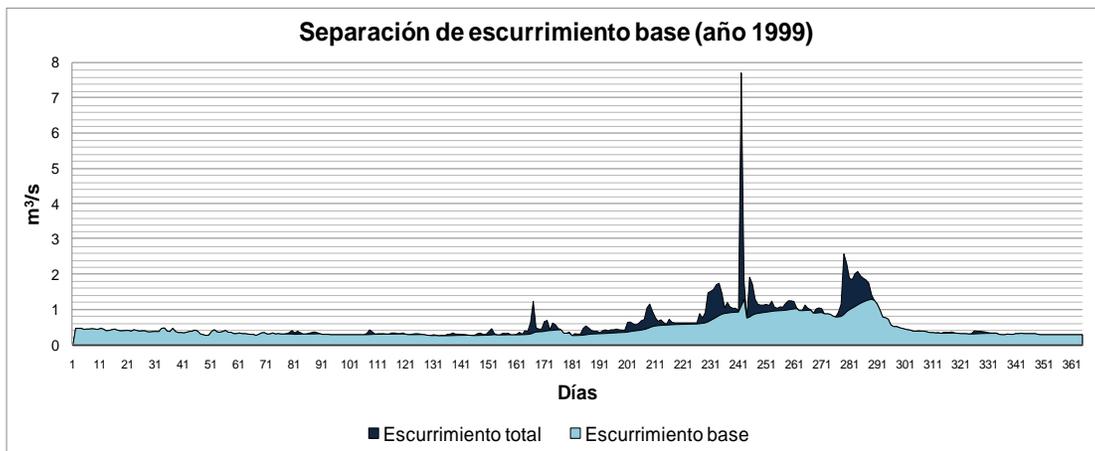


Figura 18. Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 1999.

En el año 2000 se presentó un mayor volumen de escurrimiento, con una lamina de escurrimiento anual de 1,080.15 mm y un escurrimiento base de 908.76 mm. De esta manera, el caudal ofertado por escurrimiento base alcanzó un gasto medio de 840.05 l/s (26,185,436.48 m³ en total) que se produjeron a lo largo de todo el año (Figura 19). Tomando en cuenta la lámina anual de precipitación que fue de 1,122.68 mm, el 80.94% de ella se convirtió en escurrimiento base, mientras que el 15.26% escurrió de manera directa. La precipitación media diaria en este año fue de 3.06 mm, al igual que durante el año 1999.

La información hidrométrica que se tiene para el año 2001 presenta muchos días sin información, por lo que el volumen total anual se ve afectado y no

pudo ser analizado, sin embargo cabe señalar que los datos existentes muestran un menor volumen de escurrimiento (Figura 20), la precipitación acumulada en este año fue de 1006.491 mm y tuvo un promedio diario de precipitación más bajo que los años anteriores, con un valor de 2.7 mm.

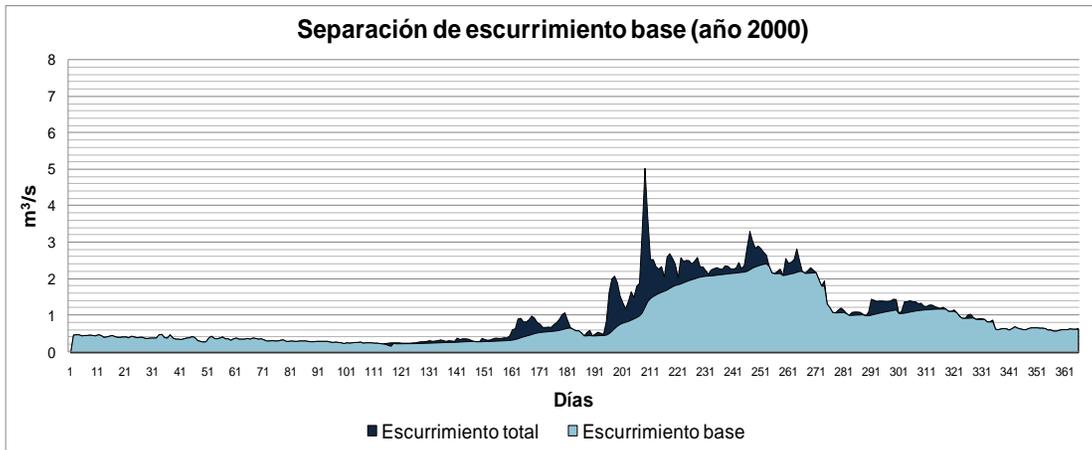


Figura 19. Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 2000.

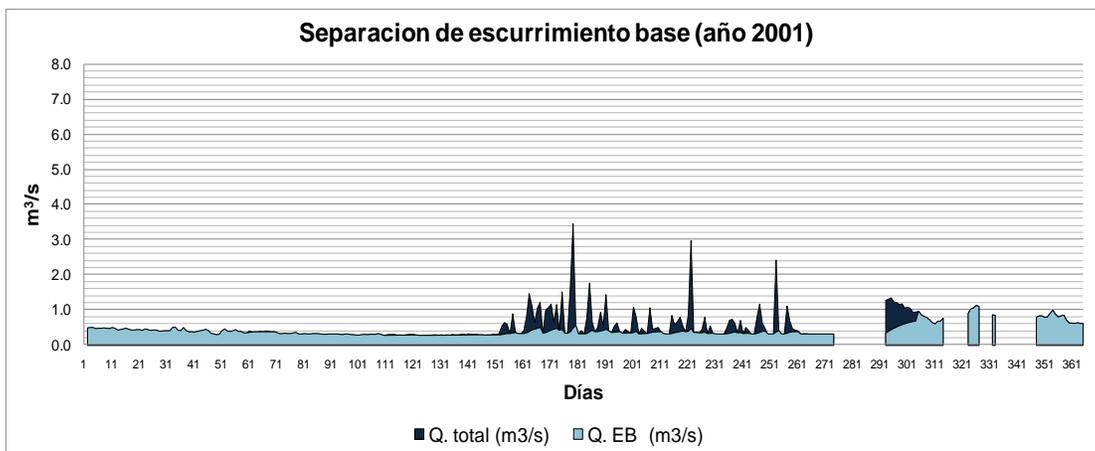


Figura 20. Hidrograma con separación de escurrimientos para el año 2001.

La microcuenca presenta un tiempo de concentración de 1.9 Hrs, lo cual significa que ese tiempo tardaría en llegar el agua desde el punto más distante hasta la salida de la cuenca. Este dato es importante, ya que cuando se presenta un tiempo de concentración bajo como éste, entre mayor sea el volumen producido por escurrimiento directo, menor será la posibilidad de aprovechar el agua de la microcuenca, debido a la velocidad con que sale de la misma.

Los coeficientes de escurrimiento promedio anual calculados son de 0.10 para el año 1999, 0.15 para el 2000 y 0.12 para el 2001. Estos valores indican que de toda la precipitación que cae en la microcuenca, entre un 10 y 15% se convierte en escurrimiento total, estos valores contrastan notablemente, por ejemplo con terrenos cultivados, en donde se pueden alcanzar valores de hasta 0.82 debido a elevados valores de esorrentía directa (SAGARPA, 2005).

4.2. Descripción del uso actual del agua de la microcuenca.

La cantidad y calidad del agua que se produce dentro de la microcuenca río Magdalena ha permitido que ésta sea aprovechada para distintos usos, beneficiando a la población que realiza actividades productivas dentro de su territorio, así como a quienes se abastecen de agua para uso doméstico dentro y fuera de éste, gracias a los numerosos manantiales y al caudal del río.

4.2.1. Uso y aprovechamiento del agua al interior de la microcuenca.

Actualmente, dentro de la microcuenca existen 6 actividades productivas en las que se utiliza el agua. Además, es empleada para uso domestico en las localidades que se distribuyen en el área. Su aprovechamiento se describe a continuación.

Comercio y servicios. En el área de estudio se distribuyen alrededor de 65 puestos fijos y semifijos en los que se comercian alimentos y bebidas, y se ofrece el servicio de baños públicos. De ellos el 12% realizan actividades durante toda la semana y el 88% trabajan únicamente fines de semana y días festivos. Las actividades en las que se emplea el agua son lavado de trastes, elaboración de alimentos, limpieza de comercios y descargas de sanitarios. De acuerdo a la información recabada, la cantidad de agua utilizada es muy variable de un puesto a otro y depende del número de días que laboran y las actividades que realizan, por lo que se emplea un promedio aproximado de 0.019 l/s en los puestos que trabajan diariamente y 0.042 l/s en los puestos que laboran fines de semana.

En general las necesidades de agua que éste sector requiere para realizar sus actividades se cubren al 100%, siendo su principal fuente de aprovechamiento algunos manantiales de la zona (92%), los cuales son captados desde su origen

mediante mangueras que se conducen hasta los negocios; únicamente el 8% de los comercios ocupan el agua directamente del cauce del río Magdalena. Entre las problemáticas, relacionadas con el agua, que perciben los entrevistados, está el aprovechamiento desordenado de los manantiales, la falta de infraestructura para la distribución del agua y el manejo de las descargas de aguas residuales, así como la disminución del caudal del río durante los últimos 10 años.

Piscicultura. Actualmente existen siete unidades familiares de producción de trucha que se distribuyen principalmente en el segundo y cuarto dínamo (Ramos, 2008). Se realizaron entrevistas en 5 de ellas, encontrándose que ésta actividad se realiza todo el año, se dedican principalmente a la engorda y mantenimiento de las truchas; únicamente en un caso realizan actividades de crianza. Sus instalaciones consisten en 21 estanques de diversas dimensiones con capacidades de almacenamiento de entre 300 y 30,000 litros de agua, la cual se mantiene circulando todo el tiempo y finalmente es vertida al cauce del río.

La mayoría de los estanques son abastecidos con agua de manantial (60%), aunque cabe señalar que los de mayor dimensión son llenados con agua del río. Para este uso del agua, dos unidades de producción tienen concesión otorgada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dentro de las problemáticas que manifiesta éste sector, está la mortandad y el escape de truchas durante la época de lluvias, así como el taponamiento de los tubos de agua y azolve de los estanques debido al arrastre de sedimentos que ocurre durante las tormentas; así mismo refieren que el caudal del río ha ido disminuyendo con el tiempo.

Ecoturismo. Ésta actividad productiva es la más reciente en la zona, actualmente existen dos desarrollos ecoturísticos que ofrecen actividades de campismo, visitas guidas, cabañas, etc. En sus instalaciones se utiliza el agua para elaborar alimentos, para abastecer regaderas y para lavar trastes; en el caso del parque ecológico PAIDOS tienen baños ecológicos, por lo que no utilizan agua para los sanitarios. Se abastecen de 2 manantiales que cubren sus necesidades a lo largo de todo el año, la cantidad de agua que aprovechan es muy variable, sin embargo en promedio ocupan 0.0016 l/s.

Floricultura de invernadero. Ésta actividad se realiza entre el primer y segundo dinamo, es una cooperativa familiar que se dedica al cultivo de rosas de corte, la mayor parte de la producción se obtiene en invernaderos con riego rodado. Durante la época de estiaje se utilizan en promedio 0.049 l/s de agua a la semana para este fin, reduciéndose a la mitad durante la época de lluvias. El agua es bombeada desde el río hasta la zona de producción. Emplean algunos agroquímicos para control de plagas y para fertilizar, cuyos residuos pueden llegar al caudal del río por su cercanía al mismo.

Ganadería. Actualmente existen aproximadamente 100 cabezas de ganado que se distribuyen en la parte media y alta de la microcuenca, sin embargo pertenecen a comunidades vecinas que pastorean en el territorio a cambio de una cabeza al menos una vez al año, cuando se realizan fiestas en la comunidad (Ramos, 2008). Dado que el ganado se encuentra suelto, se abastece de agua en los arroyos y el río de la microcuenca, sin embargo la cantidad es despreciable dado el número de animales que existen.

Agricultura. Las actividades agrícolas se han ido abandonando paulatinamente, en la actualidad únicamente se realizan de forma artesanal para el autoconsumo (Ramos, 2008). De acuerdo a la cartografía más reciente, existen poco menos de 12 ha con agricultura de temporal, por lo que el aprovechamiento de agua no se realiza directamente de los cauces de la microcuenca.

Uso doméstico. En las localidades rurales que existen dentro de la microcuenca viven alrededor de 66 personas, tomando en cuenta la dotación media de agua para zonas socioeconómicas de tipo popular, que es de 122 l/hab/día (SACM, 2005), actualmente se realiza un aprovechamiento aproximado de 0.09 l/s por este concepto. La principal fuente de abastecimiento es la captación de manantiales; de las 19 viviendas habitadas que se distribuyen en la zona, sólo una cuenta con toma de agua potable (INEGI, 2005).

Por otro lado, en la zona urbana que se encuentra hacia la salida de la microcuenca hay aproximadamente 5,336 habitantes, lo que representaría un aprovechamiento de 7.5 l/s, en este caso la principal fuente de abastecimiento son las tomas domiciliarias (82.63%), sin embargo también existen viviendas que no cuentan con una toma de agua o tienen que acarrearla de llaves públicas o de

otras viviendas cercanas (INEGI, 2008). En general existen graves problemas de distribución por lo que en el mejor de los casos el servicio es otorgado por tandeos, en otros casos ni siquiera existe red de agua potable, esto a consecuencia de que son colonias que se originaron como asentamientos irregulares. Las colonias cuyo territorio se ubican parcialmente dentro del límite de la microcuenca son: La Mesita, San Nicolás Cazulco y La Carbonera, (DGCOH, 2001a).

4.2.2. Uso y distribución externa del agua de la microcuenca.

El agua que se produce dentro de la microcuenca del río Magdalena, es aprovechada mediante la captación de algunos manantiales y de su cauce principal, para beneficiar a 21 colonias de la delegación Magdalena Contreras, que se encuentran fuera de la microcuenca (Figura 21). Por la forma en que es captada el agua, éste aprovechamiento se divide en dos subsistemas de infraestructura hidráulica: subsistema Reynaco y subsistema río Magdalena.

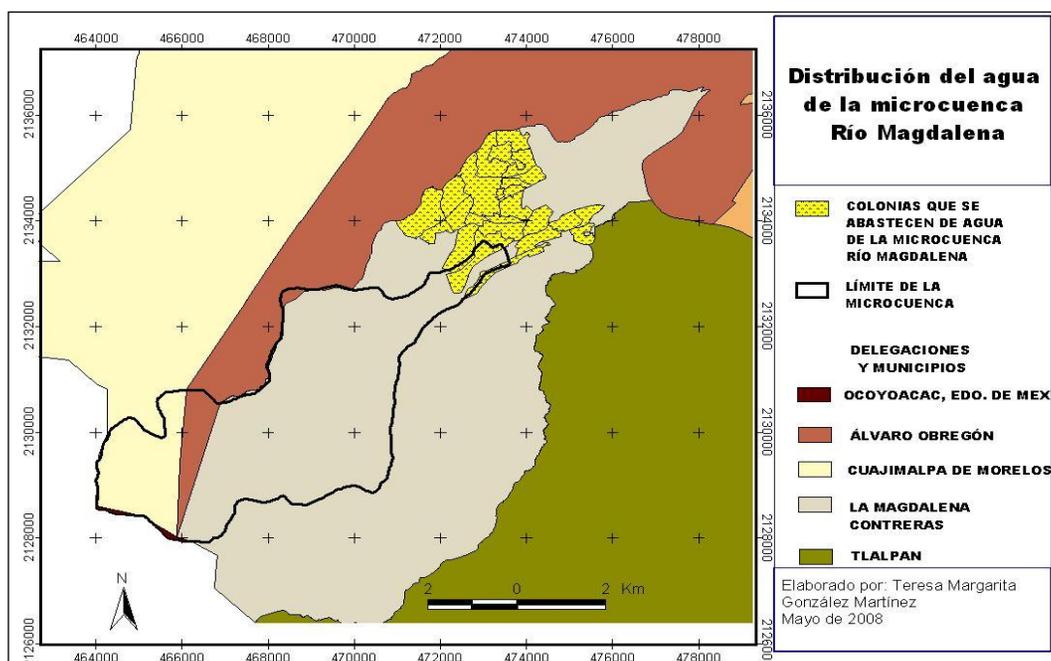


Figura 21. Colonias beneficiadas con el servicio ambiental de provisión de agua.

Sin embargo, es necesario aclarar que una vez captada el agua, su distribución se realiza mediante una complicada red de abastecimiento, de la cual

es difícil definir claramente su área de influencia. Algunas de las colonias que son beneficiadas por el servicio ambiental de provisión de agua de la microcuenca río Magdalena, también reciben aportaciones provenientes de otras fuentes de abastecimiento, como son el Sistema Lerma y algunos manantiales ajenos a la microcuenca (Cuadro 9). Las colonias estudiadas presentan problemas de abastecimiento, por lo que el servicio de agua potable que se les brinda es por tandeos de aproximadamente 12 horas al día y algunas de ellas tienen una cobertura parcial en su red de distribución (DGCOH, 2002; DGCOH, 2001a; DGCOH, 2000a).

Cuadro 9. Fuentes de abastecimiento de las colonias que son beneficiadas por el servicio ambiental de provisión de agua de la microcuenca río Magdalena.

| COLONIA | FUENTES DE ABASTECIMIENTO | | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | Subsistema río Magdalena | Subsistema Reynaco | Otros manantiales | Sistema Lerma |
| Ampliación Lomas de San Bernabé | * | | * | |
| Ampliación Potrerillo | * | | | |
| Atacaxco | * | | | |
| Barranca Seca | * | * | | |
| Barros Sierra | * | | | |
| El Rosal | * | * | | |
| El Tanque | * | | | * |
| Huayatla | * | | * | |
| La Carbonera | * | | | |
| La Concepción | | * | | |
| La Magdalena | * | * | | |
| Las Cruces | * | | * | * |
| Las Palmas | * | | | |
| Lomas de San Bernabé | * | | * | |
| Los Padres | * | | | |
| Potreriillo | * | * | | |
| Pueblo Nuevo Alto | * | * | | |
| Pueblo Nuevo Bajo | * | * | | |
| San Bernabé Ocotepéc | * | | * | * |
| Tierra Unida | * | | | |
| Vista Hermosa | * | | | |

El subsistema Reynaco se abastece de los escurrimientos de cinco manantiales que se ubican al norte de la microcuenca (Figura 22), mediante cajas de captación y dos líneas de conducción, la primera de ellas proviene de los manantiales Ventanas, Cruz de Oscar y Portillo de Gallinas; la segunda se abastece de los manantiales Agua de Tepozán y Los Pericos. Estas dos líneas surten al tanque La Carbonera y posteriormente al tanque Reynaco, a partir de este punto el agua pasa a varios tanques que abastecen a las colonias Pueblo Nuevo Alto, Pueblo Nuevo Bajo, Barranca Seca, El Rosal, La Concepción, La Magdalena y Potrerillo.

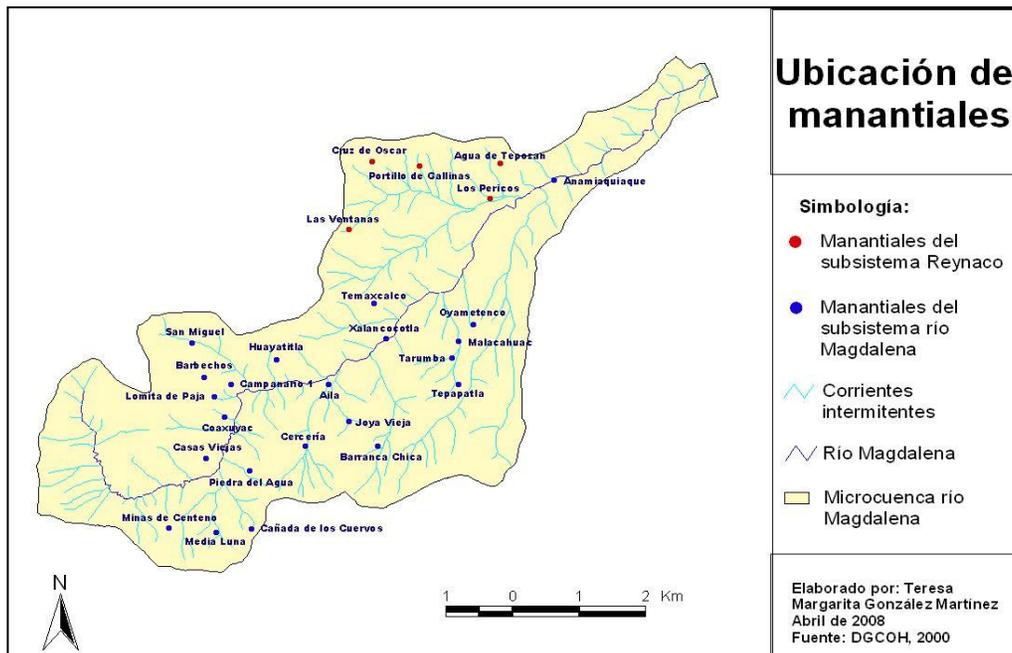


Figura 22. Fuentes superficiales de agua en la microcuenca del río Magdalena.

La cantidad de agua que se aprovecha por medio del subsistema Reynaco es variable a lo largo del año, sin embargo se tienen algunos aforos trimestrales de los manantiales que lo integran, los cuales indican que el volumen medio aproximado de aprovechamiento es de 14.8 l/s, sin contar el volumen que aporta el manantial Pericos ya que no ha sido aforado (DGCOH, 2002; DGCOH, 2001a; DGCOH, 2000a).

El subsistema río Magdalena está integrado por el caudal que fluye a través del río Magdalena, el cual es alimentado por los escurrimientos

provenientes de la microcuenca y de los numerosos manantiales con que cuenta (Figura 22). Este subsistema aprovecha parte del caudal del río Magdalena a través de una planta potabilizadora ubicada a la altura del Primer Dinamo, que cuenta con una capacidad media de operación de 200 l/s (DGCOH, 2000c). El agua ya potabilizada es almacenada en el tanque Angulo y distribuida posteriormente, a través de una serie de tanques, hacia la red de agua potable de varias colonias de la delegación Magdalena Contreras (DGCOH, 2002; DGCOH, 2001a; DGCOH, 2000a). El volumen medio de agua aprovechado en este subsistema, entre los años 1990 a 2004, fue de 194 l/s (SACM, 2005).

4.3. Identificación y caracterización de actores sociales.

4.3.1. Oferentes.

Dentro de la microcuenca existen varios grupos organizados que tienen relación con las actividades que se realizan en ella, por lo que podrían fungir como oferentes dentro de un esquema de PSAH. A continuación se describen los actores sociales que podrían cumplir con este papel.

Núcleos agrarios. Dentro de la microcuenca se distribuye parte del territorio que corresponde a siete grupos agrarios distintos, de los cuales la mayor parte del área pertenece a la comunidad de La Magdalena Atlitic (Cuadro 10). Dado que el resto de núcleos agrarios se encuentran poco representados en la zona, no se describirán. Cabe señalar que una importante extensión de territorio se encuentra en litigio entre la comunidad antes mencionada y otras comunidades agrarias como son San Nicolás Totolapan y San Mateo Tlaltenango.

La comunidad de La Magdalena Atlitic está integrada por 1,779 comuneros, de los cuales 250 asisten a las asambleas de forma regular y 800 se presentan a las votaciones. La comunidad se organiza de forma autónoma, se reconocen dos tipos de comuneros, los de derecho y los de hecho; los primeros fueron censados y aparecen en el Registro Agrario Regional (RAN); los segundos corresponden a personas reconocidas como nativas que no están incluidas en el RAN o a sucesores de comuneros, que generalmente son familiares directos. El procedimiento que se utilizó para realizar el censo comunal fue poco claro, provocando que gente externa a la comunidad, proveniente del Distrito Federal y

otros estados de la república, quedara dentro del RAN, mientras que gente nativa no fue incluida; esto generó descontento entre la población y actualmente sigue siendo una causa generadora de conflictos. La asamblea es su máxima autoridad comunal, se reúnen el primer domingo de cada mes para conformar dicho órgano de gobierno (Ramos, 2008; Almeida *et al.*, 2007).

Cuadro 10. Núcleos agrarios cuyo territorio forma parte de la microcuenca del río Magdalena.

| NÚCLEOS AGRARIOS | ÁREA (Ha) | ÁREA (% en relación a la cuenca) |
|--------------------------------|------------------|---|
| Ejido San Mateo Tlaltenango | 4.79 | 0.17 |
| Ejido San Lorenzo Acopilco | 51.65 | 1.79 |
| Ejido San Bartolo Ameyalco | 6.81 | 0.24 |
| Ejido San Bernabé Ocoatepec | 11.17 | 0.39 |
| Ejido Magdalena Contreras | 8.40 | 0.29 |
| Comunidad La Magdalena Atlitic | 2050.45 | 70.88 |
| Ejido San Nicolás Totolapan | 10.22 | 0.85 |

Asociación de comerciantes unidos de los Dínamos. Esta asociación agrupa alrededor de 120 asociados de puestos fijos y 80 ambulantes que laboran dentro de la microcuenca en el paraje La Cañada, Segundo , Tercer y Cuarto Dinamo, así como fuera de ella en una zona turística y comercial cercana a la salida de la microcuenca. Cabe resaltar que esta es la principal actividad productiva dentro de la microcuenca y que del total de asociados de puestos fijos, aproximadamente el 90% son comuneros. Sus dirigentes mantienen una organización activa entre sus asociados y actualmente tienen un plan de trabajo a corto y largo plazo que incluye los siguientes puntos:

- Regulación y ordenamiento de actividades comerciales.
- Educación ambiental.
- Construcción de infraestructura: cocinas ecológicas, baños ecológicos, tratamiento de aguas residuales, vialidad y señalización, seguridad y capacitación (guardas forestales).

Grupo Luis Cabrera. Es una asociación civil que está integrada por 35 comuneros y 4 sucesores de la comunidad de La Magdalena Atlitic, es un grupo bien definido que mantiene una relación poco favorable con el resto de los miembros de la comunidad. De acuerdo con sus dirigentes, ésta asociación nació con la finalidad de proteger y conservar un predio cercano a la planta potabilizadora, a la altura del Primer Dinamo. Entre sus actividades se encuentra la siembra de hortalizas a pequeña escala, reforestación del predio antes mencionado y actividades de educación ambiental dentro y fuera de la microcuenca.

Grupo Mexicantiahui A.C. Es una asociación que agrupa a algunos pobladores del pueblo de La Magdalena Contreras que son nativos y comuneros de la Magdalena Atlitic; actualmente hay 15 miembros activos y 25 eventuales. Forman parte del grupo de trabajo del “Proyecto de Rescate del Río Magdalena” encabezado por el gobierno del Distrito Federal. Asimismo, están gestionando un proyecto en un paraje ubicado a la salida de la microcuenca, denominado “Sección Cañada, Rescate del Río Magdalena”, el cual incluye la colaboración de comuneros y dueños privados del Grupo Frisa para realizar un proyecto ecoturístico, la formación de un cinturón ecológico que contenga el crecimiento de la mancha urbana y los asentamientos irregulares, formación de brigadas de vigilancia, manejo forestal, reforestación y la instalación de un invernadero.

4.3.2. Beneficiarios.

Como se describió en el capítulo 4.2, el agua que se genera dentro de la microcuenca es distribuida fuera de ella en 21 colonias de la delegación La Magdalena Contreras, por lo que la población que habita en ese territorio es la que se está beneficiando actualmente con el servicio de provisión de agua, es decir son los beneficiarios del servicio ambiental.

En conjunto, estas colonias tienen una población aproximada de 118,237 habitantes (INEGI, 2008). De acuerdo al censo del 2000, el 40.95% de la población es económicamente activa. Derivado de su trabajo, el 51% de este sector de la población obtiene ingresos menores a 2 salarios mínimos, el 33% recibe entre 2 y 5 salarios mínimos y únicamente el 9% recibe más de 5 salarios

mínimos. La principal fuente de empleo es como empleado u obrero, dentro del sector productivo terciario (INEGI, 2000a).

Por otro lado, en el área existen alrededor de 29,115 viviendas habitadas, de las cuales el 97.4% recibe el abastecimiento de agua potable por medio de tomas ubicadas dentro del domicilio o del predio (*Op. cit.*). Tomando en cuenta el tamaño de la población y sus características socioeconómicas, se calculó un consumo aproximado de agua en estas colonias de 166.95 l/s.

4.3.3. Mediadores.

Son actores sociales que servirán de apoyo en las etapas de planeación, organización, negociación, operación y evaluación del mecanismo de pago por servicios ambientales. A continuación se describen algunas instituciones de los tres órdenes de gobierno y académicas, que por sus funciones y por las actividades que realizan al interior de la microcuenca, podrían adoptar esta función.

Comisión Nacional del Agua. Actualmente, la misión de la Comisión Nacional del Agua consiste en administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del recurso. En la zona de estudio, no tienen una injerencia directa, sin embargo al ser quien otorga las concesiones de agua tiene un papel de regulación y podría participar en la etapa de planeación y operación.

Comisión Nacional Forestal. Con el fin de impulsar el reconocimiento de la multifuncionalidad de los ecosistemas forestales y agroforestales y promover su conservación, la CONAFOR emprendió dos iniciativas: el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en el año 2003, y el Programa PSA-CABSA en el año 2004. Ambos con la finalidad de otorgar apoyos económicos a los dueños y/o legítimos poseedores de terrenos con recursos forestales por los servicios ambientales que generan. En el año 2006, los dos Programas mencionados fueron fusionados bajo un solo concepto de apoyo denominado Servicios Ambientales. Los apoyos otorgados bajo este concepto están destinados a promover y desarrollar el mercado de los siguientes servicios ambientales que proveen los ecosistemas forestales y agroforestales: Hidrológicos, Captura de Carbono y los

derivados de la protección a la Biodiversidad (CONAFOR, 2008). Además, esta dependencia ha participado en la formación de fondos para iniciar esquemas de pago por servicios ambientales que incluyen a los usuarios del agua, como es el caso de Coatepec Veracruz, por lo que su participación podría ser importante en las etapas de organización y operación.

Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal. Esta secretaría a través de la Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales (CORENA), aplica programas dirigidos a regular, promover, fomentar, coordinar y ejecutar estudios y acciones en materia de protección, desarrollo, restauración y conservación de los ecosistemas, la vegetación natural o inducida, restauración y conservación del suelo, agua y otros recursos naturales en el suelo de conservación y áreas naturales protegidas del Distrito Federal. Uno de ellos es el Programa Fondos de Apoyo para la Conservación y Restauración de los Ecosistemas a través de la Participación Social (PROFACE), el cual tiene como fin proteger, conservar y restaurar los ecosistemas por microcuencas del Suelo de Conservación como espacio clave del equilibrio ecológico de la Cuenca de México, tanto de la zona Metropolitana como de la Ciudad de México, para garantizar la permanencia de los servicios ambientales, a través de apoyos económicos en un esquema de participación social. Considera dos modalidades de apoyo:

- Fondos para la Conservación y Restauración de Ecosistemas (FOCORE)
- Apoyo para la Participación Social en Acciones para la Conservación y Restauración de los Ecosistemas (APASO)

Aunque estos programas aún no han sido implementados en la microcuenca, por falta de organización de los comuneros, esta institución es clave por las actividades que realiza y su participación podría incidir en las etapas de planeación, organización, negociación y operación.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Esta dependencia del gobierno del Distrito Federal está sectorizado en la Secretaría del Medio Ambiente y tiene por objetivo, con base en el Decreto por el cual se creó, prestar los servicios públicos de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y reutilización. Asimismo, tiene la tarea de operar,

mantener y construir la infraestructura hidráulica; explotar, usar, aprovechar las aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y la calidad para contribuir al desarrollo integral sustentable de la Ciudad. Dado que es la dependencia encargada de captar y distribuir el agua de la microcuenca, podría jugar un papel fundamental en la etapa operativa del esquema de PSA, así como en la regulación.

Delegación La Magdalena Contreras. Con la finalidad de proteger la biodiversidad y los recursos naturales estratégicos, que en su conjunto ofrecen variados servicios ambientales indispensables para la viabilidad presente y futura de la Ciudad de México, la delegación La Magdalena Contreras, conjuntamente con los núcleos agrarios de la demarcación ha desarrollado distintos proyectos para fomentar el desarrollo de actividades productivas sustentables, vinculadas con el ecoturismo en el suelo de conservación delegacional para beneficio no solo de las comunidades y ejidos de la demarcación, sino para los más de 220,000 habitantes de la delegación y la propia viabilidad de la Ciudad de México. Dado que la mayor parte del territorio de la microcuenca y el área de distribución de sus recursos hídricos se localiza dentro de esta delegación, es un actor clave dentro del proceso de planeación, y organización.

Universidad Nacional Autónoma de México. Esta institución ha trabajado continuamente en el área de estudio, realizando diversas investigaciones que se enmarcan dentro del Macroproyecto “Manejo de ecosistemas y desarrollo humano en la cuenca del río Magdalena, D.F.”, cuyo objetivo principal es generar un diagnóstico ambiental del Suelo de Conservación Ecológica de La Magdalena Contreras, que permita obtener información sobre el estado actual de la flora, fauna y vegetación de los ecosistemas forestales como base para proponer acciones en el contexto del manejo de ecosistemas para la conservación y restauración del área. Su participación será importante en las etapas de planeación y evaluación.

Universidad Autónoma de Querétaro. El presente estudio pretende generar información que sirva de sustento para iniciar la gestión de un esquema de PSAH en la microcuenca del río Magdalena, por lo que su desarrollo en sí mismo es ya una contribución. Por ende, esta institución tiene un papel importante

dentro de la etapa de planeación y podría tener otras inferencias en otras etapas como la de evaluación.

4.4. Modelación hidrológica

4.4.1. Calibración y validación del modelo.

Para poder utilizar los datos generados por el modelo de simulación hidrológica SWAT, se realizaron múltiples corridas del programa. Esto con la finalidad de ajustar las curvas del hidrograma simulado con los valores registrados en el año 1999. Como resultado de esta etapa se logró calibrar el modelo a nivel mensual como se muestra en la figura 23. Los picos del hidrograma fueron sobreestimados por el programa, mientras que las recesiones estuvieron subestimadas principalmente para el escurrimiento base, reflejándose esta tendencia en el flujo total.

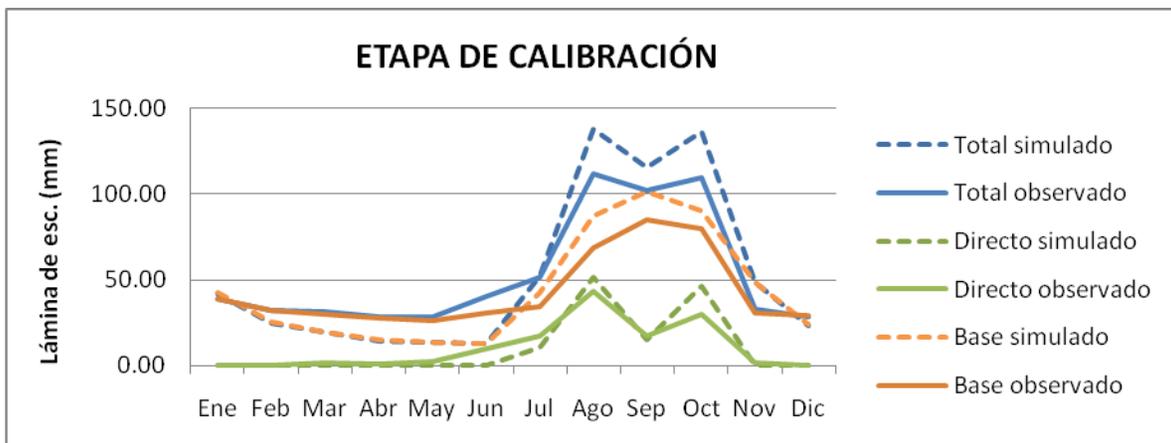


Figura 23. Comparación de la lámina mensual acumulada de escurrimiento en la etapa de calibración mensual.

Una vez calibrado el modelo, se observó la tendencia que generaban los mismos parámetros utilizados en el período de calibración a lo largo del año de validación. Como resultado de este proceso, el modelo subestimó todos los caudales con casi la mitad del valor original (Fig. 24).

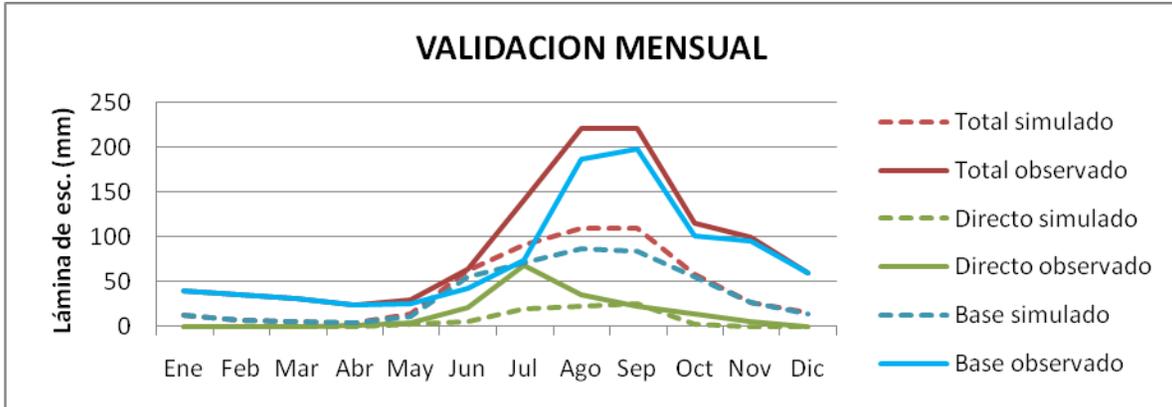


Figura 24. Comparación de la lámina mensual acumulada de escurrimiento en la etapa de validación mensual.

El análisis estadístico de los datos, realizado mediante la estimación del coeficiente de determinación y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Cuadro 11), muestra que para la etapa de calibración mensual los valores obtenidos tienen una calidad aceptable de ajuste. Sin embargo, la etapa de validación mensual obtuvo valores alejados de 1.0, principalmente con el coeficiente de Nash-Sutcliffe, lo cual se interpreta como una baja capacidad del modelo para simular los escurrimientos en esta etapa.

Cuadro 11. Comparación estadística de los escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual.

| Etapa | Tipo de escurrimiento | Lámina acumulada de escurrimiento | | Coeficiente de determinación | Coeficiente Nash-Sutcliffe |
|-------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Observado (mm) | Simulado (mm) | | |
| Calibración | Directo | 122.20 | 122.86 | 0.913 | 0.769 |
| | Base | 514.53 | 519.47 | 0.912 | 0.616 |
| | Total | 636.25 | 641.80 | 0.950 | 0.735 |
| Validación | Directo | 171.38 | 77.97 | 0.621 | 0.365 |
| | Base | 909.94 | 430.70 | 0.695 | 0.122 |
| | Total | 1081.33 | 508.15 | 0.881 | 0.260 |

Asimismo, mediante el análisis de la capacidad del modelo para simular los escurrimientos a nivel diario, se observó que en todos los casos los coeficientes utilizados bajaron su valor (Cuadro 12), lo cual en general es una tendencia normal dado que aumenta el número de datos que se tienen que ajustar; no obstante, los valores obtenidos en ambos coeficientes son poco aceptables. Los escurrimientos directos presentan el menor ajuste en relación a los valores observados, lo que ocasiona que el escurrimiento total se vea afectado. Ahora bien, tomando en cuenta la lámina media de escurrimiento, los resultados obtenidos durante la etapa de calibración muestran que los valores observados y simulados son casi idénticos. En realidad este es un reflejo de la sobrestimación y subestimación de los valores calculados con el modelo y los cuales se equilibran cuando se hacen las estimaciones anuales.

Cuadro 12. Comparación estadística de los escurrimientos medidos y simulados a nivel diario.

| Etapa | Tipo de escurrimiento | Lámina media de escurrimiento diario | | Coeficiente de determinación | Coeficiente Nash-Sutcliffe |
|-------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Observado (mm) | Simulado (mm) | | |
| Calibración | Directo | 0.33 | 0.34 | 0.238 | -0.511 |
| | Base | 1.41 | 1.42 | 0.786 | 0.517 |
| | Total | 1.75 | 1.76 | 0.460 | -0.001 |
| Validación | Directo | 0.47 | 0.21 | 0.016 | -0.659 |
| | Base | 2.49 | 1.18 | 0.668 | 0.122 |
| | Total | 2.96 | 1.39 | 0.496 | 0.085 |

Las deficiencias en las simulaciones a nivel diario están relacionadas principalmente con el escurrimiento directo, ya que los valores diarios muestran que el modelo sobreestima los caudales máximos, aportando un número mayor de eventos con caudales pico a lo largo del hidrograma (Fig. 25). Esto puede estar provocado por errores en los registros de la estación hidrométrica o debido a que

el modelo es incapaz de representar debidamente la dinámica de la relación lluvia-escorrimento en la microcuenca.

El escurrimiento base muestra una tendencia similar entre los valores simulados y observados (Fig. 26), lo cual se refleja en los valores obtenidos durante el análisis estadístico.

Debido a que la calibración a nivel mensual es la que arrojo un mejor resultado, se decidió construir los escenarios hipotéticos en función de los parámetros utilizados con este intervalo de tiempo en la modelación.

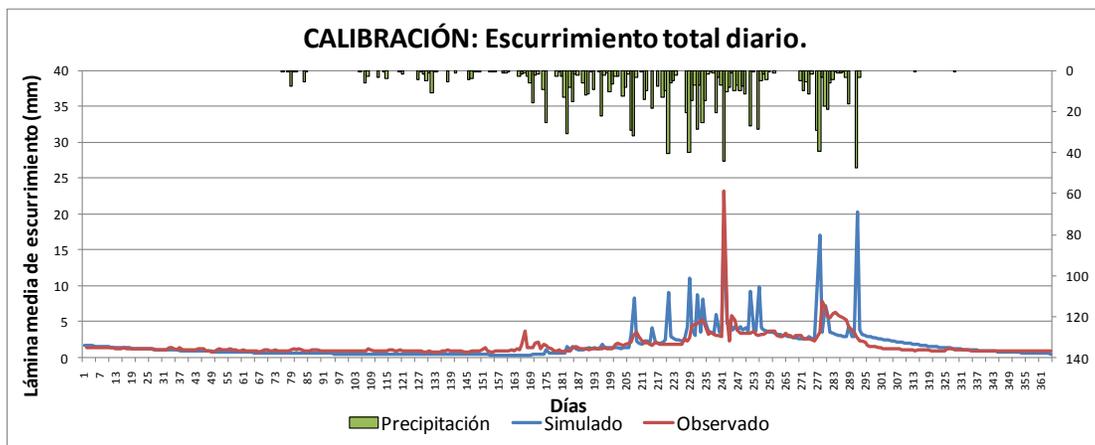


Figura 25. Hidrograma observado y simulado, para la etapa de calibración diaria.

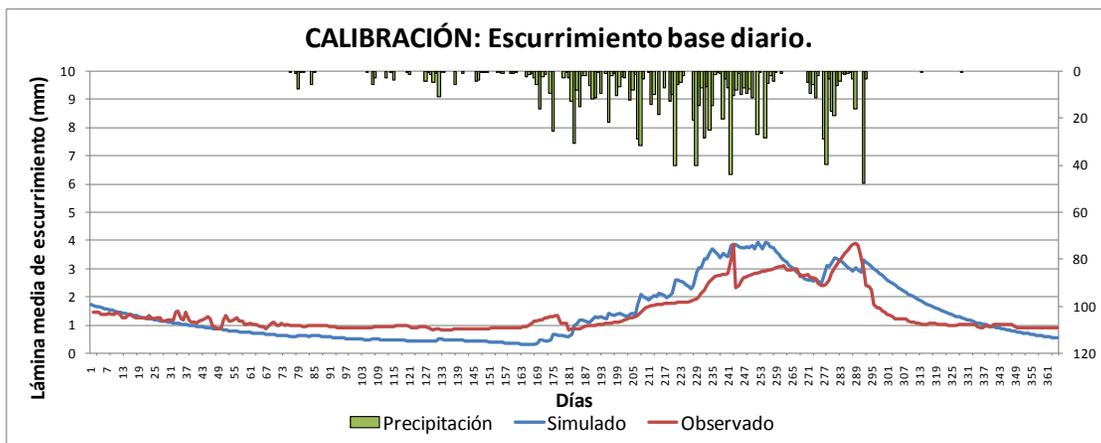


Figura 26. Comparación del escurrimiento base, en la etapa de calibración.

4.4.2. Descripción de los procesos hidrológicos de la microcuenca.

La interface AvSWAT subdividió a la microcuenca del río Magdalena en 17 UE de área máxima de contribución igual a 120 Ha. A su vez, las UE fueron divididas en

un número variable de URH que en conjunto suman 59, sus principales características se muestran en el anexo 3.

4.4.2.1. Precipitación.

De acuerdo a la simulación realizada para el año 1999, la microcuenca río Magdalena tuvo una lámina de precipitación acumulada anual de 1,109.1 mm. El modelo distribuye la precipitación en función de la altitud, en este caso dividió el área en dos franjas con diferente precipitación anual (Fig. 27). En la parte alta la lamina media fue de 704.2 mm, mientras que en la parte baja fue de 404.9 mm.

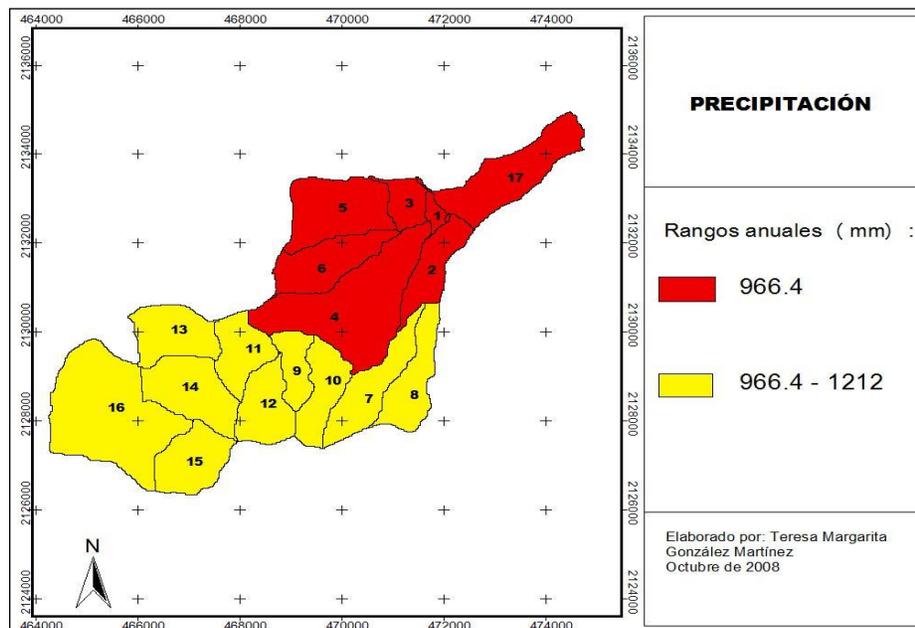


Figura 27. Distribución espacial de la precipitación.

4.4.2.2. Escurrimiento.

Para el año 1999, el escurrimiento total de agua en la microcuenca representó una lámina de 641.81 mm. De esta cantidad, 122.35 mm se generaron por escurrimiento directo, mientras que 519.44 mm fueron de escurrimiento base. Como se mencionó anteriormente el escurrimiento base se compone de escurrimiento subsuperficial y subterráneo, cuyos porcentajes varían dependiendo de las características de cada zona. En la microcuenca del río Magdalena, el

70.2% se generó por escurrimiento lateral subsuperficial y el 29.8% se generó por escurrimiento subterráneo proveniente del acuífero no confinado.

Aunque las UE con mayores volúmenes de escurrimiento total fueron la 9, 10, 11, 12 y 15 (Figura 28), en general, la porción media alta de la microcuenca es la que oferta el mayor volumen de agua, con una lámina de escurrimiento total anual de 412.3 mm (Figura 29). A su vez, esta parte de la microcuenca coincide con el área que recibe mayor cantidad de precipitación (véase la figura 27).

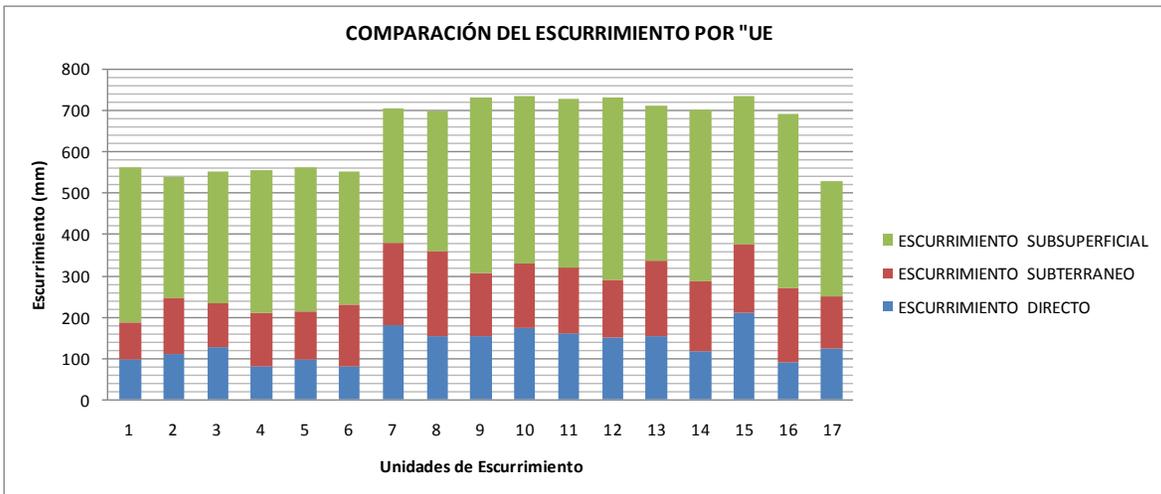


Figura 28. Contribución de cada tipo de escurrimiento al escurrimiento total, por UE.

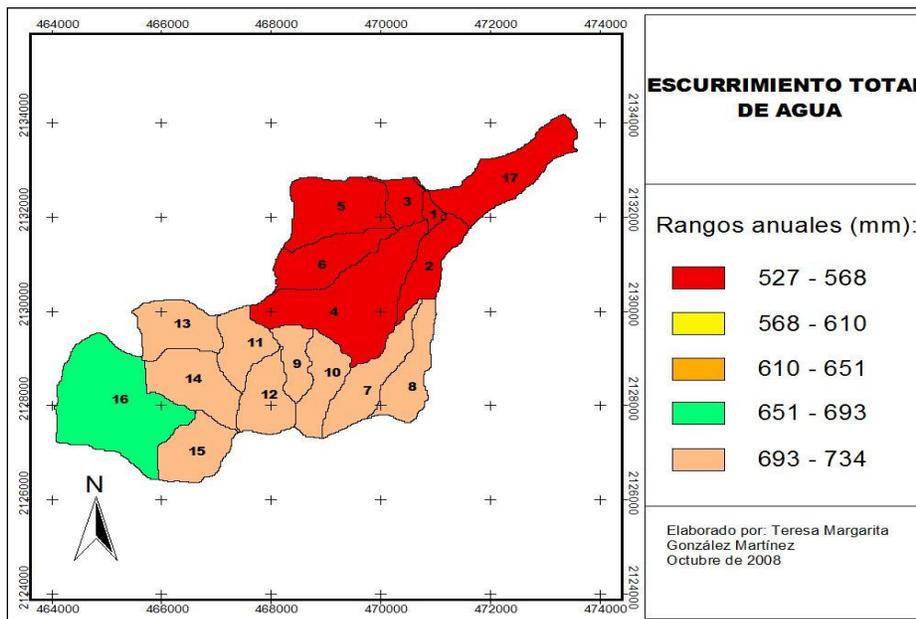


Figura 29. Escurrimiento total de agua en cada UE.

Para entender mejor cómo se está generando este escurrimiento y detectar cuáles son las UE con mayor importancia en los procesos hidrológicos que afectan al servicio ambiental de provisión de agua, es necesario separar cada uno de los componentes del escurrimiento total.

Dentro de la microcuenca, las UE con mayor escurrimiento subterráneo proveniente del acuífero no confinado fueron la 7, 8 y la 16 (Fig. 30). Entre las características que presentan estas microcuencas destaca su vegetación conservada de bosque de pino, bosque de oyamel y pastizal natural, así como suelos de tipo andosol húmico y ocríco. Otras UE importantes para este tipo de escurrimiento son la 11, 13, 14 y 15. En total, estas UE aportaron el 54 % del escurrimiento subterráneo.

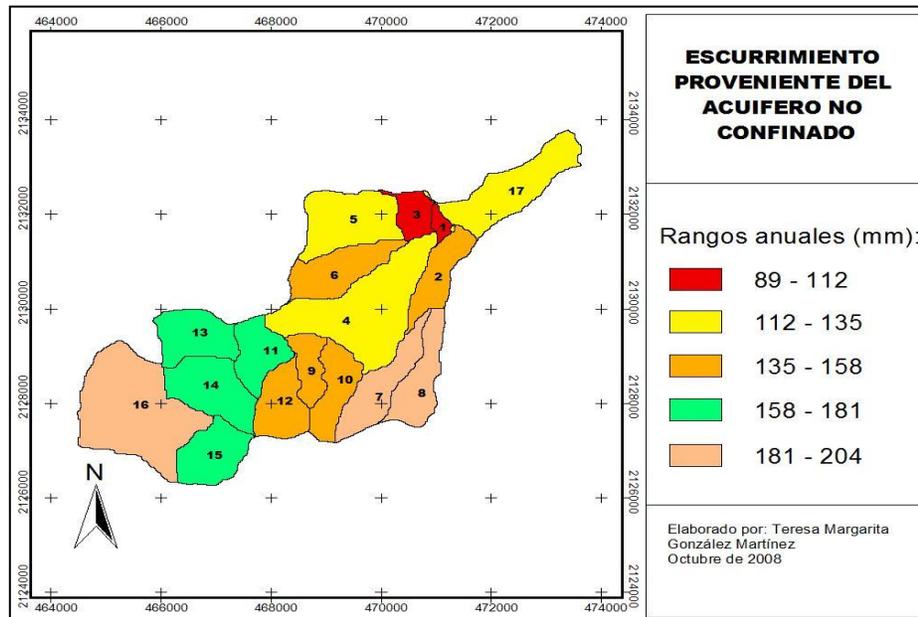


Figura 30. Identificación de las UE con mayor escurrimiento subterráneo.

Las UE que tuvieron una mayor contribución gracias a los escurrimientos subsuperficiales fueron la 9, 12, 14 y la 16 (Fig. 31). Estas microcuencas también tienen una buena superficie cubierta por bosque de pino, bosque de oyamel y pastizal natural, aunque las UE 9 y 12 ya presentan algunos manchones de vegetación secundaria asociada al bosque de oyamel. Sus suelos son muy heterogéneos y están integrados por unidades edafológicas de andosol húmico, andosol ocríco y litosol. Cabe mencionar que las UE 10, 11 y 13 también tienen

una importante contribución de escurrimiento subsuperficial. En conjunto, las UE mencionadas aportaron el 48% del escurrimiento subsuperficial.

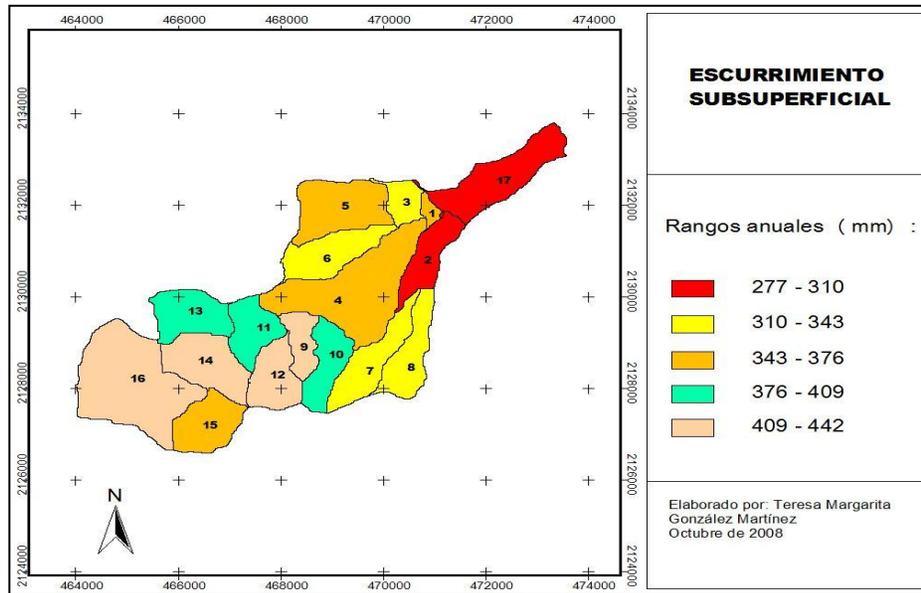


Figura 31. Identificación de las UE con mayor escurrimiento subsuperficial.

Por otro lado, las UE que tienen un mayor escurrimiento directo, son la 7, 10 y 15, las cuales presentan grandes extensiones con pastizal natural e inducido y pendientes que van de 0.28 a 0.41 m/m. En conjunto aportan el 23% de este tipo de escurrimiento.

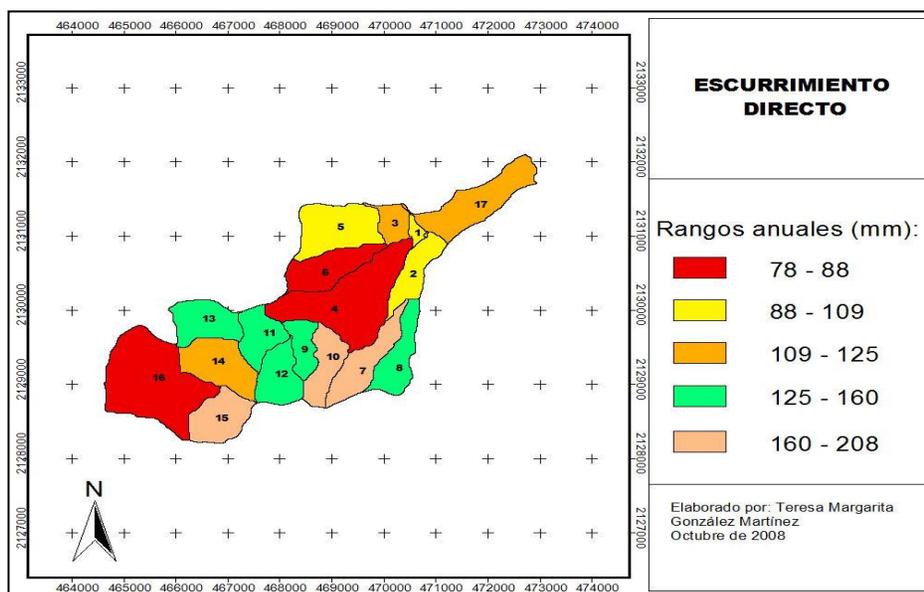


Figura 32. Identificación de las UE con mayor escurrimiento directo.

4.4.2.3. Infiltración profunda

Se refiere al agua que después de infiltrarse profundamente, logra llegar hasta el acuífero confinado y posteriormente puede aflorar fuera de la microcuenca o permanecer almacenada como agua fósil. A pesar de que el servicio ambiental de producción de agua en la microcuenca del río Magdalena está más relacionado con el agua que se genera por escurrimiento base, la infiltración profunda es un elemento importante, por el posible papel que podría jugar dentro de la recarga del acuífero 901 (Zona Metropolitana de la Ciudad de México).

La lámina anual de infiltración profunda calculada fue de 126.56 mm, de la cual el 67% fue aportado principalmente por las UE 7, 8, 13, 14 y 16, así como por la 11 y la 15 aunque en menor medida (Figura 33).

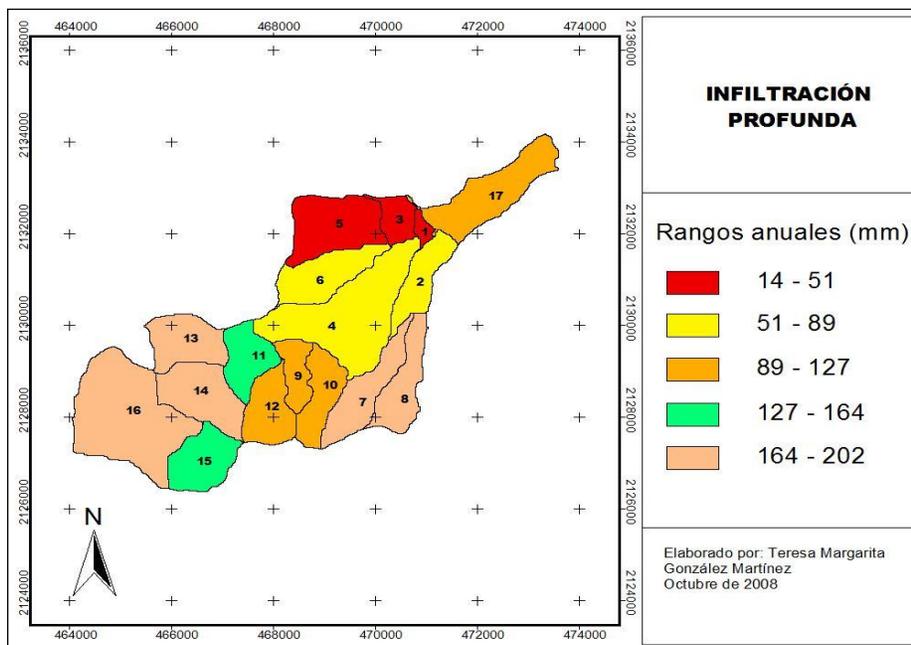


Figura 33. Infiltración profunda por UE.

4.4.2.4. Evapotranspiración.

Dentro de la microcuenca, durante el año de modelación, se evapotranspiró una lámina total de 528.17 mm, lo cual representó el 47% del agua precipitada, este parámetro está muy relacionado con la cantidad de agua que utiliza la vegetación y posteriormente transpira, por lo que no es de extrañarse que las unidades de escurrimiento con mayores valores en este rubro se encuentren en zonas con

bosques de Oyamel y Pino. Las UE con mayores valores de evapotranspiración fueron la 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15 y 16 (Figura 34).

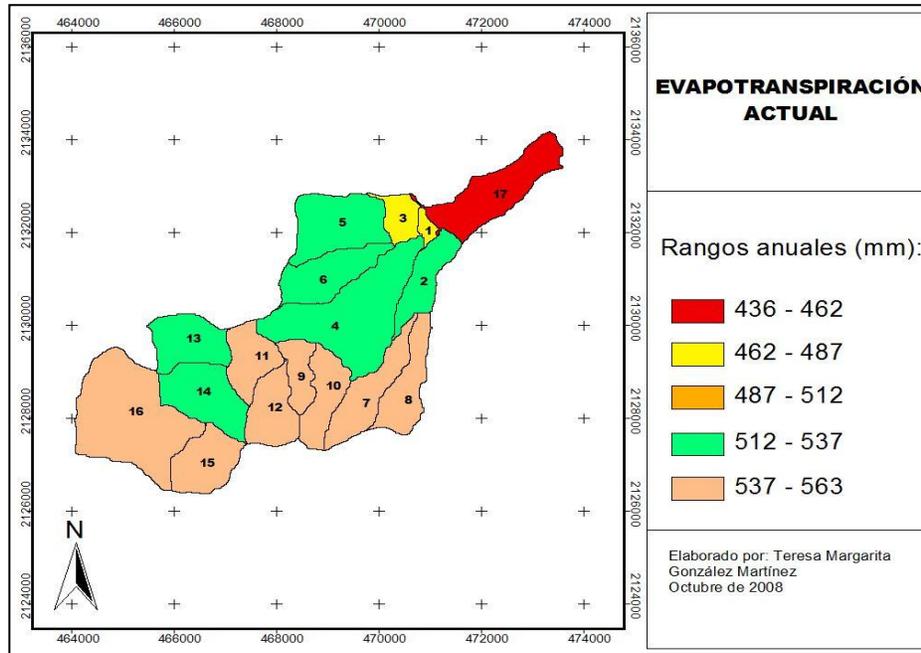


Figura 34. Rangos de evapotranspiración actual dentro de las UE.

4.4.3. Escenarios modelados.

La capacidad actual para producir el servicio ambiental de producción de agua se puede ver afectada por el estado de conservación de los ecosistemas que la integran, si bien esto incluye una gama muy diversa de interrelaciones, uno de los elementos que refleja el estado conservación de los ecosistemas es el tipo de uso de suelo y vegetación. En este sentido se plantearon dos escenarios alternos para simular los procesos hidrológicos de la cuenca. El primero se refiere a un estado de conservación mejor que el actual (Escenario 1), y el segundo, a un estado de conservación deteriorado respecto al actual (Escenario 2) (Figura 35 y 36).

Con las modelaciones realizadas a partir de los dos escenarios alternativos, se observó que diferentes procesos del ciclo hidrológico se verían afectados en caso de que alguno de ellos se cumpliera. Para el caso del escurrimiento total, los volúmenes se mantienen casi iguales para la condición actual y para la condición del escenario 1, con 641.8 mm y 637.5 mm

respectivamente. Mientras que el escenario 2 presenta una mayor escurrimiento con un valor de 666.2 mm (Figura 37).

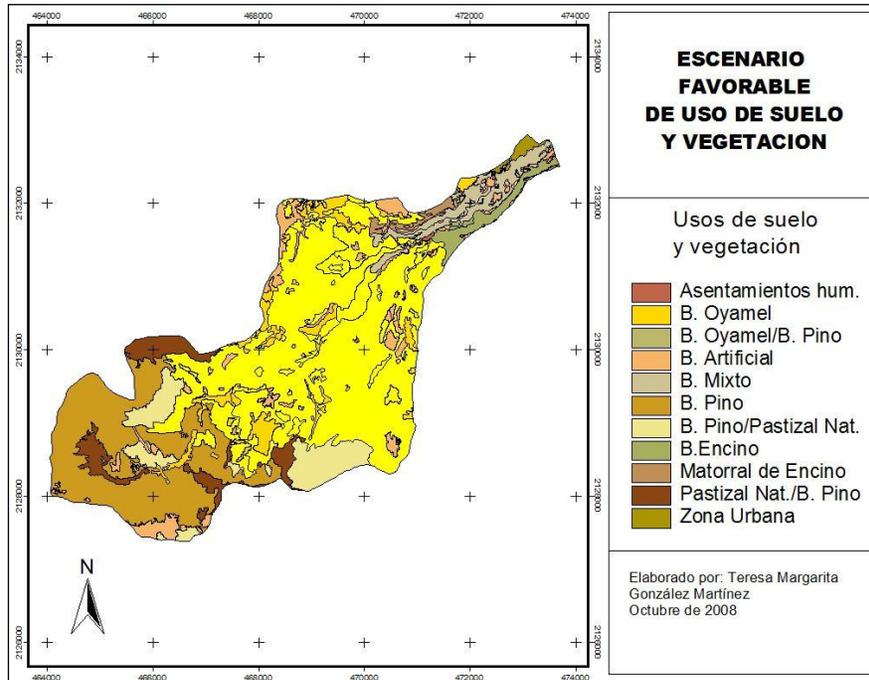


Figura 35. Escenario 1: con condición de conservación mejor que el estado actual.

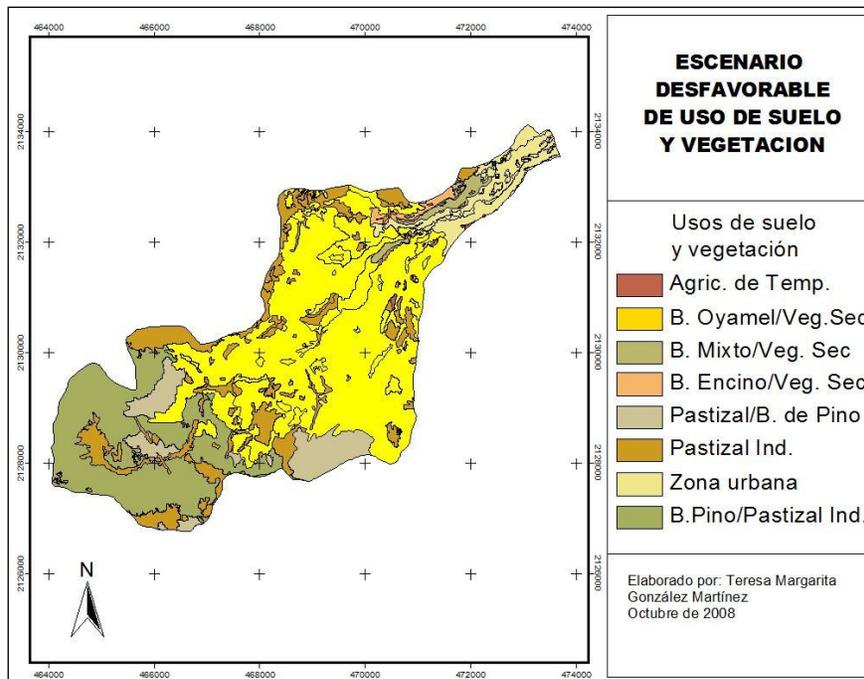


Figura 36. Escenario 2: con condición de conservación menor respecto al actual.

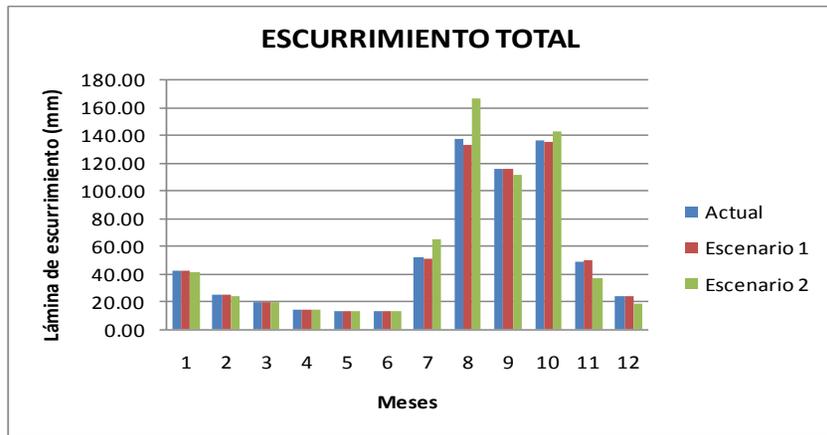


Figura 37. Esgurrimento total de agua en los diferentes escenarios.

El resultado obtenido en el escurrimento total pareciera indicar que el deterioro en la cuenca permitiría una mayor oferta del servicio ambiental de provisión de agua. Sin embargo cuando analizamos los escurrimentos base y directo, las condiciones cambian. El escenario 1 produce una menor lámina de escurrimento directo y un mayor escurrimento base, en relación al estado actual, con valores de 109.8 mm y 528.2 mm respectivamente. Mientras que el escenario 2 presenta una respuesta completamente opuesta, con una lamina de escurrimento directo de 222.57 mm y un escurrimento base de 444.32 mm (Fig. 38 y 39).

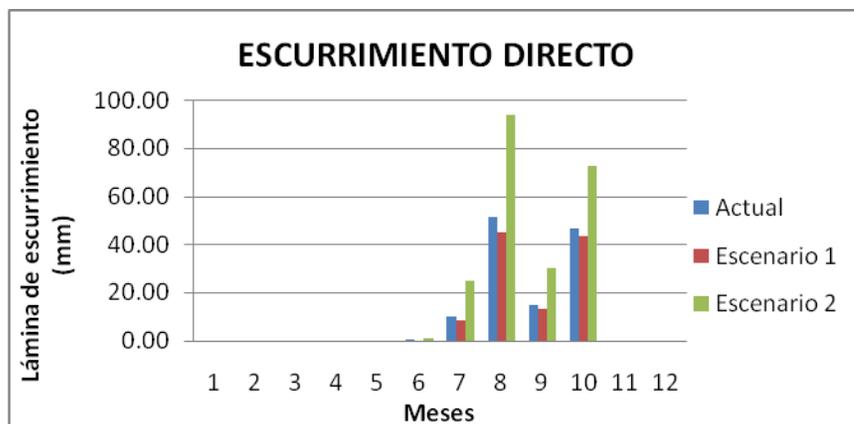


Figura 38. Esgurrimento directo generado en los distintos escenarios.

Por otro lado, la infiltración profunda también se vería afectada por los cambios en la vegetación. En este caso, el escenario 1 presentó una lámina anual de infiltración de 132.62 mm. Mientras que en el escenario 2 los valores disminuyeron a 89.33 mm (Figura 40).

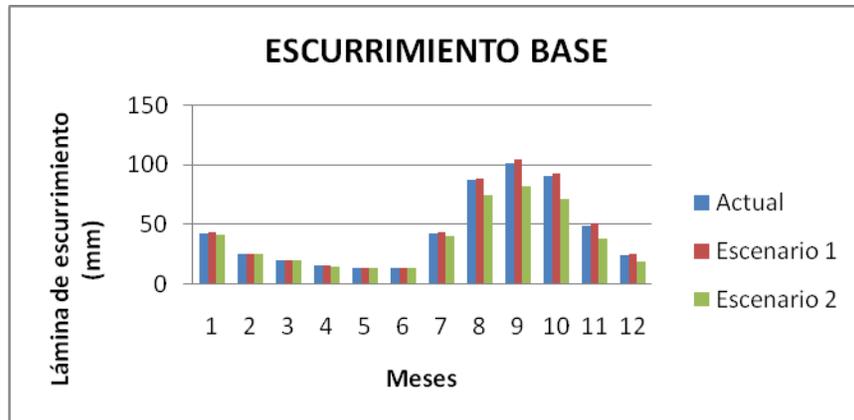


Figura 39. Esgurrimiento base generado en los diferentes escenarios.

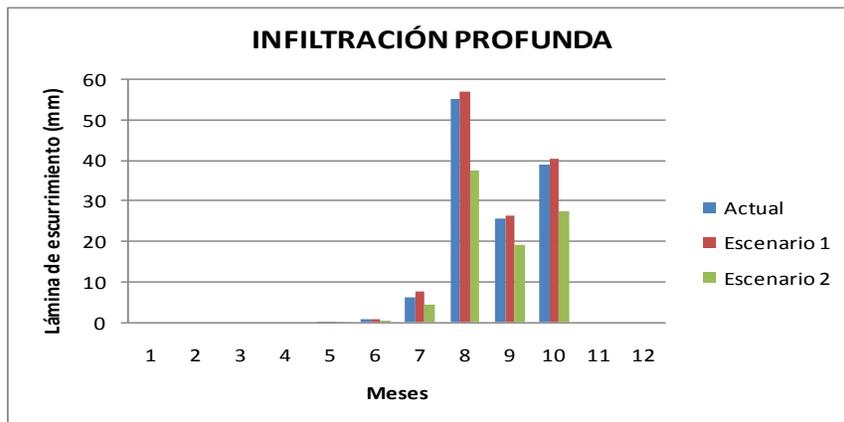


Figura 40. Infiltración profunda generada en los distintos escenarios.

5. DISCUSIÓN

5.1. El papel del escurrimiento base en la oferta de agua.

Contar con información hidrométrica de una cuenca ofrece la posibilidad de analizar algunos procesos hidrológicos en su interior, mediante datos reales. Además permite conocer de manera indirecta el estado en que se encuentran sus ecosistemas forestales. Existe un gran número de artículos en los que se menciona que el impacto de los bosques sobre la esorrentía consiste en la modificación de la forma en que estos volúmenes acceden a los cauces, disminuyendo drásticamente los escurrimientos directos y aumentando las aportaciones del escurrimiento base, lo cual ha permitido tener cierto consenso al respecto (Equihua *et al.*, 2007; Hernández, 2005; Pizarro *et al.*, 2005; Viramontes y Descroix, 2001; Meunier, 1996; López, 1994; Lindholm y Stenbeck, 1993).

Por esta razón, la separación del escurrimiento base permite evaluar la capacidad de la cuenca para proporcionar el servicio ambiental de provisión de agua a lo largo del tiempo, especialmente durante los períodos de estiaje, ya que es el componente que permite que los cauces sean perenes o prolonguen su permanencia. Además, el objetivo de mantener el escurrimiento base está generalmente relacionado con asegurar o reducir el estrés durante la estación seca o durante las sequías cuando el agua se encuentra limitada y por lo tanto su valor es mayor (Tognetti, *et al.*, 2004).

Cabe señalar que el impacto de los distintos ecosistemas sobre el escurrimiento base es específico para cada lugar, por lo que no es posible establecer reglas generales (Calder, 1998). En la microcuenca del río Magdalena, durante los años analizados, el escurrimiento directo contribuyó con el mayor porcentaje al caudal del río (81.29%), lo cual indica que, en términos generales, sus ecosistemas favorecen este comportamiento hidrológico. Algunos de los componentes de sus ecosistemas que están influyendo para que se produzca esta oferta de agua son los siguientes:

- Aproximadamente el 76% de la microcuenca presenta una cobertura forestal conservada (Ávila, 2005). En general, los bosques mejoran la

permeabilidad, almacenaje y retención del suelo por el efecto de las raíces, el mantillo y el humus (Huber y Trecaman, 2002; Calder 1998; Meunier, 1996). Además, reducen la escorrentía por la intercepción del dosel (Hernández, 2005).

- Los suelos de la microcuenca presentan características de permeabilidad y conductividad hidráulica saturada con valores que van de muy altos a moderados (Jujnovsky, 2006). Como ya se mencionó, la vegetación influye en las características de los suelos, confiriéndoles una mayor permeabilidad. Por otro lado, las unidades edafológicas existentes en la microcuenca presentan una textura media, lo que provoca que sean relativamente permeables ya que están equilibrados en el contenido de arenas, arcillas y limos (Aparicio *et al.*, 2006).
- La geología de la zona también juega un papel importante. El sustrato rocoso en la parte alta está conformado por una sucesión de derrames lávicos y estructuras volcánicas con diversas fallas y fracturas, lo cual provoca una alta permeabilidad secundaria por fracturamiento. Además, la existencia de materiales granulares como arenas volcánicas y depósitos de talud, ayudan a que el movimiento del agua sea considerablemente más lento, regulando de esta forma la descarga del agua de lluvia infiltrada (SMA, 2002; DGCOH, 2000a).

Los hidrogramas analizados mostraron volúmenes de escurrimiento total, directo y base considerablemente distintos entre sí. Comparando los años 2000 y 1999, la diferencia en la lámina de escurrimiento base y total entre los dos años fue muy alta (395.5 mm y 443.9 mm respectivamente), siendo el año 2000 el que más escurrimiento tuvo. Mientras que la precipitación anual tuvo una diferencia de únicamente 4.91 mm, siendo también el año 2000 el que más precipitación tuvo. Estos datos muestran que los regímenes de escorrentía no solo están determinados por las características de los ecosistemas presentes en la microcuenca y la cantidad de precipitación, también se ven afectados por factores climatológicos como la distribución temporal de la lluvia y su intensidad.

En el presente estudio no se determinó la intensidad de la lluvia, sin embargo la distribución de la precipitación a lo largo del año muestra que durante el año 2000 la lámina de precipitación mensual sobrepasa los 150 mm de mayo a septiembre, mientras que en el año 1999 únicamente se pasó este nivel durante julio, agosto y octubre. Ésta podría ser la razón por la que los valores del escurrimiento sean más altos durante el año 2000.

Dado que el caudal del río está muy influenciado por la precipitación y no se cuenta con registros hidrométricos históricos de mayor longitud, no se puede comprometer un volumen específico de aprovechamiento para cada época del año. Sin embargo, es importante señalar que los gastos mínimos registrados en la estación hidrométrica se originaron en los meses de abril y mayo, antes de terminar la época de estiaje, con valores de 269.8 l/s para 1999, 240 l/s en 2000 y 276.8 l/s para 2001, mismos que están muy cercanos a la capacidad máxima de operación de la planta potabilizadora que es de 200 l/s. Por lo que la capacidad de aumentar el volumen de aprovechamiento de agua debe contemplar la estacionalidad del escurrimiento. Esto implica también, dejar suficiente agua en las corrientes tomando en cuenta que para mantener la capacidad de la microcuenca para proveernos del servicio ambiental de provisión de agua, la extracción necesaria para satisfacer las necesidades humanas debe estar condicionada por la disponibilidad de la fuente, sin afectar a los ecosistemas acuáticos y procesos propios del río.

Los datos hidrométricos analizados no permiten definir si ha habido alguna diferencia en el caudal del río de manera histórica, sin embargo la gente que ha tenido contacto con la zona desde hace más de 10 años manifiesta que el río ha bajado su caudal, especialmente en la época de estiaje.

Otro factor importante para el aprovechamiento de los escurrimientos en la microcuenca es el tiempo de concentración, que en este caso es de 1.9 Hrs. Este es un tiempo realmente corto, si tomamos en cuenta que una vez que una tormenta provoca escurrimiento directo, el agua saldrá rápidamente y difícilmente se podrá aprovechar sin hacer grandes depósitos para almacenarla. Es por esto que en la medida de lo posible se deben realizar acciones que permitan mantener el escurrimiento base, sin tener que recurrir a grandes estructuras de

almacenamiento que podrían alterar drásticamente los ecosistemas. Como por ejemplo, la reforestación de las zonas forestales degradadas, control de incendios y plagas forestales, construcción de pequeñas estructuras de control de escorrentías fuera de los cauces principales, como son las tinajas ciegas, muros de piedra acomodada, aplicación de ingeniería naturalística para control de erosión, etc.

El comportamiento de los coeficientes de escurrimiento muestra que un volumen importante de la lluvia se está infiltrando, lo cual refuerza la afirmación de que la microcuenca mantiene una buena condición de sus ecosistemas y esto se refleja en sus patrones de escurrimiento. El año con mayor coeficiente de escurrimiento se obtuvo en el año 2000, esto probablemente se debe a una mayor intensidad de las lluvias y a una mayor saturación del suelo.

5.2. Implicaciones del uso actual del agua en la microcuenca.

El agua de la microcuenca del río Magdalena, tiene múltiples usos. Por un lado la utilizan los comuneros y la población que actualmente vive o realiza alguna actividad productiva dentro de la microcuenca y por el otro, se encuentran los pobladores externos que se abastecen de agua a partir de tomas domiciliarias que forman parte de la red de distribución de los subsistemas río Magdalena y Reynaco. De acuerdo a la descripción del uso y aprovechamiento actual del agua, la cantidad que se está empleando en el interior de la microcuenca es relativamente pequeña (aproximadamente 7.7 l/s, sin contar a la piscicultura, agricultura de temporal y ganadería extensiva) en comparación con el consumo aproximado que se realiza en el exterior (166.95 l/s).

Dentro de la microcuenca, el principal consumo es de tipo doméstico y está dirigido a las viviendas. Cabe señalar que las localidades que se encuentran distribuidas de manera aislada, están integradas por comuneros o descendientes de comuneros, mientras que las localidades que están en la parte baja, han nacido de manera irregular en forma de invasiones (Fernández *et al.*, 2002), y ahí es donde se está utilizando el mayor volumen de agua al interior de la microcuenca.

Esto es importante de mencionar ya que al no estar integrados en la organización comunal de la Magdalena Atlitica pueden generarse conflictos por el

uso del agua. Una opción que podría ser viable, es incluir a este sector de la población dentro de los beneficiarios, para que de esta manera también otorguen una compensación a cambio del servicio ambiental de provisión de agua. Sin embargo, dado que son asentamientos irregulares primero se tendría que definir su situación legal, de tenencia de la tierra, y de infraestructura hidráulica.

La actividad productiva con mayor consumo de agua es la actividad comercial y de servicios. Otra actividad que utiliza gran cantidad de agua es la piscicultura, ya que mantiene sus instalaciones con agua corriente durante todo su ciclo productivo, aunque no se estimó el volumen de aprovechamiento. Asimismo, el riego rodado en el invernadero de rosas también representa un volumen importante de aprovechamiento. Dichas actividades son fuentes de contaminantes hacia el río, particularmente del 2do dínamo a la salida de la microcuenca, por lo que se deben implementar medidas a fin de que se controlen sus efectos sobre la calidad del agua, como pueden ser la implementación de sistemas de tratamiento de agua tipo SUTRANE (Sistema Unitario de Tratamiento y Recuperación de Agua, Nutrientes y Energía) y el control de agroquímicos.

Cuando se aborda el tema de servicios ambientales es importante conocer la perspectiva de las comunidades en cuanto al manejo que hacen de sus recursos naturales y en este caso particular del agua; cuál es la importancia que le dan al agua en términos culturales y espirituales y las normas que las comunidades establecen para asegurar un manejo adecuado (Rosa *et al.*, 2004). En el caso de la microcuenca el abastecimiento se realiza mediante el aprovechamiento de manantiales con mangueras de captación y cada persona se hace cargo de su propia instalación. Quienes utilizan agua del río, la ven como un bien común que pueden utilizar sin necesidad de solicitar permiso. Mientras que los habitantes que se localizan hacia la salida de la microcuenca reciben el servicio de agua potable por medio de la red pública, pero con un pésimo servicio de distribución (DGCOH, 2001a).

Conocer las relaciones de este primer nivel es crucial a la hora de visualizar estrategias de PSA, ya que dichas estrategias pueden fracasar o ser perjudiciales para las comunidades si no se conoce y entiende cómo éstas valoran los servicios ambientales clave para su subsistencia básica, su identidad y su

bienestar. En este primer nivel, donde las relaciones de la comunidad sólo son internas, y no existen transacciones con actores o mercados externos, la clave son los derechos de acceso y control sobre los recursos naturales y las normas de manejo que las comunidades establecen para asegurar su aprovisionamiento básico (Rosa *et al.*, 2004). En este sentido, sin contar las localidades ubicadas hacia la salida de la microcuenca, existe la percepción generalizada de los usuarios internos, de que se están satisfaciendo todas sus necesidades de agua por medio de la explotación de los manantiales y del río, a pesar de que no existe organización para el aprovechamiento y manejo del agua.

Dado que actualmente se están cubriendo las necesidades de la mayor parte de los usuarios internos, es factible la posibilidad de buscar, por medio de las autoridades del gobierno local, el reconocimiento externo del servicio ambiental de provisión de agua, con los usuarios externos a la microcuenca. En este nivel, el desafío es encontrar mecanismos de compensación que favorezcan prácticas particulares para el manejo de los ecosistemas, que permitan garantizar el servicio ambiental de interés para los actores o beneficiarios externos, e incentivos suficientes para los oferentes (*Op. cit.*).

El aprovechamiento del agua de la microcuenca fuera de su territorio, se realiza mediante una complicada red de distribución que se encuentra en malas condiciones. Razón por la cual la población sufre constantes problemas de falta de agua y tandeo del servicio.

Algunos de los estudios socioeconómicos de valoración del servicio ambiental hídrico que se han realizado en países en desarrollo, desafortunadamente no han tomado en cuenta si la falta del servicio hídrico es por problemas en la infraestructura hidráulica, o por problemas de producción de agua por parte del ecosistema. En este caso, los resultados de estos estudios no son aplicables a la realidad y, en caso de que se apliquen, se corre un gran riesgo de crear falsas expectativas en la población (Chagoya, 2008).

Si se desea poner en práctica un esquema de PSAH, primero se deben corregir los problemas de infraestructura y distribución que están afectando el abastecimiento de agua en las colonias beneficiadas por el agua que se extrae de la microcuenca. De otra manera se estarán creando falsas expectativas en los

futuros beneficiarios del servicio ambiental. Cabe aclarar, que el aprovechamiento actual de agua en el exterior de la microcuenca y en la zona urbana que se encuentra dentro su territorio (aproximadamente 174.5 l/s), es inferior al caudal extraído del río por la potabilizadora y el subsistema Reynaco (aproximadamente 208 l/s), por lo que aparentemente no debería haber desabasto de agua en esas colonias.

5.3. El papel de los actores sociales en la gestión de un esquema de PSAH.

Uno de los factores más importantes para que un esquema de PSAH (en general cualquier propuesta de gestión integral de cuencas) tenga éxito, es el compromiso y apropiación de los diferentes actores implicados, hacia la propuesta de gestión y sus objetivos (Paré y Robles, 2008). Esto adquiere mayor relevancia si tomamos en cuenta que estos nuevos actores sociales tienen un papel significativo como agentes activos de cambio. Ya que, desde el punto de vista del PSA, de sus acciones dependerá el estado de los ecosistemas dentro de la microcuenca, así como de los servicios ambientales que provee (Duarte *et al.*, 2006; Blauert y Zadek, 1999). Por ello, la identificación de actores sociales es una etapa clave, ya que es el punto de partida que permitirá la organización y promoverá un proceso incluyente.

Para lograr el éxito del esquema de PSAH se requiere apertura, inclusión y capacidad de diálogo entre los actores involucrados. Sin embargo, en el escenario actual de la microcuenca, no existe una relación bien definida entre los diferentes actores sociales, de manera que las interrelaciones en torno al recurso agua se han venido dando sin ser evidenciadas. Los potenciales oferentes, beneficiarios y mediadores del PSAH se encuentran desarticulados, siguiendo cada uno sus propios intereses y metas.

En este contexto, es importante la creación de esquemas institucionales para la gestión, de manera que se puedan reconocer y definir derechos, responsabilidades, asegurar acuerdos, establecer normas y resolver conflictos, tomando en cuenta los intereses de cada grupo (Merino, 2005; Mayrand *et al.*, 2004; Rosa *et al.*, 2004). Los convenios de PSA, generalmente dependen de la

existencia o la creación de otras instituciones de apoyo que reúnan a los oferentes, beneficiarios y mediadores. De tal manera que se coordinen esfuerzos y se asegure la transparencia e imparcialidad (FAO y REDLACH, 2004).

Los potenciales oferentes en la microcuenca incluyen a 7 núcleos agrarios y 3 organizaciones sociales. La comunidad de La Magdalena Atlitlic es el grupo social con mayor representación, capacidad de organización y autoridad dentro del territorio, por lo que es el mejor candidato para cumplir esta función. Un problema es el descontento entre la población por el procedimiento que se utilizó para realizar el censo comunal ya que actualmente sigue siendo una causa generadora de pugnas. Los constantes conflictos provocan cierta división entre sus miembros limitando su capacidad de organización y la posibilidad de llegar a acuerdos.

Por otro lado, el aprovechamiento de los recursos naturales que están haciendo en la microcuenca es limitado debido a las restricciones que implica el estar dentro del suelo de conservación del Distrito Federal, sin embargo algunas de las actividades productivas que realizan en la zona tienen cierto impacto negativo en sus ecosistemas. El recibir incentivos económicos podría estimularlos para modificar las practicas no deseables, hacer actividades de conservación e incluso frenar las presiones externas como la invasión de terrenos. Posibilitando así la conservación de la microcuenca y contribuyendo al desarrollo social de los involucrados.

La Asociación de comerciantes unidos de los Dínamos, el Grupo Luis Cabrera, y el Grupo Mexicantiahui A.C., son organizaciones con objetivos propios y muy distintos entre sí, sin embargo muchas de sus miembros también forman parte de la comunidad de La Magdalena Atlitlic, por lo que de alguna manera ya estarían representados. No obstante, en general existe un constante conflicto entre ellas, por lo que si no son tomadas en cuenta, se pueden generar nuevos conflictos y poner en riesgo su participación activa y comprometida dentro de un esquema de PSA.

El resto de los núcleos agrarios tienen muy poca representación dentro de la microcuenca, ya que solo abarcan una pequeña fracción del territorio. Cabe señalar que existe otro problema en cuanto a la tenencia de la tierra, ya que una parte de la microcuenca mantiene problemas legales por disputas entre los límites

de algunos terrenos. Destacan los terrenos en litigio ubicados en la parte alta, ya que esa zona es de gran importancia para los distintos procesos hidrológicos que permiten la generación del servicio ambiental de provisión de agua. En ausencia de la seguridad de la tenencia de la tierra, los implicados podrían carecer de la autoridad para establecer compromisos relacionados con esta zona. Además, el conflicto de tierras puede agudizarse al existir una posibilidad de ingresos para aquellos que argumenten ser dueños de las mismas.

Cuando se habla de beneficiarios de servicios ambientales, generalmente se refiere a los usuarios del agua: las empresas de generación de energía hidroeléctrica, las empresas distribuidoras de agua potable, las empresas que utilizan agua para fines industriales, las empresas de transporte acuático, los usuarios finales del agua, etc. (Pérez *et al.*, 2002). En la microcuenca del río Magdalena, los usuarios se definieron como la población ubicada fuera de la microcuenca que recibe agua potable procedente de los subsistemas río Magdalena y Reynaco. Esta población es la que más agua está utilizando, en relación con los otros usuarios del agua. Sin embargo los problemas de distribución de la red de agua potable pueden ser un factor que los desaliente a participar por desconfianza hacia las autoridades encargadas del abasto, además de que primero se deben corregir los problemas relacionados con la infraestructura y la eficiencia del servicio de agua potable.

Por otro lado, la población que resulta beneficiaria, presenta una situación económica no muy favorable, ya que más de la mitad de la población económicamente activa recibe menos de 2 salarios mínimos por su trabajo, lo cual va a limitar la disponibilidad para pagar por mantener los servicios ambientales.

El panorama para la inclusión de los beneficiarios dentro de un proceso de gestión de PSAH parece algo desalentador dados los problemas antes mencionados. Es importante que sus necesidades y propuestas también sean escuchadas de manera que se establezcan espacios de diálogo y concertación, que den paso a una participación activa en el proceso. En este sentido, la intervención de las instituciones mediadoras tendrá un papel trascendental.

Las instituciones mediadoras propuestas se refieren a dependencias de los tres órdenes de gobierno e instituciones educativas. Las cuales en conjunto

pueden cubrir las etapas de planeación, organización, negociación, operación y evaluación del mecanismo de pago por servicios ambientales.

Cabe señalar, que la presente propuesta no plantea eximir a las autoridades de sus responsabilidades actuales en la conservación de los bienes y servicios públicos. Al contrario, se pretende que además de sus responsabilidades actuales, se aprovechen sus capacidades institucionales para enlazar el capital social existente e incluir a los demás actores sociales en la toma de decisiones. Así como para apoyar y fortalecer la capacidad de autogestión de los beneficiarios y oferentes.

5.3. La modelación hidrológica como base para el PSAH.

La modelación hidrológica es una herramienta que permite analizar los procesos del ciclo hidrológico, tratando de representar lo mejor posible la realidad. A diferencia de las técnicas de separación de hidrogramas, la modelación incluye todos los elementos del ciclo hidrológico y los sintetiza.

Aunque los resultados de una modelación nunca van a ser exactos en relación a lo que sucede en las cuencas, aportan información muy importante para la toma de decisiones, durante el proceso de gestión de los PSAH (Pérez *et al.*, 2006). En el presente estudio, la calibración del modelo tuvo un ajuste aceptable entre los valores observados y los valores simulados a nivel anual, para el año 1999, lo cual permitió utilizar esos datos para el análisis de la información. Sin embargo, cabe señalar que los valores del análisis estadístico a nivel diario no son aceptables por lo que la información solo pudo utilizarse a nivel anual y mensual.

El modelo SWAT, permitió analizar espacialmente cada componente del ciclo hidrológico tanto en la dimensión longitudinal (de la cabecera a la salida de la microcuenca), como en la vertical (componentes atmosféricos, superficiales y subterráneos). Lo cual mejoró el conocimiento que se tiene en cuanto a cómo se mueve el agua en el sistema y cuál es la importancia de los ecosistemas presentes en la microcuenca.

Con el análisis de la respuesta hidrológica se observó, al igual que en el capítulo 4.1 (Cuantificación de la oferta de agua) que el escurrimiento total está mayoritariamente constituido por escurrimiento base. Las UE con mayor

escurrimiento total se ubican en la parte media alta de la cuenca, en donde coinciden las zonas con alto escurrimiento base y escurrimiento directo, así como con una precipitación más elevada. Sin embargo, ubicar las zonas con mayor escurrimiento total no tiene un significado muy preciso para la toma de decisiones, es por ello que se requiere separar los componentes del escurrimiento, a fin de especificar en donde se están llevando a cabo los diferentes procesos, con qué importancia y qué papel tienen para el servicio ambiental de provisión de agua.

Como ya se mencionó, el escurrimiento base es uno de los elementos del ciclo hidrológico que tiene una mayor importancia para la generación del servicio ambiental de provisión de agua. En este caso los datos arrojados muestran que este tipo de escurrimiento está siendo alimentado en un 70.2% por escurrimientos laterales subsuperficiales, mientras que el 29.8% proviene del acuífero no confinado. Este es un dato importante ya que indica que la alimentación de los cauces tiene una respuesta relativamente rápida a los eventos de precipitación, dado que el escurrimiento subsuperficial se mueve más rápidamente que el escurrimiento subterráneo.

El escurrimiento subsuperficial está muy influenciado por las características del suelo, la presencia de un estrato relativamente impermeable a pequeña distancia de la superficie, favorece este tipo de escurrimiento. También es espacialmente importante en zonas boscosas con vertientes de pendiente suave y una gruesa capa vegetal (Linsley *et al.*, 1977; Remeiras, 1974). Tal es el caso de la microcuenca, en la que aproximadamente el 94% de su área presenta una cobertura forestal (aunque con un grado de conservación heterogéneo) y sus suelos son profundos en la mayor parte del territorio.

Cabe señalar que entre más importante sea la capacidad de reserva de agua en el suelo y el clima presente periodos de exceso y déficit de agua mas marcados en el año, los cambios en el uso de suelo y vegetación tendrán una mayor influencia en la formación de los escurrimientos subsuperficiales (Viramontes y Descroix, 2001). Especialmente si los suelos son profundos (Tognetti, *et al.*, 2004). Por esta razón es importante mencionar que si no se tiene cuidado en la conservación de la microcuenca los efectos podrán ser evidentes rápidamente.

Por otro lado, el escurrimiento proveniente del acuífero no confinado también está contribuyendo con un importante volumen al escurrimiento base. En este caso, adquieren gran importancia las características geológicas de la zona, pues en este caso son las fracturas y los materiales porosos de la roca volcánica los que están permitiendo el movimiento y la descarga del agua a través de los acuíferos de la microcuenca (DGCOH, 2000a). Aunque el escurrimiento proveniente de los acuíferos es menos susceptible a los cambios de la vegetación, si existe un cambio importante en su cobertura, también tendrá influencias en su respuesta hidrológica.

Los resultados arrojados con los escenarios alternos permiten reafirmar lo antes mencionado, ya que la oferta de agua por escurrimiento base se vio severamente afectada por cambios en el uso de suelo y vegetación. De acuerdo al escenario 1, si las condiciones de la microcuenca hubieran sido mejores al estado actual, la mejora en la oferta de agua generada por escurrimiento base habría sido de 252,150.3 m³ anuales, este valor sería suficiente para abastecer a una población extra de aproximadamente 3,500 habitantes, con una dotación diaria de 200 l/hab/día. En el caso contrario, si las condiciones de la microcuenca hubieran sido desfavorables como el escenario 2, se habrían perdido durante ese año 2,165,611.1 m³ de agua ofertados por escurrimiento base, que es equivalente a la dotación para una población aproximada de 29,700 habitantes.

Las zonas que contribuyen de manera importante al escurrimiento base se encuentran principalmente en la parte media alta de la microcuenca. En las cuales los suelos son principalmente de tipo Andosol y existe una vegetación predominantemente de bosque de pino y bosque de oyamel. Asimismo, es en esta área donde se distribuye el mayor número de manantiales de la microcuenca (16 en total). Se consideraría entonces, que ésta es la zona que presenta mayor fragilidad en cuanto a la capacidad de ofertar el servicio ambiental de provisión de agua, por lo que se recomienda que sea una zona privilegiada para la protección de sus recursos forestales.

La escorrentía directa se manifestó principalmente en zonas con grandes extensiones con pastizal natural e inducido, así como en las UE con pendientes más pronunciadas. El volumen de agua que contribuye al cauce por esta vía es

realmente poco en comparación con el resto de escurrimientos, gracias a las características actuales de la microcuenca. Sin embargo los escenarios planteados muestran que un estado de conservación de la vegetación mejor que la actual provocaría una disminución de 375,199.7 m³ anuales de escurrimiento directo en comparación a los volúmenes actuales. Mientras que el deterioro de la vegetación provocaría un aumento de 2,873,361.02 m³ anuales.

En otras palabras, si existiera un alto grado de alteración de la vegetación, las avenidas en época de lluvia serían más grandes, mientras que el escurrimiento base, que permite mantener la oferta de agua a lo largo de todo el año disminuiría, y por lo tanto, también la capacidad de la cuenca y sus ecosistemas para generar el servicio ambiental de provisión de agua.

En cuanto a la infiltración profunda, se observó que se está generando principalmente en la parte alta de la microcuenca. Presenta algunas similitudes con las zonas importantes para el escurrimiento proveniente del acuífero no confinado. Esto sucede porque el modelo predice la infiltración profunda en las zonas en donde el acuífero no confinado está saturado permitiendo el avance del agua a zonas más profundas. En las zonas con un déficit de agua la infiltración profunda se detiene.

La importancia de los ecosistemas forestales en este rubro, está relacionada en principio, con las características de sus suelos, ya que mientras más porosos y ricos en material orgánico sean éstos, con un sistema radicular denso y profundo, mayor es su capacidad de infiltración de agua (Brüschweiler *et al.*, 2004). Sin embargo cuando hablamos de infiltración profunda, las características geológicas adquieren gran relevancia. Como ya se mencionó las formaciones rocosas son de origen volcánico y presentan una permeabilidad secundaria por fracturación, por lo que el agua que se está infiltrando hasta los acuíferos confinados o fuera de la microcuenca probablemente se está moviendo por estas fracturas.

De acuerdo a los escenarios alternos, la mejora en el estado de la vegetación permitiría un aumento en la infiltración profunda, de 174,343.9 m³ de agua, en relación a los volúmenes actuales. Mientras que en el escenario 2 se estarían dejando de infiltrar 1,073,151.78 m³ de agua al año. Estos datos

adquieren gran relevancia si tomamos en cuenta que la microcuenca se encuentra dentro del área de influencia del acuífero 901 (Zona Metropolitana de la Ciudad de México), mismo que tiene un déficit anual de 969.5 millones de metros cúbicos por sobreexplotación (CONAGUA, 2002).

En cuanto a la evapotranspiración, se observó que las zonas en donde predominan bosques de pino y oyamel se encuentran los valores más altos. Esta característica está relacionada con el índice de área foliar. El volumen de agua que regresa a la atmósfera por esta vía es inferior al 50% de la lámina de precipitación, por lo que los valores son normales para este tipo de vegetación y bajo las condiciones climáticas prevalecientes en la zona. Desde un punto de vista cuantitativo, un bosque, por lo general, retorna menos agua al suelo que los pastizales o áreas de cultivo bien manejados, ya que el bosque devuelve mayores cantidades de agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Sin embargo, el denso y profundo sistema radicular del suelo forestal y la alta porosidad de sus horizontes esencialmente orgánicos, le dan una excelente capacidad de filtración y retención de agua (Brüschweiler *et al.*, 2004). Por esta razón, a pesar de que se evapotranspira una gran cantidad de agua, este efecto se ve compensado por el resto de interrelaciones de los ecosistemas, que permiten que la oferta de agua se mantenga a lo largo del año en la microcuenca del río Magdalena.

6. CONCLUSIONES

La microcuenca del río Magdalena presenta características hidrológicas y ecológicas que hacen que su territorio adquiera gran importancia para la generación de servicios ambientales, especialmente en cuanto a su capacidad para ofertar el servicio ambiental de provisión de agua. Sin embargo las diversas presiones internas (como las actividades productivas, los incendios forestales, las plagas, etc.) y externas (como el crecimiento de la mancha urbana y los asentamientos irregulares) están poniendo en riesgo la capacidad de la microcuenca para proveer este importante servicio ambiental a las generaciones futuras, en el escenario local.

Por otro lado, en el escenario regional, la microcuenca se encuentra inmersa dentro de la Cuenca del Valle de México, que manifiesta un agudo *stress* hídrico. En el que la transformación drástica del medio natural y la sobreexplotación de sus recursos hidrológicos han tenido un papel fundamental. Por lo que la conservación de todas las fuentes de aprovechamiento de agua debe ser considerada como una prioridad.

En este contexto, la generación de un esquema de PSAH en la microcuenca del río Magdalena se plantea como un espacio de gestión que permita el manejo sustentable del recurso. Sin embargo, hay que tomar en consideración, que para que esta propuesta funcione, es necesario que forme parte de un verdadero manejo integrado de la microcuenca, en el que igualmente sea importante la conservación de los recursos naturales, como el desarrollo social y económico.

El análisis de los componentes del ciclo hidrológico mediante el empleo de técnicas de separación de hidrogramas y la modelación hidrológica, permitió una mayor comprensión de los procesos que se llevan a cabo en la microcuenca para que exista el servicio ambiental de provisión de agua. Así como para evaluar el papel de los ecosistemas forestales en la respuesta hidrológica.

En este sentido, el mantenimiento de la oferta de agua en la microcuenca, está muy ligado a su capacidad para producir escurrimiento base, que durante los

años de estudio fue de 810 l/s en promedio. Siendo el componente subsuperficial el que aporta un mayor volumen con el 70.2% del escurrimiento base.

La oferta de agua presenta una marcada variación estacional en la que el mayor volumen coincide con la época de lluvias, sin embargo no se cuenta con datos históricos suficientes para comprometer un volumen específico.

La infiltración profunda también representa un importante componente del ciclo hidrológico para la generación del servicio ambiental de provisión de agua, ya que la microcuencas se encuentra dentro del área de influencia del acuífero 901 (Zona Metropolitana de la Ciudad de México), mismo que tiene un déficit muy importante. La lámina anual de infiltración profunda calculada fue de 126.56 mm.

Las Unidades de Escurrimiento con mayor importancia se encuentran en la parte media alta de la microcuencia y son las siguientes: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 (Figuras 30, 31 y 33). Por lo que es prioritario realizar actividades de conservación en esa zona. Sin embargo, aunque el resto de la microcuencia presenta menores valores de escurrimiento base e infiltración también contribuyen de manera importante al servicio ambiental de provisión de agua.

El empleo de los escenarios alternos de uso de suelo y vegetación permitió demostrar que la vegetación representa un importante factor para la conservación del servicio ambiental de provisión de agua. Ya que la respuesta hidrológica presentó variaciones importantes en los escurrimientos directo y base, así como en la infiltración profunda.

La información hidrológica generada aporta fundamentos científicos claros, que podrán ser tomados en cuenta para la planificación de actividades de conservación y desarrollo productivo dentro de un esquema de PSAH dentro de la microcuencia del río Magdalena. Así como para la valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua.

Por otro lado, la descripción del aprovechamiento actual del agua que se genera en la microcuencia y la identificación de actores sociales, son elementos clave para la gestión del esquema de PSAH. Ya que podrán servir de base para iniciar un proceso de organización y negociación.

El agua que se genera en la microcuencia río Magdalena, es utilizada principalmente para abastecimiento doméstico. Los usuarios que se encuentran

dentro de la microcuenca actualmente cubren todas sus necesidades con el aprovechamiento de los manantiales y el río. Los usuarios externos del agua presentan graves problemas de distribución ligados al mal estado de la red de abastecimiento local.

El principal grupo social organizado que puede actuar como oferente dentro de un esquema de PSAH es la comunidad de La Magdalena Atlitic, esto gracias a que tiene mayor representación, capacidad de organización y autoridad dentro del territorio. Los principales beneficiarios en el esquema de PSAH son los usuarios externos del agua, que representan a una población aproximada de 118,237 habitantes. Sin embargo, la situación económica de la población y la problemática en la distribución del agua son problemas pueden complicar la implementación del PSAH.

Las principales instituciones que pueden actuar como mediadoras en el procesos de implementación y desarrollo de un esquema de PSAH son las siguientes: Comisión Nacional del Agua, Comisión Nacional Forestal, secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Delegación La Magdalena Contreras, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de Querétaro.

7. RECOMENDACIONES

- La microcuenca del río Magdalena cuenta con la enorme ventaja de tener una estación hidrométrica a su salida, lo cual permitió aprovechar la información existente para analizar los procesos hidrológicos de su interior, sin embargo los registros precintan huecos de información y corresponden a un corto periodo de tiempo. Por esta razón sería recomendable que se actualizara la información realizando nuevas mediciones a fin de que se pudieran tener registros históricos y contar con mayor información para la toma de decisiones. La permanencia en el tiempo de estas acciones de monitoreo hidrométrico, permitiría además contar con elementos de valoración para cuantificar los efectos positivos o negativos de los usos del suelo en la microcuenca.
- Uno de los aspectos de gran importancia para el correcto funcionamiento de un esquema de PSAH, es contar con seguridad en la tenencia de la tierra, por lo que es muy importante que se determine la posesión legal de todo su territorio.
- Para iniciar un proceso de gestión de PSA, la difusión de la información es fundamental ya que permite concientizar e incentivar la participación, por lo que será muy importante tener un acercamiento con todos los actores implicados y compartir todos los estudios que se han hecho dentro de la microcuenca enfocados a su conservación.
- Para la valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua en la microcuenca río Magdalena, se recomienda utilizar métodos que contemplen tanto la percepción y disponibilidad de la gente a pagar, como el costo de conservación en la microcuenca. Siendo el método de Valoración Contingente y el método de Coste de Prevención de Daños adecuados para ello.
- El tipo de mecanismo de PSA que se utilice deberá ser accesible y sencillo. Dado que la institución encargada del manejo del agua en la zona es el SACM, el pago podría realizarse a través de su conducto, mediante un impuesto o aportación voluntaria cargada a los recibos de pago.

LITERATURA CITADA

- Abad, C.N.G., 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Tesis de Maestría, División de Ingeniería y Arquitectura, ITESM, Monterrey. N.L. México.
- Abbot, M. B., y J.C. Refsgaard, 1986. Distributed Hydrological Modeling. Kluwer Academy Publishers. Netherlands.
- Aburto, E., y M. Ogier, 2005. La gestión local a través de acciones de pagos por servicios ambientales hídricos. Fondo Mink'a de Chorlaví. Santiago, Chile.
- Almeida, L.L., M. Nava, A. Ramos, M. Espinoza, M. Ordoñez, y J. Jujnovsky, 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta ecológica*, 84-85: 53-64.
- Alvarado, C.B., 2004. Contribución a la gestión integral de cuencas mediante la creación de esquemas para el pago por el servicio ambiental (mantenimiento del recurso hídrico) a través del manejo o conservación de cobertura vegetal de las cuencas altas de los valles de la costa peruana. *Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: <http://www.rlc.fao.org/foro/psa/>
- Álvarez, R.K.E., 2000. Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el bosque de los Dínamos, área de conservación ecológica de la delegación Magdalena Contreras. Tesis Profesional, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México, D.F.
- Andrade, P. A., y L.F. Navarrete, 2004. Lineamientos para la aplicación del enfoque Ecosistémico a la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México, D.F.
- Aparicio, M.F.J., 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. México.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, y J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
- Arnold, J. G., y P. M. Allen, 1999. Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *Journal of American Water Resources Association*, 35: 411-424.

- Ávila, A.V.D., 2002. La vegetación de la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- Ávila, A.V.D., 2005. Mapa de vegetación y uso de suelo de la cuenca alta del río Magdalena. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- Bathurst, J. C., J.M. Wicks, y P.E. O'Connell, 1995. Computer models of watershed hydrology. Chapter 16: The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modeling system. Water Resources Publications. U.S.A.
- Blauert, J., y S. Zadek, 1999. Mediación para la sustentabilidad. Construyendo políticas desde la bases. Instituto de estudios del desarrollo de Sussex, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Consejo Británico en México, Plaza y Valdés. México.
- Becker, A., y B. Pfützner, 1987. EGMO-System Approach and Subroutines for River Basin Modelling. *Acta Hydrophysica*, 31: 125-141.
- Beven, K. J., A. Calver, y E. M. Morris, 1987. The Institute of Hydrology Distributed Model. Institute of Hydrology. Oxon, U.K.
- Bonfil, H., y L. Madrid, 2006. El pago por servicios ambientales en la cuenca de Amanalco-Valle de Bravo. *Gaceta Ecológica*, 080: 63-79.
- Boughton, W.C., 1993. A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 93(14): 317-324.
- Boyd, J., y S. Banzhaf, 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63:616-626.
- Brüschweiler, S., U. Höggel, y A. Kläy, 2004. Los bosques y el agua: Interrelaciones y su manejo. Informes de desarrollo y medio ambiente, No. 19. Geographica Bernesia, Centro de Desarrollo y Medio Ambiente. Berna, Suiza.
- Burstein, J., G. Chapela y Mendoza, J. Aguilar, y E. de León, 2002. Informe sobre la Propuesta de Pago por Servicios Ambientales en México. Fundación FORD, Fundación PRISMA. Chiapas, México.
- Butze, A.W., y A.A. Cárdenas, 2004. Situación Actual y Perspectivas del Agua en México. En: García, A.P., L. Gutiérrez, y G. Torres (Ed.), El Nuevo Milenio Mexicano, Tomo IV. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, EON. México, D.F.
- Calder, I., 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology*, 18: 625-631.

- Calver, A., y W.L. Wood, 1995. The Institute of Hydrology Distributed Model. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource publications. Colorado, U.S.A.
- Campos, J.J., F. Alpizar, B. Louman, J. Parrotta, y R. Madrigal, 2006. Enfoque integral para esquemas de pago por servicios ecosistémicos forestales. Cuaderno de trabajo. *Segundo Congreso IUFRO-LAT*. La Serena, Chile.
- Carabias J., R. Landa, J. Collado, y P. Martínez., 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. UNAM, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte. México, D.F.
- Carrillo, R., M. Alconada, A. Peñuela, O. Romero, A. Godoy, M. Carbajal, y C. Parada, 2006. Sistema de información hidrológica para el diseño de un programa de pago por servicios ambientales en un municipio con potencial para la instrumentación de un mercado de servicios hidrológicos. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Castelán, C.E., 2000. Análisis y perspectiva del recurso hídrico en México. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C., Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre el Medio Ambiente, IPN. México, D.F.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), 1994. Políticas públicas para el desarrollo sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas. *Segundo Congreso Latinoamericano de Cuencas Hidrográficas*. División de Recursos Naturales y Energía. Mérida, Venezuela.
- Chagoya, F. J., 2008. Algunas preguntas importantes a considerar cuando se desea instrumentar un esquema de Pago de Servicios Ambientales Hídricos. En: Paré, L., R. Dawn, y M. A. González (Ed.), *Gestión de Cuencas y Servicios Ambientales. Perspectivas comunitarias ciudadanas*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, ITACA A.C., Raíces A.C. México, D.F.
- Chapman, T.G., y A.L. Maxwell, 1996. Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments. *Institute Engineers, Australia National Conference*, 96(05): 539-545.
- Chávez, Z. G., y M.R. Martínez, 2000. Aspectos jurídicos de la gestión del agua por cuenca hidrológica en México. Organización Meteorológica Mundial, Comisión Nacional del Agua, Programa de Modernización del Manejo del Agua. México, DF.
- Chávez, Z.G., 2004. Del gobierno a la gobernabilidad de los recursos hídricos en México. En: Cotler, H. (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

- Chow, V. T., D. R. Maidment, y L. W. Mays, 1994. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Colombia.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2006. Servicios Ambientales Forestales. Cuarto Foro Mundial del Agua, Consejo Mundial el Agua. México, D.F.
- CONAFOR, 2008. Servicios Ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php?s1=13>
- CONDESAN (Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina), 2006. Pago por servicios ambientales. Buscando incentivos para promover el uso sostenible de los recursos y generar nuevas dinámicas de desarrollo en las cuencas hidrográficas. *Diálogo de políticas*, 2:1-4.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. CONAGUA. México, D.F.
- Cuellar, J.C., y A. López, 2002. Seminario Taller: Los Servicios Ambientales en el país, con énfasis en el recurso agua. Foro: Municipios rurales y gestión local participativa en zonas de montañas. Sustainable Agriculture and Natural Resource Management, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, InfoAndina, Comisión Interministerial de Empleo. Quito, Ecuador.
- Daily, G., 1997. What are Ecosystem Services? En: Daily, G.(Ed.) Nature's Services, Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, dc, USA.
- De Groot, R.S., M.A. Wilson, y R.M.J. Boumans, 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41:393-408.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 1999. Obtención de datos hidrométricos de cinco cauces de la zona Poniente del Distrito Federal. UNAM, Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2000a. Estudio para la actualización de la base de datos de los manantiales ubicados en las zonas poniente y sur poniente a cargo de la DGCOH en el Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2000b. Estudio para la operación de las estaciones hidrométricas de los ríos Magdalena y San Ángel Inn. Innovación Tecnológica en Ingeniería Hidráulica S.A. de C.V., Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2000c. Estudio de factibilidad para el aprovechamiento integral del caudal del río Magdalena y propuesta para incrementar la capacidad de tratamiento de la planta

potabilizadora. Acuario Ingenieros S.A. de C.V., Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.

DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2001a. Plan de Acciones Hidráulicas 2001-2005, Delegación Magdalena Contreras. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.

DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2001b. Estudio para la medición de caudales sanitarios y pluviales durante el año 2001, en las estaciones hidrométricas Magdalena y Villa Verdun, instaladas en la delegación Magdalena Contreras del Distrito Federal. Informe Parcial. Gobierno del Distrito Federal, COICSA. México, D.F.

DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), 2002. Estudio integral para resolver los problemas de tandeos en las delegaciones Magdalena Contreras, Tlahuac y Tlalpan, y definir las obras para regular el suministro de agua potable. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.

Di Luzio, M., R. Srinivasan, J.G. Arnold, y S.L. Neitsch, 2002. ArcView Interface for SWAT2000, User's Guide. Texas Water Resources Institute. U.S.A.

Dourojeanni, A., A. Jouravlev, y G. Chávez, 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Serie Recursos Naturales e Infraestructura No. 47. Comisión Económica para América Latina. Santiago de Chile, Chile. Disponible en: <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/5/11195/P11195.xml&xsl=/drni/tpl/p9f.xsl&base=/tpl/top-bottom.xslt>

Dourojeanni, A., y A. Jouravlev, 1999. Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Duarte, C.M., S. Alonso, G. Benito, J. Dach, C. Montes, M. Pardo, A.F. Ríos, R. Simó, y F. Valladares, 2006. Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.

Equihua, Z. M., V. L. Muñoz, C.G. Castillo, P.E. Meza, y H.B. Friso, 2007. Medición y análisis de los efectos de distintos tipos de cubierta forestal sobre los procesos climáticos, hidrológicos y erosivos en Veracruz, México. Reporte Técnico Final. Instituto de Ecología A.C., Vrije Universiteit Amsterdam. México.

Espinoza N., J. Gatica, y J. Smyle, 1999. El pago de servicios ambientales y el desarrollo sostenible en el medio rural. Serie de publicaciones RUTA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.

Estrada, R. D., y M. Quintero, 2004. Propuesta metodológica para el análisis de cuenca: Una alternativa para corregir las deficiencias detectadas en la implementación del pago por servicios ambientales. *Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*. Organización de las Naciones

Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: <http://www.rlc.fao.org/foro/psa/>

Evans, R., y B. Neal, 2005. Baseflow analysis as a tool for groundwater – surface water interaction assessment. International Water Conference, New Zealand Hydrological Society, New Zealand Society of Soil Science, International Association of Hydrogeologists. Auckland, New Zealand.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2007. La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. FAO. Roma, Italia. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0644s/>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), y REDLACH (Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas), 2004. Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas, INFORME FINAL. Santiago, Chile.

Fernández, E.A., C.F. Uribe, R.I. Ramírez, A.B. De Jesús, y M.A. Vázquez, 2002. Evaluación de la mancha urbana sobre el área natural protegida de La Cañada de los Dínamos. *Gaceta Ecológica*. 062: 56-6

Figuroa, M., 2005. Curso en Manejo Ambiental del Recurso Agua: Caudal. Universidad de Talca. Chile.

Fortin, J. P., R. Turcotte, S. Massicotte, J. F. Moussa, y J. P. Villeneuve, 2001. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS, Data I: Description of Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 06(02): 91-99.

Fregoso, A., 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica*. 078: 29-46.

García, C.I., 2002. Potencial de Recarga de Acuíferos y Estabilización de Ciclos Hídricos de Áreas Forestadas. Reporte de Investigación. Instituto Nacional de Ecología, Planeación, Desarrollo y Recuperación Ambiental, S.C. México, D.F.

García, C.I., A.O. Martínez, A.S. Ramírez, A. C. Niño, A. R. Juan, y L.B. Domínguez, 2004. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: Cotler, H. (Ed), El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

García, E., 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Georgakakos, K.P., J.A. Sperflage, D. Tsintinkidis, T.M. Carpenter, W.K. Krajewski, y A. Kruger, 1999. Design and test of an integrated hydrometeorological forecast

system for the operational estimation and forecasting of rainfall and streamflow in the mountainous Panama Canal Watershed. Hydrologic Research Center. San Diego, California.

Green, W.H., y G.A. Ampt, 1911. Studies on soil physics, part I: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4(1): 1-24.

Guerra, C.H.V., 2007. Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca, México.

Guerrero, E., O. De Keizer, y R. Córdoba, 2006. La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos. Un análisis de estudios de caso en América Latina. Unión Mundial para la Naturaleza. Quito, Ecuador.

Guerrero, F.E., 2007. El enfoque ecosistémico aplicado a la gestión del agua. Una perspectiva desde América Latina. En: Andrade, P.A. (Ed.), Aplicación del Enfoque Ecosistémico en Latinoamérica. Comisión sobre Manejo Ecosistémico, Unión Mundial para la Naturaleza. Bogotá, Colombia.

GWP (Global Water Partnership), 2000. Manejo Integrado de Recursos Hídricos. Comité de Consejo Técnico. Santiago de Chile, Chile.

Hartmann, J., y L. Petersen, 2006. El mercadeo de servicios ambientales: lecciones aprendidas en el desarrollo cooperativo alemán. En: Merino, L., y J. Robson (Ed.), El manejo de los recursos de uso común: pago por servicios ambientales. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C., The Christensen Fund, Fundación Ford, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

Hernández, B.E., 2005. Estimación del escurrimiento en una ladera de alta pendiente reforestada con *Pinus tenuifolia*, usando el método del Número de la Curva. *Revista Forestal Venezolana*, 49(1): 49-59.

Hernández, S.R., C.C. Fernández, y P.L. Baptista, 2003. Metodología de la investigación. McGraw Hill. México.

Herrero, J., M.I. Rodríguez, A. Avilés, y J. Rodero, (2004). Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. SWAT aplicado a la cuenca del Guadalfeo. *IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Tortosa, España.

Huber, A., y R. Trecaman, 2002. Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque*, 23(2): 43-49.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2007. ERIC III Extractor Rápido de Información Climatológica v.1.0. IMTA. México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1992. Guía para la interpretación de la carta edafológica. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1998a. Diccionario de datos edafológicos. Escala 1:250 000. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1998b. Geología. Escala 1:50 000. NAD_27_UTM_Zone_14N. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2000a. SINCE por localidad, Distrito federal. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2000b. Modelo Digital de Elevación. Formato raster, escala 1:50,000. NAD_27_UTM_Zone_14N. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2004. Información Nacional sobre Perfiles de Suelo, Versión 1.2. INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2005. Principales resultados por localidad 2005 (ITER). INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2008. Proyecto IRIS-SCINCE II: Censo de Población y Vivienda 2005, Distrito Federal. INEGI. México.
- Instituto de Hidrología, 1980. Low Flow Studies. Reporte de investigación No. 1. Instituto de Hidrología. Wallingford, UK.
- Izazola, H., 2001. Agua y Sustentabilidad en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 47: 285-320.
- Jiménez, F., 2004. La cuenca hidrográfica como unidad de planificación, manejo y gestión de los recursos naturales. En: Fernández, A., y V. Sánchez (Ed), El agua en Iberoamérica. Experiencias en gestión y valoración del agua. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Buenos Aires, Argentina.
- Jujnovsky, O.J., 2003. Las unidades de paisaje en la cuenca alta del río Magdalena, México D.F. Base fundamental para la planificación ambiental. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- Jujnovsky, O.J., 2006. Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- Julien, P.Y., y B. Saghafian, 1991. CASC2D user's manual. Department of Civil Engineering, Colorado State University. Colorado, U.S.A.

- Kaimowitz, D., 2001. Useful Myths and Intractable Truths: The Politics of the Link between Forests and Water in Central America. Working paper. Center for International Forest Research. San José, Costa Rica.
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report 26. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Kosten, S., y E. Guerrero, 2005. Fundamentos para la Aplicación del Enfoque Ecosistémico en el Manejo de Cuencas Hidrográficas y Humedales Fluviales. En: Humedales Fluviales de América del Sur: Hacia un Manejo Sustentable. Ediciones Proteger. Argentina.
- Landell, M.N., y I.T. Porras, 2002. Silver bullet or fools' gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor. International Institute for Environment and Development. Londres, Inglaterra.
- Ledoux, E., G. Girard, y G. De Marsily, 1989. Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In: Morel-Seytoux H.J. (Ed.), Unsaturated flow in hydrologic modeling, theory and practice. Kluwer Academic Publishers. Boston, USA.
- Lim, K.J., B.A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. Kim, S. Muthukrishnan, y D. Tripathy, 2005. Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6): 1407-1416. Disponible en: <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~what/>
- Lindholm, P., y I. Stenbeck, 1993. Rainfall, soil loss and the effect of vegetation cover; Results of measurements in a tree plantation area in West Pokot District of Kenya. Working Paper No 244. International Rural Development Center, University of Agricultural Sciences. Uppsala, Suecia.
- Linsley R.K., M.A. Kohler, y J.L.H. Paulus, 1977. Hidrología para ingenieros. McGraw-Hill Latinoamericana. México.
- Llerena, C.A., 2004. Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. *Foro electrónico latinoamericano sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: <http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/llerena.pdf>
- Lyne, V., y M. Hollick, 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 79(10): 89-93.
- MA (Evaluación de Ecosistemas del Milenio), 2005. Ecosistemas y Bienestar Humano: Informe de Síntesis. World Resources Institute. Washington, DC.

- Machín, H.M., 2008. Reflexiones en torno a los pagos por servicios ambientales como vía para el mantenimiento, conservación y protección de los recursos naturales. *Revista Futuros*. 20(06). Disponible en: <http://www.revistafuturos.info>
- Maderey, R.L.E., y R.A. Jiménez, 2005. Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Geografía para el siglo XXI, Serie Textos Universitarios No.1. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- Marín, X., M. Ogier, C. Pérez, y M.A. Martínez, 2006. Elementos metodológicos para la implementación de pagos por servicios ambientales hídricos al nivel municipal en Centroamérica. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. Honduras.
- Martínez de Anguita, P., S. Rivera, J.M. Benítez, y F. Cruz, 2006. Establecimiento de un mecanismo de pago por servicios ambientales sobre un soporte GIS en la cuenca del río Calan, Honduras. *GeoFocus*, 7: 152-181.
- Martínez, A. J., 2000. Economía Ecológica y Política Ambiental. Fondo de Cultura Económica. México.
- Mayrand, K., M. Paquin, y C. Line, 2004. Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes. Unisféra International Center, Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Montreal, Canadá. Disponible en: http://www.cec.org/pubs_docs/documents/index.cfm?varlan=espanol&ID=1697
- Mejías, E.R., y B.O. Segura, 2002. El pago de servicios ambientales en Centroamérica. World Resources Institute, Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible. Heredia, Costa Rica.
- Merino, P.L., 2005. El desarrollo institucional de esquemas de pago por servicios ambientales. *Gaceta ecológica*, 074: 29-42.
- Meunier, M., 1996. La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. *Revista Unasyva*, 47(185): 29-37.
- Morín, G., y P. Paquet, 1995. Le Modèle de Simulation de Quantité et de Qualité CEQUEAU, Guide de l'utilisateur. Vers. 2.0 pour Windows. Rapport de recherche No. 435. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre & Environnement. Quebec, Canadá.
- Morín, G., W. Sochanski, y P. Paquet, 1998. Le modèle de simulation de quantité CEQUEAU-ONU, Manuel de référence. Rapport de recherche no 519. Organisation des Nations Unies, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre & Environnement. Quebec, Canadá.
- Muñoz, C., A. Guevara, J. M. Bulás, J. M. Torres, y J. Braña, 2006. Pagar por los servicios hidrológicos del bosque en México. En: Pagiola, S., J. Bishop, y M.N. Landell. (Ed), La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados

en el mercado para la conservación y el desarrollo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, y K.W. King, 2002. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation, version 2000. Texas Water Resources Institute. Texas, U.S.A.

Nathan, R.J., y T.A. McMahan, 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resources Research*, 26(7):1465-1473.

Noilhan, J., y J.F. Mahfouf, 1996. Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology*. 35: 987-992.

Ogden, F.L., 1998. CASC2D Version 1.18, Reference Manual. Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Connecticut. Storrs. U.S.A.

Pagiola, S., J. Bishop, y M.N. Landell, 2006. La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

Pagiola, S., 2006. Pago por servicios hidrológicos en Centroamérica: enseñanzas de Costa Rica. En: Pagiola, S., J. Bishop, y M.N. Landell. (Ed). La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

Paré, R. y C. Robles, 2008. Gestión territorial del agua en la subcuenca Texizapa-Huazuntlán, sur de Veracruz. En: Paré, L., R. Dawn, y M. A. González (Ed.), Gestión de Cuencas y Servicios Ambientales. Perspectivas comunitarias ciudadanas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, ITACA A.C., Raíces. México, D.F.

Perevochtchikova, J.M, R. Carrillo, y L.A. Peñuela, 2005. Servicios Ambientales Hidrológicos en México 2003/2004: Visión Geográfica. *Encuentro por una Nueva Cultura del Agua en América Latina*. Fortaleza, Brasil.

Pérez, C.J., B. Radoslav, H. Patrick, A. Eddy, R. Lorenzo, y R. Róger, 2002. Pagos por servicios ambientales: Conceptos, principios y su realización a nivel municipal. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. Managua, Nicaragua.

Pérez, M.O., C. Delfín, A. Fregoso, y H. Cotler, 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 078: 65-84.

- Pérez, M.O., C. Delfín, y M. Equihua, 2005. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología A.C. México.
- Pizarro T. R., G.A. Benítez, D.C. Farías, D.C. Jordán, Q.F. Santibáñez, P.C. Sangüesa, P.J. Flores, A.E. Martínez, y A.L. Román, 2005. Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida, Chile. *Bosque*, 26(1): 77-91.
- Porras, I.T., 2003. Valorando los Servicios Ambientales de Protección de Cuencas: consideraciones metodológicas. *III Congreso Latinoamericano de Protección de Cuencas*. Arequipa, Perú.
- Ramos, R.A., 2008. Evaluación y actualización del programa de manejo de la cuenca del río Magdalena. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- Refsgaard, J.C., y B. Storm, 1995. MIKE-SHE. In: Vijay, P. S. (Ed), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Colorado, U.S.A.
- RAN (Registro Agrario Nacional), 2000a. Edafología. Digitalización de la cartografía existente a escala 1:50 000. NAD_27_UTM_Zone_14N. Registro Agrario Nacional. México.
- RAN (Registro Agrario Nacional), 2000b. Tenencia de la tierra. Límites aproximados y sin validez oficial, escala 1:50 000. NAD_27_UTM_Zone_14N. Registro Agrario Nacional. México.
- Remeiras, G., 1974. Tratado de hidrología aplicada. Editores Técnicos Asociados. Barcelona, España.
- Ritchie, J.T., 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8:1204-1213.
- Robertson, N., y S. Wunder, 2005. Huellas Frescas en el Bosque. Evaluación de Iniciativas Incipientes de Pagos por Servicios Ambientales en Bolivia. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia.
- Rosa, H, S. Kandel, L. Dimas, N. Cuellar, y E. Méndez, 2004. Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. Lecciones de las Américas y temas críticos para fortalecer estrategias comunitarias. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente. Instituto Nacional de Ecología, Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), 2000. Estudio de factibilidad para la ampliación de la planta potabilizadora Río Magdalena, Delegación Magdalena Contreras. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.

- SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), 2005. Estudio para la obtención de un balance hidráulico superficial del Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), 2005. Esguurrimientos superficiales. Documento de apoyo. Curso Taller "Desarrollo de capacidades orientadas al aprovechamiento del suelo, agua y vegetación". SAGARPA, México. D.F. Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/desarrollorural/apoyos_dir/curso-taller.htm
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2003. Acuerdo que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2004a. Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2004b. Saber para proteger. Introducción a los servicios ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Hombre Naturaleza, A.C. México, D.F.
- SMA (Secretaría de Medio Ambiente), 2000. Estudio para la recarga del acuífero en el suelo de conservación del distrito federal. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- SMA (Secretaría de Medio Ambiente), 2002. Diagnóstico geológico y geohidrológico preliminar de la microcuenca del río Magdalena. Gobierno del Distrito federal. México, D.F.
- SMA (Secretaría del Medio Ambiente). 2004. Plan rector de producción y conservación de la microcuenca del río Magdalena, delegaciones Magdalena Contreras, Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón, D.F. Gobierno del Distrito federal, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F.
- Smith, R.D., y E. Maltby, 2003. Using the Ecosystem Approach to Implement the Convention on Biological Diversity: Key Issues and Case Studies. Unión Mundial para la Naturaleza. Gland, Switzerland and Cambridge, U.K.
- Soil Conservation Service, 1972. National Engineering Handbook, Section 4 Hydrology, Chapters 4-10. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- Soil Conservation Service, 1983. National Engineering Handbook, Section 4 Hydrology, Chapter 19. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D.C.

- Thomas, H., 2002. Consideraciones Geohidrológicas de la Relación Bosques-Agua en la Región Sierra Gorda. Reporte de Investigación. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Tognetti, S., G. Mendoza, B. Aylward, D. Southgate, y L. García, 2004. Guía para el desarrollo de opciones de pago por servicios ambientales (PSA) de las cuencas hidrológicas. Departamento de Ambiente del Banco Mundial, Bank-Netherlands Watershed Partnership Program. Washington, D.C. Disponible en: http://www.flowsonline.net/data/pes_assmt_guide_sp.pdf
- Toledo, A., 2006. Agua, hombre y paisaje. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Torres, B.E., 2000. Comparación de los modelos de simulación hidrológica SWRRB y SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. Tesis de Maestría, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. México.
- Torres, R.J.M., y A.S. Guevara, 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, 63: 40-59.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura), 2003. 1^{er} Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Disponible en: http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr1/table_contents/index_es.shtml
- Vela, P.F., 2001. Un acto metodológico básico de la investigación social: la entrevista cualitativa. En: Tarrés, M.L. (Ed.), *Observar, escuchar, comprender. Sobre la tradición cualitativa en la investigación social*. Porrúa, El colegio de México, FLACSO. México.
- Viramontes P.D, y L. Descroix, 2001. Manejo Integral de Cuencas. Consecuencias hidrológicas de la sobreutilización del medio en la alta cuenca del río Nazas. *XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 5*. Guanajuato, México.
- Wigmosta, M.S., L.W. Vail, y D.P. Lettenmaier, 1994. A distributed-hydrology vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30(6): 1665-1679.
- Williams, J.R., 1992. WXPARM: Weather parameter calculator for EPIC. User Manual. U.S. Department of Agriculture, Grassland Soil and Water Research Laboratory. Texas, U.S.A.
- Williams, J.R., C.A. Jones, y P.T. Dyke, 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 27(1):129-144.
- Wunder, S., K.S. Wertz, y S.R. Moreno, 2007. Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta Ecológica*. 084-085: 39-52.

- Young, R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch, y W.P. Anderson, 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2): 168-173.
- Young, R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch, y W.P. Anderson, 1995. Agricultural non-point source pollution model, version 5.00 (USDA Version). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. New Mexico, U.S.A.
- Yu, Z., M.N. Lakhtakia, B. Yarnal, R.A. White, D.A. Miller, B. Frakes, E.J. Barron, C. Duffy y F.W. Schwartz, 1999. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. *Journal of Hydrology*, 218(1-2): 72-91.
- Yu, Z., y F.W. Schwartz, 1998. Application of an integrated basin-scale hydrologic model to simulate surface-water and ground-water interactions. *Journal of American Water Resources Association*, 34(2): 1-17.

ANEXOS

Anexo 1. Formato de entrevista.

- 1.- ¿Cuántos años lleva trabajando aquí? _____
- 2.- ¿Dónde vive (colonia y delegación)? _____
- 3.- ¿Es comunero o descendiente de comunero? _____
- 4.- ¿Utiliza agua para realizar sus actividades productivas en la zona? _____
En qué _____

- 5.- ¿Aproximadamente cuánta agua ocupa a la semana aquí?

- 6.- ¿Sus necesidades de agua son iguales a lo largo de todo el año?

- 7.- ¿De dónde la obtiene? _____

- 8.- ¿Tiene concesión del agua? _____

- 9.- ¿Cree que sus necesidades de agua se están satisfaciendo totalmente? _____

- 10.- ¿Por qué? _____

- 11.- ¿Detecta algún problema relacionado con el agua?
¿Cuál? _____

Anexo 2. Información de entrada para el modelo SWAT.

| INFORMACION | FUENTE | FORMATO SOLICITADO |
|---|---|--------------------|
| Modelo Digital de Elevación | INEGI (2000b) | GRID |
| Mapa de uso de suelo y vegetación. | Ávila (2005) | GRID |
| Mapa de suelos | Registro Agrario Nacional (2000a) Sólo se tomaron en cuenta las unidades de suelo principales | GRID |
| DEM Mask | Límite de la microcuenca | SHAPE |
| Red hidrológica | Ávila (2002) | SHAPE |
| Tabla de usos de suelo y vegetación | Ávila (2005) | ASCII (.txt) |
| Tabla suelos | Registro Agrario Nacional (2000a), únicamente se usaron las unidades de suelo principales | ASCII (.txt) |
| Tabla de estaciones climatológicas usadas para los Generadores climáticos (Datos históricos). | ERIC III (IMTA,2007) | dBase |
| Tabla de estaciones pluviométricas. | Estaciones de la red automatizada de estaciones pluviométricas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México y ERIC III (IMTA,2007) | dBase |
| Tabla de estaciones con datos de temperatura. | ERIC III (IMTA,2007) | dBase |

| | | |
|--|--|------------------------------------|
| Tablas de datos de precipitación diaria para los años de estudio. | Estaciones de la red automatizada de estaciones pluviométricas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México: 23 Zarco 24 San Francisco 25 Río Magdalena 26 Monte alegre Estación con registros del ERIC III (IMTA,2007): 9020 Desviación Alta al Pedregal | ASCII (.txt) |
| Tabla de datos diarios de temperatura para los años de estudio. | Estación con registros del ERIC III (IMTA,2007): 9020 Desviación Alta al Pedregal | ASCII (.txt) |
| Tablas de datos diarios de humedad relativa, radiación solar y viento. | Fueron calculados directamente por el modelo SWAT | ASCII (.txt) |
| Editor de parámetros de unidades de suelo. | Información Nacional sobre Perfiles de Suelo, Versión 1.2 (INEGI, 2004) | Ingreso de datos directo al editor |
| Editor de parámetros de uso de suelo y vegetación. | Torres (2000) y valores estándar para cada tipo de vegetación contenidos en el modelo SWAT. | Ingreso de datos directo al editor |
| Editor de parámetros de generadores climáticos. | Se utilizó el programa WXPARM (Williams, 1992), con las siguientes estaciones del ERIC III: 9019 Desierto de los Leones 9020 Desviación Alta al Pedregal 9037 Presa Ansaldo 9067 Monte Alegre | Ingreso de datos directo al editor |

Anexo 3. Principales características de la UE y URH.

| No. de UE | No. de URH | Uso de suelo/Tipo de suelo | Área (ha) | Área (% en relación a la microcuencia) | Pendiente (m/m) | Rugosidad de Manning | CN2 | Tiempo de concentración (hrs.) |
|-----------|------------|----------------------------|-----------|--|-----------------|----------------------|-------|--------------------------------|
| 1 | 1 | Pastizal/Th | 4.01 | 0.14 | 0.68 | 0.30 | 86.00 | 0.20 |
| | 2 | B.Mixto/Th | 4.44 | 0.15 | 0.68 | 0.60 | 73.00 | 0.30 |
| | 3 | B.Oyamel/Th | 4.60 | 0.16 | 0.68 | 0.80 | 73.00 | 0.35 |
| | 4 | B. Oyamel_B.Pino/Th | 3.31 | 0.11 | 0.68 | 0.80 | 73.00 | 0.34 |
| | 5 | B.Oyamel_Veg.Sec/Th | 2.83 | 0.10 | 0.68 | 0.80 | 78.00 | 0.33 |
| | Total | | | 19.19 | 0.67 | | | |
| 2 | 6 | Pastizal/Th | 14.22 | 0.49 | 0.51 | 0.30 | 86.00 | 0.25 |
| | 7 | B.Oyamel/Th | 88.24 | 3.06 | 0.38 | 0.80 | 73.00 | 0.66 |
| | 8 | B.Oyamel_Veg.Sec/Th | 16.53 | 0.57 | 0.38 | 0.80 | 78.00 | 0.44 |
| | Total | | | 118.99 | 4.13 | | | |
| 3 | 9 | Pastizal/Th | 17.08 | 0.59 | 0.51 | 0.30 | 86.00 | 0.25 |
| | 10 | B. Mixto/Th | 9.98 | 0.35 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.32 |
| | 11 | Mat.Encino/Th | 12.67 | 0.44 | 0.51 | 0.60 | 70.00 | 0.33 |
| | 12 | B. Abies_B.Pino/Th | 10.91 | 0.38 | 0.51 | 0.80 | 73.00 | 0.38 |
| | 13 | B.Abies_Veg.Sec/Th | 13.64 | 0.47 | 0.51 | 0.80 | 78.00 | 0.39 |
| | Total | | | 64.27 | 2.23 | | | |
| 4 | 14 | B.Oyamel/Th | 400.81 | 13.91 | 0.45 | 0.80 | 73.00 | 0.89 |
| | Total | | 400.81 | 13.91 | | | | |
| 5 | 15 | Pastizal/Th | 41.97 | 1.46 | 0.54 | 0.30 | 86.00 | 0.25 |
| | 16 | B.Oyamel/Th | 130.51 | 4.53 | 0.54 | 0.80 | 73.00 | 0.51 |
| | 17 | B. Oyamel_B.Pino/Th | 42.39 | 1.47 | 0.54 | 0.80 | 73.00 | 0.40 |
| | Total | | | 214.87 | 7.46 | | | |
| 6 | 18 | B.Oyamel/Th | 159.72 | 5.54 | 0.41 | 0.80 | 73.00 | 0.69 |
| | Total | | 159.72 | 5.54 | | | | |
| 7 | 19 | B.Oyamel/Th | 93.82 | 3.26 | 0.28 | 0.80 | 73.00 | 0.69 |
| | 20 | B.Pino_Pastizal nat/Th | 64.70 | 2.25 | 0.28 | 0.80 | 78.00 | 0.61 |
| | Total | | | 158.52 | 5.50 | | | |
| 8 | 21 | B.Oyamel/Th | 140.01 | 4.86 | 0.28 | 0.80 | 73.00 | 0.82 |
| | Total | | 140.01 | 4.86 | | | | |
| 9 | 22 | B.Oyamel/Th | 67.08 | 2.33 | 0.42 | 0.80 | 73.00 | 0.58 |
| | 23 | B.Oyamel_Veg.Sec/Th | 12.66 | 0.44 | 0.42 | 0.80 | 78.00 | 0.41 |
| | Total | | | 79.74 | 2.77 | | | |
| 10 | 24 | Past. Nat._B.Pino/Th | 15.77 | 0.55 | 0.41 | 0.41 | 79.00 | 0.29 |
| | 25 | B.Oyamel/Th | 73.84 | 2.56 | 0.41 | 0.80 | 73.00 | 0.55 |
| | 26 | B.Pino_Past. Nat/Th | 35.65 | 1.24 | 0.41 | 0.80 | 78.00 | 0.46 |
| | Total | | | 125.26 | 4.35 | | | |

| | | | | | | | | |
|----|-------|---------------------|--------|-------|------|------|-------|------|
| 11 | 27 | B.Oyamel/Th | 86.98 | 3.02 | 0.41 | 0.80 | 73.00 | 0.56 |
| | 28 | B.Abies_Veg.Sec/l | 3.59 | 0.12 | 0.41 | 0.80 | 78.00 | 0.37 |
| | 29 | B.Abies_Veg.Sec/Th | 29.14 | 1.01 | 0.41 | 0.80 | 78.00 | 0.44 |
| | Total | | 119.71 | 4.15 | | | | |
| 12 | 30 | Veg.Sec_B.Oyamel/Th | 29.24 | 1.01 | 0.47 | 0.45 | 78.00 | 0.31 |
| | 31 | B.Oyamel/Th | 47.24 | 1.64 | 0.47 | 0.80 | 73.00 | 0.45 |
| | 32 | B.Pino/Th | 32.26 | 1.12 | 0.47 | 0.80 | 73.00 | 0.42 |
| | 33 | B.Oyamel_Veg.Sec/Th | 25.59 | 0.89 | 0.47 | 0.80 | 78.00 | 0.40 |
| | Total | | 134.34 | 4.66 | | | | |
| 13 | 34 | Past.Nat._B.Pino/Th | 53.96 | 1.87 | 0.35 | 0.41 | 79.00 | 0.44 |
| | 35 | B.Oyamel/l | 8.46 | 0.29 | 0.35 | 0.80 | 73.00 | 0.42 |
| | 36 | B.Oyamel/Th | 35.63 | 1.24 | 0.35 | 0.80 | 73.00 | 0.51 |
| | 37 | B.Pino/Th | 8.95 | 0.31 | 0.35 | 0.80 | 73.00 | 0.42 |
| | 38 | B.Pino/To | 42.33 | 1.47 | 0.35 | 0.80 | 60.00 | 0.53 |
| | Total | | 149.32 | 5.18 | | | | |
| 14 | 39 | B.Oyamel/l | 5.07 | 0.18 | 0.39 | 0.80 | 73.00 | 0.38 |
| | 40 | B.Oyamel/Th | 32.18 | 1.12 | 0.39 | 0.80 | 73.00 | 0.43 |
| | 41 | B.Oyamel/To | 4.45 | 0.15 | 0.39 | 0.80 | 60.00 | 0.38 |
| | 42 | B.Pino/l | 13.58 | 0.47 | 0.39 | 0.80 | 73.00 | 0.40 |
| | 43 | B.Pino/Th | 74.76 | 2.59 | 0.39 | 0.80 | 73.00 | 0.50 |
| | 44 | B.Pino/To | 17.37 | 0.60 | 0.39 | 0.80 | 60.00 | 0.40 |
| | 45 | B.Pino_Past.Nat./To | 38.26 | 1.33 | 0.39 | 0.80 | 68.00 | 0.44 |
| | Total | | 185.66 | 6.44 | | | | |
| 15 | 46 | Pastizal/Th | 26.14 | 0.91 | 0.36 | 0.30 | 86.00 | 0.27 |
| | 47 | Past.Nat._B.Pino/Th | 22.98 | 0.80 | 0.36 | 0.41 | 79.00 | 0.31 |
| | 48 | B.Pino/Th | 97.12 | 3.37 | 0.36 | 0.80 | 73.00 | 0.57 |
| | Total | | 146.25 | 5.07 | | | | |
| 16 | 49 | B.Pino/Th | 196.01 | 6.80 | 0.30 | 0.80 | 73.00 | 0.74 |
| | 50 | B.Pino/To | 239.65 | 8.32 | 0.30 | 0.80 | 60.00 | 0.81 |
| | Total | | 435.66 | 15.12 | | | | |
| 17 | 51 | Urbano/Hl | 26.10 | 0.91 | 0.51 | 0.01 | 90.00 | 0.10 |
| | 52 | Urbano/l | 7.06 | 0.25 | 0.51 | 0.01 | 90.00 | 0.05 |
| | 53 | B.Mixto/Hh | 23.11 | 0.80 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.35 |
| | 54 | B.Mixto/l | 19.30 | 0.67 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.34 |
| | 55 | B.Mixto/Th | 43.94 | 1.52 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.40 |
| | 56 | B.Mixto_Veg.Sec./l | 24.00 | 0.83 | 0.51 | 0.60 | 78.00 | 0.36 |
| | 57 | B.Mixto_Veg.Sec/Th | 16.19 | 0.56 | 0.51 | 0.60 | 78.00 | 0.33 |
| | 58 | B.Encino/Hh | 8.44 | 0.29 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.31 |
| | 59 | B.Encino/Th | 61.30 | 2.13 | 0.51 | 0.60 | 73.00 | 0.44 |
| | Total | | 229.42 | 7.96 | | | | |