

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA



LICENCIANTURA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

**CONSUMO ENERGÉTICO DEL TRASVASE DESDE
EL ACUÍFERO ATLACOMULCO-IXTLAHUACA:
IMPACTOS ECONÓMICOS COMO VALOR
AGREGADO AL PAGO POR SERVICIOS
AMBIENTALES**

TESIS

Que para obtener el título de:

**LICENCIADA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS
HÍDRICOS.**

PRESENTA:

NOALLY YOANA ROSALES COLIN

ASESOR:

CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ

Toluca, Estado de México,

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante la realización del presente trabajo a través del proyecto 248327 de la convocatoria de investigación sobre Problemas Nacionales.

Así mismo extendiendo un sincero agradecimiento al personal administrativo y docente de la Facultad de Geografía y del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA): especialmente a los profesores que me ofrecieron su valioso apoyo.

Dra. en C. Geol. María Vicenta Esteller Alberich

Dr. en I. Guillermo Pedro Morales Reyes

Dr. en I. José Luis Expósito Castillo

Dr. en C. Héctor Víctor Cabádas Báez

M. en C. Edgar Ángeles Moreno

Dra. en C del A. Aleida Yadira Vilchis Francés

Finalmente, agradezco a mi director de tesis el Dr. en C. del A. Carlos Roberto Fonseca Ortiz por el tiempo, conocimientos y orientación empleados en este documento.



Dedicatorias

A Sam porque naufragamos juntas y juntas
volvimos a embarcar.

A mis padrinos y sus hijos Fede y Lalo porque
sin importar mi sangre o mi apellido me
ofrecieron la oportunidad de formar parte de
su hermosa familia.

Y la dedicatoria más especial a mis padres
porque me dieron el regalo más grande del
mundo, ellos creyeron en mí



“No creo en la casualidad ni en la necesidad. Mi voluntad es el destino.”

(John Milton)

CONTENIDO

Contenido	
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Justificación	10
1.2 Hipótesis	11
1.3 Objetivos	12
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	13
2.1 Explotación de los recursos hídricos subterráneos	13
2.2 Explotación de los recursos hídricos subterráneos en México	14
2.3 Explotación de los recursos hídricos subterráneos en el Estado de México	14
2.4 Traspase Alto Lerma	15
2.5 Tarifas del agua en el Valle de México	17
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO	19
3.1 Servicios Ambientales	19
3.1.1 Tipos de servicios ambientales	20
3.2 Pago por servicios ambientales	21
3.2.1 El valor de los servicios ambientales	24
3.2.2 El valor del agua	25
3.2.3 Externalidades	27
3.3 Pago por servicios ambientales hidrológicos	28
3.4 Legislación	29
3.4.1 LGEEPA	29
3.4.2 Programa Sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales 2012-2018 (PROMARNAT)	30
3.4.3 Acuerdo por el que se dan a conocer los formatos de los trámites a cargo del sector ambiental en las materias que se indican	31
3.4.4 Reglas de operación del Programa Nacional Forestal	31
3.5 Consumos energéticos por explotación	32
3.6 Consumos energéticos dentro de los modelos termodinámicos	33
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	35
4.1 Delimitación de la zona	35
4.2 Análisis de la carga hidráulica	38
4.3 Descripción de la infraestructura	38
4.4 Asociación del abatimiento por extracción	40
4.5 Estimación del Consumo Energético CE	41
4.6 Asignación del Consumo Energético como externalidad	43
CAPÍTULO 5 CASO DE ESTUDIO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
5.1 Zona de estudio	45
5.1.1 Hidrografía	46
5.1.2 Climatología	48
5.1.3 Geología	49
5.1.4 Vegetación y uso de suelo	52
5.1.5 Edafología	53
5.1.6 Características sociales	55
5.1.7 Características económicas	56

5.18	Uso del agua en el acuífero Itlahuaca- Atlacomulco	57
5.2	Características piezométricas y de extracción	58
5.2.1	Características de la profundidad del nivel piezométrico 1983	58
5.2.2	Características de la profundidad del nivel piezométrico 2009	61
5.3	Análisis espacio-temporal por abatimiento del AI-A a través de la media ponderada	63
5.4	Consumo energético asociado al abatimiento del AI-A	65
5.5	Propuesta del Pago por Servicio Ambiental Hidrológico	70
5.5.1	Alcances de la propuesta	74
5.5.2	Factibilidad de la propuesta	74
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS		78
Anexos		85
Anexo 1		86
Anexo 2		80
Bibliografía		81

Índice de tablas

3.1 Tipos de servicios ambientales	21
3.2 Tipos de mercado y pago por servicio ambientales	23
3.3 Clasificación de valores PSA	25
4.1 Variables requeridas y generadoras para la metodología	37
4.2 Valores de eficiencia para una bomba sumergible	39
4.3 Clasificación de la porosidad de acuerdo a la litología	42
4.4 Clasificación de permeabilidad de acuerdo a la litología	42
5.1 Escurrimientos perennes en el AI-A	47
5.2 Cobertura de suelo	52
5.3 Crecimiento de la población en lustros de 2000-2005 por municipios	56
5.4 Población económicamente activa por municipio	56
5.5 Sectores en los que se desempeña la población ocupada por municipio	57
5.6 Usos del agua con datos de REPDA y CONAGUA	58
5.7 Proporción de consumo energético para pozos de trasvase	70

Índice de ecuaciones

3.1 Ecuación para estimar la potencia	32
3.2 Ecuación para estimar la carga hidráulica	32
3.3 Ecuación para estimar el coeficiente de fricción	33
4.1 Ecuación para estimar la media ponderada del nivel piezométrico	40
4.2 Ecuación para estimar la tendencia temporal entre las medias ponderadas del nivel piezométrico	40
4.3 Ecuación para estimar el consumo energético	43
4.4 Ecuación para estimar el consumo energético proporcional al caudal extraído.	43

Índice de figuras

4.1 Diagrama de flujo de las fases del presente estudio	35
5.1 Mapa de ubicación del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	45
5.2 Mapa hidrográfico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	48
5.3 Mapa de clasificación climática del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	49
5.4 Mapa geológico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	51
5.5 Mapa de vegetación y uso de suelo en el Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	53
5.6 Mapa edafológico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco	55
5.7 Mapa de profundidad de nivel piezométrico del AI-A, 1983	60
5.8 Mapa de profundidad de nivel piezométrico del AI-A, 2009	62
5.9 Mapa del abatimiento generado durante el periodo de 1983-2009	64
5.10 Mapa de consumo energético por pozo del AI-A, 1983	66
5.11 Mapa de consumo energético por pozo del AI-A, 2009	68
5.12 Mapa de zonas aptas para la reforestación	72

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

“Envenena al río, y el río te envenenará a ti”

(Román, 2013)

El presente trabajo propone una metodología para agregar las externalidades generadas por abatimiento del nivel de las aguas subterráneas, por efecto de un trasvase dentro de un contexto de gestión de recursos hídricos, en forma de pago por servicios ambientales.

La naturaleza, desde siempre, ha sido la proveedora de los insumos que se utilizan para el desarrollo humano. Los insumos pueden ser tanto la materia prima como los servicios ambientales tales como la depuración del aire (SEMARNAT, 2003) y el sustento orgánico que proporciona el suelo a cultivos para obtener alimento (FAO, 2011). Pero ¿Qué pasa si los servicios ambientales no son valorizados como se debe?, retomando el ejemplo de la depuración del aire limpio, los procesos tras este servicio no son tan simples, sin embargo son tan cotidianos que es difícil percibirlos.

En el marco del presente trabajo se abordará la forma en la que los servicios ambientales pueden ser valorizados, y como las formas de valorizarlos han servido, en algunas partes del mundo, como un pago por servicios ambientales (PSA), es decir una forma de gestión de los servicios ambientales mediante retribuciones que otorgan aquellos beneficiarios de los servicios ambientales.

El servicio ambiental considerado en este estudio corresponde al servicio ambiental hidrológico (SH) que, como su nombre lo indica, tiene como fin lograr la compensación por el recurso agua que se consume en diferentes actividades. Adicionalmente, y haciendo hincapié en la situación de que los servicios ambientales son difíciles de gestionar debido a la complejidad para asignarles un valor, también es necesario algunas externalidades para unificar esta compensación.

Las externalidades toman en cuenta los impactos negativos y positivos que produce una actividad. En este sentido, en el presente trabajo se emplean los conceptos de gestión a fin de plantear una estrategia que permita la conservación de los recursos hídricos, mediante la estimación del consumo energético que provoca el uso de los recursos hídricos. El consumo energético es manejado como una forma viable de valorar parte del costo de un servicio ambiental.

Como caso de estudio se considera el acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco que cede parte de su volumen para el trasvase Alto Lerma, el cual se encarga de cubrir un cierto porcentaje de la demanda de la metrópolis del Valle de México. La metodología del consumo energético equivalente (Fonseca et al., 2013) será adaptada al caso del acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco, de tal modo que el resultado sea una el planteamiento de una propuesta factible para la gestión de los recursos hídricos con base en los principios de pago por servicio hidrológico.

1.1 JUSTIFICACIÓN

El aumento de la demanda de agua, debido al crecimiento poblacional, no sólo ha producido la sobreexplotación de acuíferos, sino que también ha conducido a la necesidad de aumentar la disponibilidad de agua de manera virtual (Arreguín y López, 2007). Dicho aumento de disponibilidad de agua se puede logra mediante trasvases.

El acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco forma parte del sistema de trasvase Alto Lerma hacia la zona metropolitana. Del total de agua subterránea extraída, el 67% (107 hm³/año) es destinado al trasvase, generando una diferencia entre niveles piezométricos cercana a los 20 m (Escolero-Fuentes, 2009).

Entre los efectos adversos que genera la explotación intensiva de acuíferos se encuentran la subsidencia, la disminución de caudales bases y el abatimiento del nivel piezométrico en sí (Fonseca et al., 2013). Sin embargo, rara vez son considerados como externalidades en la gestión de trasvases. Por ello, en el presente trabajo se propone el planteamiento de estrategias para la gestión adecuada de los recursos hídricos, a partir de la concepción de un consumo energético como un valor agregado a los impactos económicos y externalidades generadas en el proceso. La metodología está basada en los consumos energéticos equivalentes de recursos, procesos y servicios estimados bajo los principios de la economía ecológica (Fonseca et al., 2013; Díaz-Delgado et al., 2014).

El impacto económico, representado por el consumo energético imputado a la extracción y conducción del agua, está directamente asociado a los costos que debe cubrir la cuenca receptora. Sin embargo, el efecto del abatimiento puede ser visto como una externalidad hacia la cuenca cedente y, de esta manera, considerar el incremento del consumo energético por extracción de aguas subterráneas como un valor agregado al pago de servicios ambientales.

1.2 HIPÓTESIS

El abatimiento del nivel de aguas subterráneas, atribuido al trasvase desde el acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco al Valle de México, genera un incremento al pago por servicios ambientales hidrológicos imputado al aumento del consumo energético.

1.3 OBJETIVOS**Objetivo general**

Desarrollar una metodología para la estimación del pago por servicio ambiental hidrológico debido a abatimientos ocasionado por trasvases por medio del impacto sobre el consumo energético reflejados en la cuenca cedente.

Objetivos particulares

Determinar el abatimiento de la profundidad del nivel piezométrico en el Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco provocado por la explotación de agua subterránea.

Asociar el abatimiento de la profundidad del nivel piezométrico en el Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco tanto a los pozos de consumo local, así como a los pozos destinados para el Traslase Alto Lerma.

Inferir el consumo energético generado a partir de la extracción de agua subterránea del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco.

Determinar la externalidad en la cuenca cedente como resultado del aumento de consumo energético suscitado por el abatimiento generado únicamente por los pozos destinados a la extracción

Inferir el impacto económico en la cuenca receptora debido al aumento del consumo energético en la extracción de aguas subterráneas.

Plantear con base en las externalidades (cuenca cedente) y los impactos económicos (cuenca receptora), una estrategia de gestión a partir de los principios de pago por servicio ambiental hidrológico.

Capítulo 2 Antecedentes

2.1 EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

Los recursos hídricos se encuentran altamente afectados por la presión humana que se agrava a su vez por la disponibilidad en cantidad y calidad (Global Water Partnership, 2011). Estos factores, denominados como factores de presión, son las principales causas de la sobreexplotación de los acuíferos.

A su vez, Global Water Partnership en el 2011 considera que el decrecimiento de disponibilidad hídrica y el crecimiento poblacional generan conflictos que se incrementan y se agravan conforme no se tomen acciones congruentes. Asimismo, considera necesario el establecimiento de medidas de regulación y planificación que tengan en cuenta la protección y distribución racional de los recursos hídricos.

De acuerdo con el Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo publicado en el 2015, la población crece aproximadamente 80 millones de personas al año, en este contexto se prevé que la población sufrirá un déficit del 40% de agua suponiendo que las condiciones climáticas no tengan variación en el año 2030. En el 2015, se consideró que de las 263 cuencas transfronterizas del mundo, 158 de ellas carecen de algún tipo de marco de gestión cooperativa.

La publicación anterior señala que el 50% de la población se abastece de agua subterránea, que el 43% de ese recurso es destinado para riego, y que además el 20% de los acuíferos se encuentran en sobreexplotación. Las presiones sobre este recurso no sólo se asocian a las altas demandas también a los riesgos de contaminación.

Con base en la situación actual y futura, Ramsar (2011) considera que, sin importar si es agua subterránea o superficial, es necesario establecer planes de manejo integrado de los recursos hídricos para garantizar la sostenibilidad del ecosistema y del agua, sobre todo impulsar el uso racional del agua, particularmente en zonas áridas donde el agua se encuentra limitada para el ecosistema y el uso humano. Los acuíferos de todo el mundo se encuentran bajo intensa explotación, sobre todo los acuíferos de México, China, Oriente Medio y España; y esta explotación ha

ocasionado la alteración del régimen hidrológico lo que provoca una degradación del ambiente.

2.2 EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN MÉXICO

México cuenta con aproximadamente 650 acuíferos, algunos de los cuales se encuentran sobreexplotados (Muñoz et al., 2009) y en donde el agua extraída es principalmente destinada para la agricultura, lo cual resulta preocupante por el déficit en la infraestructura utilizada en el riego.

Además de los problemas de sobreexplotación, en muchos sitios se identifican problemas adicionales como son la deforestación de los bosques, los cuales sirven como lugares de recarga de acuíferos (Palma et al., 2014), y el deterioro ambiental producido por el crecimiento poblacional que día a día extiende su territorio en cuestión de urbanización.

La sobreexplotación y la disminución de zonas de recarga en México han producido que en la Ciudad de México, así como en otras localidades como Toluca, los niveles piezométricos bajen casi un metro por año, lo que a su vez ha provocado problemas de subsidencia (Vélez, 1999).

2.3 EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN EL ESTADO DE MÉXICO

En el Estado de México se cuenta con dos concentraciones de población que juntas suman 22.95 millones de habitantes (López, 2012), condensadas entre la metrópolis del Valle de México y la metrópolis de Toluca.

En el Estado de México se tienen identificados nueve acuíferos, de los cuales cinco presentan sobreexplotación (Bastida, 2009), imputada a la gran demanda debida a las dos metrópolis y el resto de su población. Tan solo en la zona metropolitana del valle de México se ofertan 64 m³/s (López, 2012). Incluso, las cuencas hidrológicas del Valle de México y de Lerma se encuentran vedadas desde hace 50 años (López, 2012).

López (2012) considera que algunos de los daños ocasionados por la sobreexplotación de acuíferos son los agrietamientos y hundimientos en el suelo, el incremento de la profundidad de los pozos, construcción de infraestructura urbana especial para drenaje y el deterioro de la calidad de agua.

Debido a las problemáticas de disponibilidad de agua en las zonas de mayor concentración poblacional de Valle de México, entre los años 1940 y 1960, se construyó el sistema Lerma, que tiene como propósito ofertar 7.8 m³/s con el fin de cubrir la demanda (Martínez et al., 2015, López, 2012). Es decir, se trata de trasladar agua desde los acuíferos Valle de Toluca y Valle Ixtlahuaca-Atlacomulco a la zona metropolitana.

2.4 TRASVASE EL SISTEMA LERMA

Durante el año 1325 nace la Ciudad de Tenochtitlán, la cual se encuentra fundada sobre el Lago de Texcoco (Bernardino, 2014). La Ciudad se alzaba sobre dos islotes habitacionales artificiales llamados chinampas. Debido a las constantes inundaciones fueron construidos puentes y diques que permitieron regular el agua que llegaba a la Ciudad, y también se construyeron acueductos. Tras la caída de Tenochtitlán ante los invasores españoles. En 1521 se inició la construcción de la Ciudad Española y debido a la deforestación de la cuenca, a fin de convertir el uso de suelo a uso agrícola, la ahora Ciudad de México sufre múltiples inundaciones así que se construyó una obra de desagüe conocida como Nochistongo, que se ubica en en lo que actualmente conocemos como Zumpango. Esta obra hidráulica fue concluida en 1788.

La primera mitad de siglo XIX la Ciudad de México se encuentra dentro de procesos capitalista de agroexportación y manufactura por lo que, en esta época, se expande ocupando los municipios aledaños. Entre 1876 y 1911 se terminó el Gran Canal de Desagüe que inicia en la Ciudad de México y concluye en el túnel de Tequixquiac y descarga en el Río Salado, que a su vez forma parte del Río Pánuco.

Para el año 1925 se experimentan los efectos de la desecación de la cuenca que en 1940 se intensifican bajo el crecimiento de la población. En ese entonces la

Ciudad se abastecía mediante manantiales y pozos dentro de la cuenca; sin embargo, la explotación descontrolada ocasionó que el suelo comenzará a hundirse provocando la dislocación de la infraestructura como es el drenaje urbano, y como consecuencia que el bombeo fuese controlado. En 1937 la mayor parte de los proyectos ya se enfocaron a buscar formas de explotar el Río Lerma.

A finales del siglo XIX, debido a que el gobierno necesitaba cubrir la demanda de agua potable de la Ciudad de México propuso realizar un estudio sobre el aprovechamiento de las aguas de Xochimilco; sin embargo, los manantiales de Xochimilco resultaron insuficientes para cubrir la demanda de la población que continuaba creciendo. Para el año 1926 se perforaron nuevos pozos que captaban el agua de Cuautitlán y Tula.

En 1929 el pueblo de Atlapulco, integrante del municipio de Ocoayac, cedió sus derechos al Departamento del Distrito Federal sobre cuatro manantiales a cambio de la instalación de infraestructura de agua potable para el pueblo, además de la construcción de una escuela para el pueblo. En 1930 mediante la Dirección de Aguas, Tierras y Colonización se concedió el permiso para evaluar la posibilidad de utilizar el agua de Almoloya del Río para el abastecimiento de la Ciudad de México, y para 1931 se solicitó el aprovechamiento de agua de los manantiales de Almoloya del Río a fin de generar energía eléctrica. En 1941 con el agotamiento de los pozos que surtían agua en la Ciudad de México se concedió que esta agua fuera empleada para uso doméstico después de una caída de 200 metros; pero ya no solo incluía los manantiales de Almoloya del Río sino que ahora también participaba Texcaltenco, Alta Empresa y Ameyalco que, debido a su ubicación geográfica, ofrecían la ventaja de que la conducción del agua se realizará por gravedad, cuatro caídas podían ser utilizadas como infraestructura eléctrica y además por ser de origen subterráneo no requerían tratamiento para potabilizar. Entre los años 1936 y 1944 se realizaron las perforaciones de 93 pozos profundos en el Valle de México lo cual aceleró el hundimiento de la Ciudad.

Entre 1942 y 1951 se construyó la obra de captación y conducción de agua desde Almoloya del Río hasta los tanques de Dolores en Bosques de Chapultepec. Las

captaciones se realizaron mediante la intervención de galería subterráneas de los manantiales y la construcción de 75 pozos profundos (50 a 308 m de profundidad) perforados a lo largo del acueducto.

En 1953 se extendió el sistema hacia Ixtlahuaca debido al incesante hundimiento de la Ciudad de México.

Escolero (2009) estima que son 398 pozos los que constituyen el Sistema Lerma, de los cuales 250 se encuentran activos conectados a los acueductos. De los 398 pozos, el 70% opera en el acuífero del Valle de Toluca y el 30% extrae agua del Acuífero de Ixtlahuaca Atlacomulco.

De acuerdo con Escolero (2009) después de que esta fuente externa del Sisetma Lerma ya no fuera suficiente para satisfacer las necesidades de demanda y se apreciaran fuertes impactos por la explotación intensiva de los acuíferos, se incluyó el Sistema Cutzamala.

2.5 TARIFAS DEL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

Las tarifas de agua se encuentran fijadas de diferente manera de acuerdo con las características del municipio y lo que se establece en la legislación de cada entidad federativa (CONAGUA, 2014).

De acuerdo con CONAGUA (2013), el balance económico del servicio de agua, va desde lo que invierte el operador hasta lo que se está invirtiendo en diferentes actores del sector. Desde esta perspectiva, el 79% de los costos son asumidos directamente por la población y solo el 21% por parte del gobierno, aportado desde los impuestos, que también son fruto de la contribución de la población.

Para el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México el pago por el servicio de agua potable se ha vuelto muy complejo (Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C., 2002) ya que existe en gran medida la falta de pago por el servicio, que ocasiona que la infraestructura para el traslado y la distribución del

agua no tenga mejoras y que el sistema fiscal encargado del servicio de agua potable no sea lozano debido a los siguientes elementos.

- Alto subsidio de los servicios de agua: Debido a que durante décadas el Gobierno Local y Federal han otorgado continuos subsidios al abastecimiento de agua, como parte de la simpatía política frente a las elecciones.
- Cultura del no pago: La causa de las recaudaciones bajas se reparten entre que el servicio que en ocasiones se recibe es de mala calidad o no cubre las necesidades, y que no se tiene difusión suficiente sobre el pago del agua o porque finalmente durante las elecciones se realizan acciones a favor del no pago.
- Carencia de sistema para macro y micro medición: Considerando que parte significativa de las tomas de agua no se encuentran registradas, no es posible realizar una administración adecuada sobre el recurso hídrico potable.
- Alta dotación de agua: Principalmente atribuido a los dispendios de agua por descuido doméstico, fugas domiciliarias, pérdidas en la red de conducción y desperdicio de industrias.
- Falta de mantenimiento a la infraestructura: Junto a la subsidencia de la Ciudad de México, la falta de mantenimiento de la infraestructura de agua produce pérdidas por fugas.

Para 2015 ,considerando un consumo de 30 m³/mes la tarifa de uso doméstico en promedio es de 19.48 pesos para la Ciudad de México, sin considerar otros cargos variables por concepto de abastecimiento en función del volumen empleado o por concepto de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2015)

Capítulo 3 Marco Teórico

3.1 SERVICIOS AMBIENTALES

La naturaleza, proveedora de todos los insumos que día a día se utilizan, brinda servicios cruciales para la supervivencia tales como la biodiversidad, agua, estabilización climática, y control de enfermedades, entre una gran cantidad de otros servicios, siendo así que nace el concepto del pago por servicios ambientales.

A finales de los años noventa, ecologistas y economistas trabajaron unidos para asignarle un valor a los servicios que la naturaleza brinda. El cálculo se realizó con colaboración de todos aquellos profesionistas preocupados por su medio ambiente. El valor estimado fue de 33 quintillones de dólares USA por año, doblaba el producto interno que en el año de 1997 era de 18 quintillones (LCNEF, 2010), estos se obtienen a partir de métodos de valoración donde las personas indicaban cuanto estaban dispuestas a pagar por el servicio (Constanza et al., 1997).

De acuerdo con la SEMARNAT (2003), los servicios ambientales son definidos por tanto como los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición de la sociedad, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable. Teniendo en cuenta este concepto puede ser subrayada la importancia de los servicios ambientales como indispensables (LCNEF, 2010)

El ambiente, es generador de un sinnúmero de beneficios, los más destacados por su importancia al bienestar humano son: la regulación del clima y el amortiguamiento del impacto de fenómenos naturales; la provisión de agua en cantidad y calidad suficiente; la generación de oxígeno; el control de la erosión, así como la generación, conservación y recuperación de suelos; la captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes; polinización de plantas y control biológico de plagas; la degradación y el reciclaje de desechos orgánicos, la belleza del paisaje y la recreación (SEMARNAT, 2003)

A pesar de que este concepto resulta reciente, sirve para que, a través de este, se pueda interactuar con el entorno ya que concientiza sobre lo que se recibe de la naturaleza; porque, aunque resulten tan esenciales, se ha permitido explotarlos a

tal grado que se ha aumentado considerablemente el riesgo de cambios desfavorables y bruscos, y se ha incrementado en la pobreza y desigualdad social (Reid et al., 2004).

Originalmente, la percepción del concepto de pago por servicios ambientales procuro transmitir como el funcionamiento óptimo de los ecosistemas proporciona flujos de materia y energía (agua limpia, suelos productivos, y clima previsible, entre muchos otros), y por lo tanto son servicios fundamentales para el bienestar de los seres humanos (LCNEF, 2010). Este planteamiento encamina hacia conceptos enfocados a la aplicación de los PSA (Pago por Servicio Ambiental), y proporciona una herramienta de conservación y/o remediación de los servicios ambientales a fin de lograr un desarrollo sustentable y su no degradación.

3.1.1 Tipos de servicios ambientales

Reid et al. (2004), trabajaron durante el año 2001 con las Naciones Unidas y lanzan un estudio denominado *LA EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS DEL MILENIO*. El estudio realiza una clasificación de los servicios ambientales en las categorías mostradas en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Tipos de Servicios Ambientales (Reid et al., 2004)

TIPO DE SERVICIOS	SERVICIO	SECTOR
Servicio de provisión	Alimento	Cultivos
		Ganado
		Pesquería y captura
		Agricultura
		Alimentos silvestres
	Fibra	Madera
		Algodón, cáñamo, seda
		Leña
	Recursos energéticos	
	Productos bioquímicos	
Agua		
Servicios de regulación	Regulación de calidad de aire	
	Regulación del clima	Global
		Regional y local
	Regulación del agua	
	Regulación de la emisión	
	Planificación del agua y desecho	
	Regulación de enfermedades	
	Regulación de pestes	
	Polinización	
	Regulación de riesgos	
Servicios culturales	Valores espirituales y religiosos	
	Valores estéticos	
	Recreación y ecoturismo	

Al observar la tabla 3.1, se puede identificar que los servicios ambientales son fundamentales para el desarrollo humano pero a medida que la población aumenta la demanda de los servicios ambientales también aumenta por lo que es necesario la inclusión de técnicas y/o estrategias para apoyar a la conservación y sustentabilidad de los servicios ambientales (LCNEF, 2010). Partiendo de aquí, se originaron las herramientas económicas para recompensar por la conservación de los servicios ambientales, o sea el PSA.

3.2 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES (PSA)

A partir de 1961, los países tropicales cayeron en la cuenta de la pérdida de los servicios ambientales debido a la deforestación que enfrentaban y las

consecuencias a las que muchos países se encaraban al carecer o deteriorar sus servicios ambientales, así que, advirtiendo los verdaderos impactos económicos y humanos, propusieron el PSA, con el objetivo de corregir las fallas en el mercado al internalizar los beneficios, haciendo posible el cobro de incentivos por el uso o afectación de los servicios ambientales (Mayrand y Paquín 2004). Así mismo se considera que el PSA es una forma nueva de buscar apoyo económico a fin de cubrir las externalidades por medio de transferencias de recursos financieros de los beneficiarios hacia quienes proveen o protegen los servicios, mejor llamados fiduciarios.

En el año 2003, la SEMARNAT plantea los PSA como la redistribución directa a quienes se ocupan de manejar, resguardar, conservar y mejorar los ecosistemas que brindan servicios ambientales necesarios para el bienestar de la sociedad, por lo que se considera que es preciso la inclusión de políticas a distintas escalas, para inducir el pago por servicios ambientales, así como acciones que atenúen, contengan y reviertan el impacto negativo que las actividades humanas provocan en los ecosistemas.

Por tanto, se puede manejar a los PSA como una herramienta que comparte bases económicas y bases ambientales y que tiene como fin recompensar la conservación de los servicios brindados por el ambiente. Dentro de este sistema, los PSA contemplan las transacciones de índole monetaria o no. Las que no corresponden al carácter monetario podría manejarse como derechos de propiedad o licencias temporarias de gestión (LCNEF, 2010)

Los PSA no sólo consisten en que el servicio ambiental sea mantenido y conservado con base en este ingreso. En la tabla 3.2 se muestran las herramientas económicas que obedecen a los sistemas políticos bajo los que se encuentra un país.

Tabla 3.2. Tipos de mercados y pagos por servicios ambientales (LCNEF, 2010)

TIPO DE MERCADO	PAGOS
Esquemas de pagos públicos para propietarios privados de tierras para mantener o mejorar los servicios ambientales.	En México y Costa Rica los PSA son muy comunes, ya que involucran pagos directos de una agencia de gobierno, u otra institución pública, a los propietarios o administradores de las tierras.
Mercados formales con intercambio abierto entre compradores y vendedores.	En este tipo de PSA se establece un límite en el daño que se produce al servicio ambiental, los usuarios responden ya sea solucionando el daño o realizando otra actividad equivalente.
Acuerdos privados	Son mercados voluntarios, o sea mercados no formales, donde el pago se realiza a fin de mejorar la calidad o el manejo del servicio, sin intervención del gobierno.
Incentivos Fiscales	Se realizan a cambio del compromiso de asignar recursos de administración de servicios ambientales, las personas que gozan de exenciones fiscales.
Programa de certificación	Cuando un producto no solo considera el costo de producción en su precio al público, sino que también considera el valor por producción, comercialización, transporte, etc.

Resulta imprescindible de comprender que no todos los beneficios, funciones o servicios que presta el ambiente son iguales, ya que algunos son directos y otros indirectos, por lo que no tienen el mismo valor. Los usuarios no entienden muchas veces estas pequeñas diferencias en el sistema o peor aún ni siquiera se encuentran conscientes de que las actividades que ellos llevan a cabo son dependientes de alguna función ambiental, lo que ha hecho que actualmente se trabaje arduamente en este tipo de instrumentos (LCNEF, 2010)

Aunque la visión sobre los PSA que proporciona Mayrand y Paquín (2004) sea que estos se encuentre orientados hacía un mercado de condiciones adecuadas, conformado por un demandante y un ofertante para garantizar su éxito, es necesario integrar los siguientes esquemas para que la posibilidad de fracasar sea menor:

basarse en oferta de los servicios ambientales; definir con claridad el servicio ofertado, contratos de pago flexibles, continuos y abiertos; costos de transacción menores a los costos de los beneficios potenciales; apoyo sobre fuentes múltiples de ingreso; monitoreo continuo y flexibilidad a fin de aumentar su eficiencia y eficacia. El verdadero reto se haya bajo la prerrogativa de volver los PSA menos incipientes aún si la rama económica y/o ambiental de la que se desprenden sea nueva, por eso se trata de hallar indicadores que hagan más fácil definir su valor (SEMARNAT, 2003).

3.2.1 El valor de los servicios ambientales

El tema en sí es complejo debido a que los servicios ambientales suelen ser intangibles, por lo tanto el término es manejado de un modo muy subjetivo. En la mayoría de los casos, donde las políticas ambientales están conjugadas con los PSA, se utilizan valoraciones basadas en cuanto está dispuesta una persona a pagar por conservar u obtener el servicio, o en los casos extremos, la retribución por no perderlo.

El enfoque de LCNEF (2010), muestra un panorama de un mundo concientizado en los servicios ambientales pero no considera que esos servicios pueden perderse si existe un mal manejo.

Inclusive la SEMARNAT (2003), identifica como una de las tareas más difíciles dentro de la economía ambiental, es el de dar valor a los servicios ambientales, esto lo atribuye a que no existen valores de mercado definidos; e incluso, en muchas ocasiones, los datos hipotéticos sobre los beneficios o costos son muy difíciles de obtener. Por tanto, la herramienta más utilizada para los PSA en el territorio mexicano es la determinación del impacto ambiental y su valorización. Otra herramienta es la clasificación de los servicios ambientales y sus funciones como se observa en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Clasificación de valores PSA (SEMARNAT, 2003)

TIPO DE VALOR	SUBDIVISIÓN	CONCEPTO
Valores de uso	Valores de uso directo	Depende de la disponibilidad y de la oferta- demanda; incluye valores de producto forestal, maderable y no maderable, recreación y turismo.
	Valores de uso indirecto	Corresponden a los valores de funciones ecológicas que desempeñan los ecosistemas; la valoración se hace indirectamente, a partir del costo por reemplazo de bienes sustituto.
Valores de no uso	Valores opcionales	Corresponde al valor de beneficiados esperados que los usuarios potenciales del ambiente estarían dispuestos a pagar por conservar y disponer de un recurso en el futuro.
	Valores de existencia	Es aquel que una persona puede dar a un recurso con características únicas o significados culturales importantes para la sociedad, por el hecho de que esté disponible en el presente o en el futuro.

3.2.2 El valor del agua.

El agua recibió costo a partir de 1980 en la Ciudad de México, que de acuerdo a la Ley Nacional de Aguas establecía que esta se cobraría en poblaciones de más de 2,500 habitantes, sin embargo en la Ciudad de México y el área Metropolitana el agua está subsidiada (Bastida, 2009). El costo del agua proveniente del Sistema Cutzamala (explotación, tratamiento, transporte y distribución) es de \$12.00 por m³, pero la CONAGUA la vende en \$3.00 por m³ en la Ciudad de México y el usuario del área Metropolitana la paga a tan solo \$1.20 m³, mientras que el agua del Sistema Lerma cuyo costo (explotación, tratamiento, transporte y distribución) por m³ es de \$6.00 tiene el mismo el mismo costo de venta que la del Sistema Cutzamala.

De acuerdo con Bastida (2009) los recursos naturales son aquellas sustancias que posibilitan ingresos y que al depreciarse o al desaparecer producen un riesgo al modelo financiero capitalista debido a que este modelo considera a la naturaleza únicamente como un recurso productivo, por lo que al aplicarse al sector hídrico los costos monetarios se volverían insuficientes para cuantificar las tendencias productivas del agua.

De acuerdo con CEMDA (2006), el costo del agua es determinado a partir de la infraestructura necesaria para proveer y trasladar el agua, en donde se incluyen costos de inversión, mantenimiento, potabilización, electricidad y salarios y, en algunos casos, se consideran los costos de tratamiento de las aguas residuales.

El costo del agua debería incluir los costos ambientales concernientes a los procesos naturales necesarios para que esta pueda ser aprovechada, tales como, la recarga y el costo ambiental, definido como el riesgo de daño hacia el ecosistema, ya que al alterar la biósfera, el resultado residiría en la reducción de la calidad ecológica; sin embargo, el precio del agua es definido solamente por los costos de operación, costos de mantenimiento, depreciación, costos administrativos, suministros de agua y tratamiento de agua. (Brown, 2010)

En el 2007, Martínez hace mención de que existen muchas actividades que no consumen agua directamente, pero requieren que el recurso tenga ciertas condiciones de calidad y cantidad. Precisamente, es aquello por lo que produce que sea difícil valorar el recurso hídrico, por lo que para darle el costo adecuado hay que considera los siguientes atributos físicos e hidrológicos del agua:

- Es móvil: por lo tanto es un recurso con alto costo de exclusión, por lo que respetar los derechos de propiedad, que son la base del mercado de la economía de intercambio, es relativamente difícil y costoso. Solvente universal: En cuestión de los desechos sólidos, cuando el agua se encuentra en gran cantidad puede ofrecer una opción poco costosa de absorber desechos y contaminantes, así como diluirlos y transportarlo.

- Dependencia con los usuarios: Ya que después de utilizarla, un volumen representativo del agua vuelve a los cauces. Problemas de agua en sitios específicos: Los problemas de agua se encuentran localizados puntualmente, por lo que es necesario integrar políticas y estrategias para resolverlos además de que deben adaptarse a las condiciones locales.

3.2.3 Externalidades

Desde un ámbito general y definido por la SEMARNAT (2003), las externalidades son aquellos costos o beneficios de la actividad económica que impactan al mercado. A partir de esta definición, se puede conceptualizar a las externalidades como aquellos impactos positivos o negativos que producen una ganancia o un costo extra dentro de una actividad. Mientras que visto desde un panorama económico enfocado al ámbito ecológico Usaquén (2008), define las externalidades como el efecto de los procesos de transformación de los recursos productivos, que dan como resultado los bienes y servicios, los cuales llegan a imponer costos externos a un tercero pero que generalmente se reflejan en un deterioro ambiental. Así que este autor considera las externalidades negativas ya que identifica un daño del cual no se desprende una compensación monetaria.

Sin embargo Delacámara (2008), considera que las externalidades no solo corresponden a los efectos negativos, sino que también existen externalidades positivas que sólo necesitan ser debidamente cuantificadas y que son utilizadas normalmente en los análisis de costo-beneficio.

SEMARNAT (2003), también considera la existencia de externalidades negativas y positivas y las enfoca a cómo los efectos o distorsiones inciden sobre el uso de los recursos, de este modo las considera como una forma más factible de estimar los costos de un servicio.

En sentido económico Usaquén (2008) considera las externalidades una falla de mercado, enfocadas a los recursos y como estos cobran precios más bajos debido a que en muchas ocasiones no se consideran el costo de transporte o energía, por lo que considera que deben internalizarse pero no como beneficio ambiental.

3.3 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS

Los ecosistemas son la llave principal de la conservación de los ciclos de vida como son: biológico, eólico, de carbono e hidrológico; entre otros (Perevochtchikova y Ochoa 2012), y no sólo es que a nivel nacional se tienen problemas con la alteración de los ecosistemas, sino que también a nivel internacional los ecosistemas se están degradando produciendo una problemática global (FAO, 2010).

El agua resulta un líquido indispensable para el desarrollo de la vida, siendo así que la implementación de un PSA el cual es de suma importancia, (SEMARNAT, 2003); aunque el Pago por Servicio Hidrológico no solo abarca al recurso agua, sino también los lugares donde tiene lugar todos aquellos procesos que condujeron al agua hasta el sitio de extracción. Según Isch y Gentes (2006) para medir el valor del agua se requiere una perspectiva multidimensional, visto a través de un sustento cultural.

El pago por servicios hidrológicos definido por Asquith y Wunder (2009) considera a este servicio como el conjunto de PSA que parecen o tienen el potencial de mejorar los recursos naturales. Es conceptualizado de forma tan general debido a que un solo elemento afecta todo el sistema y el ciclo hidrológico tiene muchas variables en juego. El razonamiento es valorado de tal forma que los usuarios del servicio ambiental que se encuentren aguas abajo, se benefician de las mejores prácticas de los usuarios que habitan aguas arriba, y estos son quienes aseguran el abastecimiento de los servicios ambientales, tales como la protección contra la erosión y la sedimentación, además de la estabilización de caudales.

La gestión no adecuada de los servicios ambientales hidrológicos (SHA) genera la pérdida de los recursos naturales, desastres naturales, contribuye al calentamiento global y ocasiona grandes pérdidas locales, perjudicando en forma directa a las familias más desfavorecidas (Tipacti et al., 2010), por lo que sea, una rama nueva o no, es necesario aplicar esta gestión para evitar que se agote el recurso o que sea cada vez más difícil obtenerlo y que al final a cambio de él se paguen precios más altos.

3.4 LEGISLACIÓN**3.4.1 LGEEPA**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue publicada el 28 de enero de 1988 y reformada en última ocasión el 4 de junio de 2012, contiene las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que refieren a la preservación y la restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente. Tiene por objetivo proporcionar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.
- II. Definir los principios de política ambiental y los instrumentos para su aplicación.
- III. La preservación, restauración y mejoramiento del ambiente.
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.
- VI. La preservación y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.
- VII. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
- VIII. El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental.
- IX. El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

3.4.2 Programa sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales 2012-2018 (PROMARNAT)

Decretado el 12 de diciembre del 2013, este se encuentra legislado a partir del artículo 25 de la Constitución Política de los Estado Unidos Mexicanos, que establece, que al Estado le corresponde la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la Soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante la competitividad, el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales.

Dentro del documento se establecen cinco Metas Nacionales y tres estrategias transversales para llevar a México a su máximo potencial; las metas son las siguientes; México en Paz; México Incluyente; México con Educación de Calidad; México Próspero y México con Responsabilidad Global. Mientras que las tres estrategias que menciona son: Democratizar la Productividad; Gobierno Cercano y Moderno, y Perspectiva de Género. Aborda múltiples ramas en el quehacer público, sobre todo la naturaleza, incluyéndola como un eje transversal e integral en el sector de las actividades económicas, atención social y procuración de justicia que este debe atender.

En el documento se define que el Pago por Servicio Ambiental es aquel “a través del cual se otorgan recursos económicos a los propietarios de los terrenos con ecosistemas forestales que generan servicios ambientales (principalmente en zonas importantes para la captación de agua o por su biodiversidad) para incentivar su protección y evitar el cambio de uso de suelo”.

3.4.3 Acuerdo por el que se dan a conocer los formatos de los trámites a cargo del sector ambiental en las materias que se indican.

Decreutado el 17 de Octubre del 2016 por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, este documento persigue la estrategia de Gobierno Cercano y Moderno promulgada dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, dentro de la cual se considera como línea de acción “Desarrollar una oferta de trámites y servicios de calidad mediante el Catálogo Nacional de Trámites y Servicios del Estado (CNTSE)”.

Intrínseco al documento, a cargo de CONAFOR, se encuentran los formatos oficiales para solicitar el Pago por Servicios Ambientales a través de fondos concurrentes. Así mismo, considera algunas disposiciones que quedan sin efecto en la misma materia.

3.4.4 Reglas de operación del Programa Nacional Forestal

Decreutadas por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, el 8 de Marzo de 2013, en donde se consideran como ejes rectores la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria que dispone la Cámara de Diputados, el Presupuesto de Egreso de la Federación. Se señala que las Reglas de Operación deberán sujetarse con base en criterios de eficiencia, eficacia, economía, honradez y transparencia.

Las Reglas de Operación determinadas en este documento deben de garantizar que los recursos se apliquen efectivamente al cumplimiento de los objetivos y metas de los programas autorizados, en beneficio de los sectores o población objetivo determinada por CONAFOR.

También considera que la Comisión Nacional Forestal junto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales deben de conducir la Política Nacional de desarrollo forestal sustentable y definir los lineamientos necesarios para el cumplimiento e implementación de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su Reglamento, así como el diseño y definición de estímulos e incentivos económicos en materia forestal y expedir las Reglas de Operación que contengan los lineamientos para su aplicación.

Así mismo, CONAFOR reconoce la importancia de los Servicios Ambientales proporcionados por los ecosistemas forestales, tanto para los dueños o poseedores, como para la sociedad. En este sentido, CONAFOR establece mecanismos de apoyo para contribuir a conservar, mantener e incrementar la provisión de servicios ambientales a través de los diferentes componentes, conceptos y modalidades de apoyo previstos.

3.5 CONSUMOS ENERGÉTICOS POR EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Contraponiendo las ventajas del consumo de agua subterránea con las del agua superficial, los costos de extracción son mayores en la explotación del agua subterránea (Fonseca, 2010), cuyo valor depende de la potencia de la bomba (ecuación 3.1), la cual permite estimar la energía requerida por la bomba para elevar el agua hasta el punto de extracción.

$$P = \frac{q\gamma h}{n} \quad (3.1)$$

En la ecuación 3.1 están conjugadas cuatro variables, la primera corresponde al gasto que va a ser extraído [q, m³/s], el peso específico γ [n/m³], la eficiencia n del equipo motor-bomba [adimensional], y además hay que considerar la carga hidráulica h [m] que representa la suma del desnivel en altitud, (z), las cargas por presión y velocidad ($\frac{v^2}{2g}$) y las pérdidas de carga localizadas y por fricción ($\frac{p}{\gamma} + \Sigma h_p$) (Ecuación 3.2) (Corena, 2005; Sotelo, 1997)

$$h = z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + \Sigma h_p \quad (3.2)$$

La ecuación 3.2 indica el cambio de nivel topográfico entre el punto de extracción y la superficie. La carga por velocidad $\frac{v^2}{2g}$ [m] depende del gasto extraído y del diámetro de la tubería, la presión p [N/m²] se ve reflejada en el nivel piezométrico y la pérdida de carga Σh_p que depende de las características de la infraestructura (como válvulas, ampliaciones y cambios de dirección, entre otras) si son del tipo

localizadas o del tipo de material del conducto y del flujo turbulento o laminar si son generadas por fricción.

El coeficiente de fricción (Ecuación 3.3) de acuerdo con Sotelo (1997) se obtiene de la ecuación a partir de que Nikuradse trabajará con tubos de rugosidad artificial verificada con antelación y se muestra a continuación.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (3.3)$$

3.6 CONSUMOS ENERGÉTICOS DENTRO DE MODELOS TERMODINÁMICOS

El actual estudio se encuentra basado en el modelo termodinámico aplicado por Fonseca en el 2010, cuyo contenido se centra en extracción subterránea de agua de la Ciudad de Toluca. Dicho autor elaboró una propuesta metodológica de gestión del agua a partir de un contexto urbano con un enfoque termodinámico. Por lo tanto, el modelo termodinámico anterior se adaptará al caso de estudio del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco, debido a que los modelos termodinámicos permiten la solución de problemas prácticos debido a que la termodinámica se encuentra presente en situaciones básicas (Rodríguez, 2012), así mismo la termodinámica es definida como una herramienta analítica, teórica y práctica que interpreta fenómenos naturales desde la perspectiva de las relaciones entre la materia y la energía, es decir, se encarga de estudiar los intercambios de energía en diferentes formas, su interpretación con los equipos, las propiedades de la materia y el uso racional de la energía.

Las características consideradas en la termodinámica por Ordorica (2006) son las siguientes.

- Presión: Dentro de un fluido en reposo la presión es aquella fuerza compresiva normal por unidad de área, que actúa sobre una superficie sumergida en el fluido.
- Calor y temperatura: La temperatura en un cuerpo se explica como la capacidad de transferir calor, mientras que el calor es un modo de transferir energía y la transferencia ocurre cuando existe un desequilibrio térmico.

- Medidas de cantidad o de tamaño: Medición (Masa, número de moles o volumen).
- Trabajo: Considerada cuando una fuerza que actúa a distancia, debido a que el trabajo se acompaña de un cambio de volumen ya sea por expansión o por compresión de la energía.
- Energía: Capacidad de un cuerpo o sistema de realizar un trabajo. Esta puede ser energía cinética; energía potencial o energía interna.

De acuerdo con Fonseca (2010), los modelos termodinámicos se desarrollan con base en el análisis de las transformaciones y las jerarquizaciones de la energía, mientras que Rodríguez (2012) considera que la termodinámica genera modelos idealizados que deben ser modificados para aplicarse a la realidad, debido a que el principal obstáculo es la formulación abstracta del entorno.

Los modelos de análisis energéticos son aquellos que tratan de representar el comportamiento de un sistema físico, a través de métodos de entrada y salida de energía bajo los principios de termodinámica sobre todo sobre la segunda ley de la termodinámica (Fonseca, 2014), la cual define que “La selección natural tiende a hacer máximo el flujo de energía disponible a través de un sistema tan lejos como sea compatible con las restricciones a la cual el sistema está sujeto” (Lotka, 1992).

Capítulo 4 Metodología

La figura 4.1 representa el diagrama de flujo que muestra, en orden, las fases mediante las cuales se elaboró este trabajo. Los resultados principales esperados son el cambio de almacenamiento, el consumo energético asociado a la variación de la carga hidráulica asociada a un trasvase y su impacto económico.

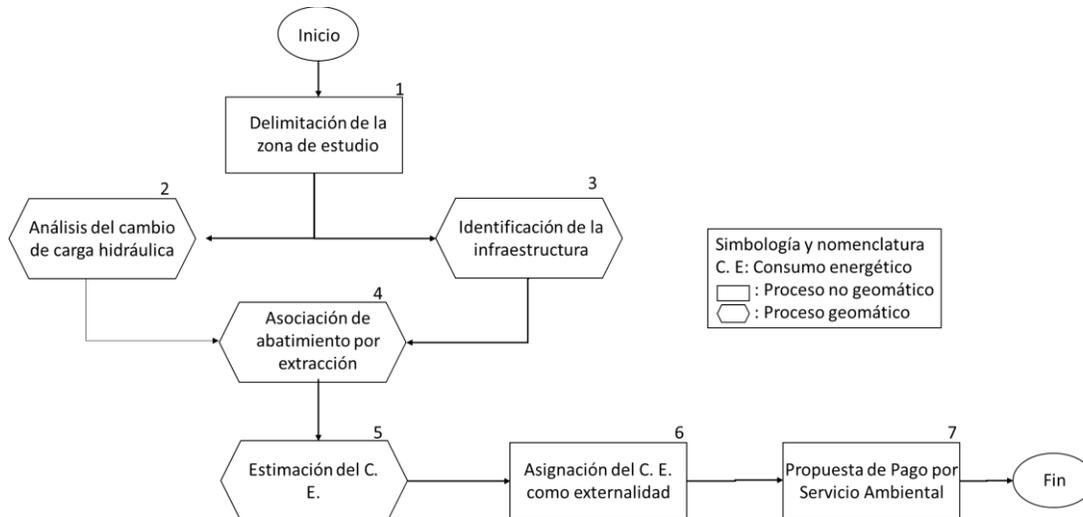


Figura 4.1. Diagrama de flujo de las fases del presente estudio.

4.1 DELIMITACIÓN DE LA ZONA

En esta primera etapa (Figura 4.1) se realizó la delimitación de la zona de estudio, que para el caso de estudio es el acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco. La información requerida para el desarrollo de la metodología es descrita en la tabla 4.1 e incluye variables con diferente distribución geográfica (formato) y escala temporal.

De manera adicional, la tabla 4.1 muestra cuál es la información necesaria para obtener las variables requeridas. Estas variables, llamadas generadoras, incluyen mapas geológicos, edafológicos, de clima, hidrografía y de vegetación y uso de suelo.

Algunos insumos empleados para esta etapa se pueden obtener en formato poligonal de diversas fuentes. Por ejemplo, los mapas de los límites del acuífero, edafológico, geológico y cuerpos de agua son capas poligonales que pueden ser

extraídos desde el Atlas Geológico-Ambiental EDOMEX (INFOME GEM, 2013) que comprende un apartado de cuencas en el cual se encuentran los límites de acuíferos del Estado de México. El mapa geológico incluye insumos poligonales de la litología y estructuras geológicas encontradas en formato lineal, como las fallas (INFOME GEM, 2013).

Los mapas de clima, hidrografía y vegetación y uso de suelo son capas poligonales que se encuentran dentro del Atlas de Cambio Climático (IEECC, 2015). La información se trató mediante el software Arc Gis 10.3 (Tuesta, 2010), en donde cada mapa fue cortado mediante la herramienta *clip* con base en los límites del acuífero de acuerdo con el polígono considerado como límite del acuífero. Dentro del mismo software se realizó la edición pertinente de los mapas.

Tabla 4.1. Variables requeridas y generadoras para la metodología

Variable requerida	Variables generadoras	Variables generadoras mínimas	Formato					Escala					ETAPA		
			Ráster	Puntual	Lineal	Polígono	Tabular	Fija	Diaria	Mensual	Anual	Otra			
Límite del acuífero			X					X							1
	Límite del acuífero					X		X							1
Profundidad del N.P. 1983			X								X				2
	Profundidad del N.P. 1983						X				X				2
Profundidad de N.P. 2009			X								X				2
	Profundidad del N.P. 2009						X				X				2
Máxima profundidad de N.P.			X								X				2
	Profundidad del N.P. 2009		X								X				2
	Profundidad del N.P. 1983		X								X				2
Coefficiente de almacenamiento							X	X							4
	Mapa geológico					X		X							1
Transimividad							X	X							4
	Mapa geológico					X		X							1
Localización de pozos			X					X							2
	Coordenadas de pozos						X	X							2
		Pozos 1983					X	X							1
		Pozos 2009					X	X							1
Coefficiente de fricción							X	X							4
	Diámetro						X	X							3
		Caudal					X			X					3
		Diámetro					X	X							3
	ξ						X	X							3
		Estado del material de la tubería					X	X							3
Coefficiente de pérdida							X	X							4
Caudal mensual							X			X					3
	Caudal l/s						X			X					3
Duración de bombeo							X			X					3
Eficiencia							X	X							3
	Caudal l/s						X			X					3
Profundidad total							X	X							2
Instalación							X	X							4
	Profundidad total						X	X							2
Mantenimiento							X	X							4
	Profundidad total						X	X							2
Vida útil							X	X							3

4.2 ANÁLISIS DE CAMBIO DE CARGA HIDRÁULICA

La segunda etapa (Figura 4.1) está direccionada para precisar cuál ha sido la variación del nivel piezométrico en el acuífero para un periodo determinado.

Para esta etapa fue necesario acotar la temporalidad de la evaluación. Para el caso de estudio se consideró el periodo de 1983 a 2009, representando los inicios del trasvase y la mayor explotación.

La distribución geográfica de pozos es una variable generadora así como la información de su profundidad piezométrica. Esta información es ingresada al software IDRISI (Eastman, 2012), debido a que sus herramientas de análisis permiten llevar a cabo procesos sobre los atributos de datos puntuales. Mediante el módulo *interpol* (Eastman, 2012)) es posible realizar una interpolación lineal a los datos de profundidad piezométrica previamente ubicados espacialmente., El resultado son mallas de tipo *ráster*. Es decir que la información piezométrica no solo se encuentra de manera puntual, sino en cada celda de la superficie considerada de acuerdo con su resolución. Posteriormente, por medio del módulo *overlay*, se efectúa una operación aritmética en la que se resta a la interpolación del 2009, la interpolación de 1983. El resultado de la diferencia representa el abatimiento del nivel piezométrico mediante valores positivos, mientras que los valores negativos se interpretan como sitios donde existe recarga (ascenso del nivel piezométrico).

Así mismo, de manera indirecta, la carga hidráulica es estimada por medio del módulo *Supply Processes* en la plataforma Idrisi (Fonseca et al., 2017). Este módulo es capaz de estimar la carga hidráulica de extracción de aguas subterráneas (ecuación 3.2)

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

En la tercera etapa (Figura 4.1) se recopiló información sobre la infraestructura de explotación. Para el caso de estudio, se consideraron bases de datos obtenidas de CONAGUA (de los años 1983 y 2009). La información se ordenó de manera tabular y contiene las siguientes características:

ID [adimensional]: Hace referencia a un número consecutivo e irrepetible que será el identificador del pozo.

Diámetro D [m]: Refiere al diámetro de la tubería de extracción.

Coeficiente de fricción f [adimensional]: Estimado mediante la ecuación 3.3 .

Coeficiente de pérdida local de carga K [adimensional]: Asociado a una bomba tipo con al menos cuatro diferentes válvulas en la tubería. Es igual a 3.74 (Fonseca, 2010).

Caudal mensual [m³/mes]: Conversión debida a que el caudal registrado se encuentra en L/s, considerando (1 litro de agua equivale a 0.001 m³ y en un mes de treinta día se tienen 2, 592,000 segundos).

Duración del bombeo d [días]: Considera un bombeo constante durante los 365 días del año.

Eficiencia η [adimensional]: La cual se obtiene como una función del caudal de acuerdo con la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de referencia para la eficiencia de una bomba sumergible (Secretaría de Energía, 1996).

CAPACIDAD DE LA BOMBA L/s	EFICIENCIA %
Hasta 2.0	48
Mayor que 2.9 hasta 5.0	61
Mayor que 5.0 hasta 15.0	71
Mayor que 15.0 hasta 25.0	72
Mayor que 25.0 hasta 30.0	74
Mayor que 30.0 hasta 60.0	77
Mayor que 60.0	78

Profundidad total P_{TP} [m]: Alude a la profundidad de perforación total del pozo.

Instalación Inst [\$]: Se encuentra en términos monetario y de acuerdo con SEMARNAT (2011) está en función de la profundidad con las siguientes equivalencias:

- Perforado hasta los 100 metros de profundidad su costo de instalación corresponde a \$15,000/m.
- De 100 a 200 metros de profundidad el costo de instalación es de \$ 22,500/m.
- Mientras que si la perforación excede los 200 metros de profundidad el costo es de \$ 30,000/m.

Mantenimiento Mant [\$]: De acuerdo con Palacios (2002) el costo de mantenimiento de un pozo equivale al 15 % de su instalación.

Vida útil V_u [años]: De acuerdo con CONAGUA (2007) la vida útil de un pozo es de 20 años.

4.4 ASOCIACIÓN DEL ABATIMIENTO POR EXTRACCIÓN

La etapa dos (Figura 4.1) permite obtener un panorama a nivel de acuífero de la variación de la carga hidráulica. La cual está influenciada por el caudal extraído. En la etapa cuatro, se puede obtener una perspectiva puntual a nivel de pozo. Para ello, se propone como parámetro estadístico una media ponderada del nivel piezométrico \overline{hp}_j (m) estimada con la ecuación 4.1 donde NP_i es la profundidad del nivel piezométrico (m) y Q_i es el gasto extraído (m^3/s) de cada pozo i en un periodo j de análisis.

$$\overline{hp}_j = \frac{\sum(NP_i * Q_i)}{\sum Q_i} \quad (4.1)$$

La tendencia temporal entre las medias ponderadas del nivel piezométrico proporciona un panorama general sobre el impacto energético del abatimiento de las aguas subterráneas. Sin embargo, es posible apreciar también la distribución de los cambios locales en la variación del nivel piezométrico Δhu_{ij} (m) proporcional al gasto extraído (ecuación 4.2) en orden a identificar las zonas más susceptibles a incrementar el impacto energético de extracción de aguas subterráneas.

$$\Delta hu_{i,j} = \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{Q_{i,j}} \quad (4.2)$$

Este resultado orienta como ha sido el abatimiento del pozo de acuerdo con el caudal extraído. De esta manera, la variación de la profundidad del nivel piezométrico por unidad de gasto extraído podrá tomarse como un indicador de que

pozos o en que zonas resultan más afectados por la extracción de agua subterránea.

4.5 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO CE

Durante esta etapa el consumo energético es estimado por medio del módulo geomático *Supply Processes* desarrollado por Fonseca et al. (2017) para IDRISI Selva. El consumo energético está basado en la ecuación (3.1). El módulo contiene tres submódulos, de las cuales se utilizó en este caso el denominado *Groundwater extraction*.

La información requerida por el módulo es:

- *Nodes net* (*.mdb): Este archivo se encuentra en la extensión de Microsoft Access. Esta tabla contiene la información de identificador de pozo (ID), el ID se encuentra ligado a nodos que indican puntos, para el caso de estudio solo se utilizaron dos nodos uno perteneciente a los pozos que destinan su caudal al trasvase y otro que concentra a los pozos a consumo local.
 - *Aquifer limits* (*.rst): Este archivo se encuentra en formato ráster para IDRISI Selva, contiene la información de la superficie del acuífero, donde el área del mismo tiene el valor de uno, mientras que el resto recibe el valor de cero.
 - *Piezometric depth* (*.rst): En archivo ráster, esta imagen contiene los valores de profundidad del nivel piezométrico del acuífero. Cabe resaltar que esta imagen se obtuvieron en la etapa dos, como producto de la interpolación de la profundidad de los niveles piezométricos para cada uno de los dos años considerados.
 - *Maximum piezometric depth* (*.rst): Como parte de la etapa dos también fue obtenida una imagen de tipo ráster en IDRISI Selva cuya información contenida corresponde a la máxima profundidad del nivel piezométrico del Al-A encontrada en las interpolaciones realizadas. Este producto es ingresado en esta sección.
 - *Aquifer thickness* (*.rst): Refiere al grosor del acuífero, desde una imagen ráster (opcional).
- Storage coefficient* (.rst): Esta pestaña requiere una imagen ráster que contenga la información del coeficiente de almacenamiento. Para este caso se utilizó la capa de litología, adquirida previamente en la etapa uno, a la cual es aplicada la clasificación de la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Clasificación de la porosidad de acuerdo a la litología (Custodio y Llamas, 2001)

TERRENO	POROSIDAD EN %
Arcilla	45
Arena	35
Grava	25
Grava y arena	20
Areniscas	15
Calizas densas y esquistos	5
Cuarcita y granito	1

- *Transmissivity* (*.rst): Refiere a una imagen en formato ráster que contiene la información de transmisividad del acuífero. Es posible inferir un valor de acuerdo con la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Clasificación de la permeabilidad de acuerdo con la litología (Custodio y Llamas, 2001)

TIPO DE MATERIALES	PERMEABILIDAD M/DÍA	CLASIFICACIÓN
Arcilla compacta, pizarra y granito	1×10^{-6}	Impermeables
	1×10^{-5}	
	1×10^{-4}	
Limo arenoso, limo y arcilla limosa	1×10^{-3}	Poco permeable
	1×10^{-2}	
Arena fina, arena limosa y caliza fracturada	1×10^{-1}	Algo permeable
	1	
Arena limpia, grava y arena y arena fina	1×10^1	Permeable
	1×10^2	
Grava limpia	1×10^3	Muy permeable
	1×10^4	

- *Extraction wells ID* (*.vct): Consiste en una imagen vectorial. La información dentro de la imagen corresponde a vectores puntuales de la ubicación espacial de los pozos asociados a su ID.
- *Pumps characteristics* (*.mdb): Esta tabla se encuentra en formato de Microsoft Access, como parte de la descripción de la infraestructura.

El resultado del módulo es la tabla de pozos de extracción con el anexo de cuatro coeficientes, identificados como C_1 , C_2 , C_3 y C_4 . La ecuación 4.3 utiliza estos coeficientes para estimar el consumo energético CE (J/mes), donde X representa el caudal mensual extraído (m^3/mes).

$$E = f(x) = C_1 + (C_2 * X) + (C_3 * X^2) + (C_4 * X^3) \quad (4.3)$$

4.6 ASIGNACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO COMO EXTERNALIDAD

En esta etapa se estimó la externalidad reflejada en el consumo energético por medio de la diferencia de consumo energético entre los pozos que son utilizados para el trasvase y los pozos de consumo local. Una relación del consumo energético generado únicamente por un trasvase (para el caso de estudio, el Trasvase Lerma) es asociada a la ponderación del abatimiento de la profundidad del nivel piezométrico en relación con el gasto extraído.

En otras palabras, para un periodo [j-1, j] donde es posible considerar gastos de extracción en el pozo i, $Q_{ij} = Q_{i-1, j-1}$, los consumos energéticos en el tiempo j-1 y j son $CE_{i, j-1} = f(h_{i, j-1})$ y $CE_{i, j} = f(h_{i, j})$ respectivamente (donde h es la carga hidráulica de extracción en metros). Cuando $\Delta h_i = h_{i, j} - h_{i, j-1}$ es generado por $\sum Q_i$ donde $i = 1, 2, \dots, n$, y además, el descenso o variación del nivel piezométrico es producido de manera homogénea en una superficie k de un acuífero o parte de un acuífero con características similares, entonces el impacto energético CEI producido por m caudales extraídos puede ser considerado como $CEI = (CE_{i, j} - CE_{i, j-1}) - (CE'_{i, j} - CE_{i, j-1}) = CE_{i, j} - CE'_{i, j}$ donde $CE'_{i, j} = f(h'_{i, j})$ es el consumo energético generado por la variación $h'_{i, j}$ proporcional al gasto extraído de los m caudales (ecuación 4.4).

$$h'_{i, j} = h_{i, j} - \Delta h_i \left(\frac{\sum_{l=1}^m Q_l}{\sum_{l=1}^n Q_n} \right) \quad (4.4)$$

4.7 PROPUESTA DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL

Finalmente, considerando todas las etapas anteriores es posible formular una propuesta de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico basada principalmente en los resultados de las diferencias de consumo energético generado con los pozos de trasvase.

Como parte del análisis se infirió cuál es la proporción o participación que tienen los pozos de trasvase en el abatimiento generado en el acuífero, para lo cual se realizó para cada pozo del trasvase un radio de influencia mediante la herramienta de IDRISI Selva *buffer*, la cual se utiliza para “crear memorias temporales alrededor de cualquier grupo de características especificadas en una imagen” (Eastman, 2006), de este modo se obtuvieron los pozos que ocasionan un cierto porcentaje del abatimiento y en función del caudal se estima el consumo energético.

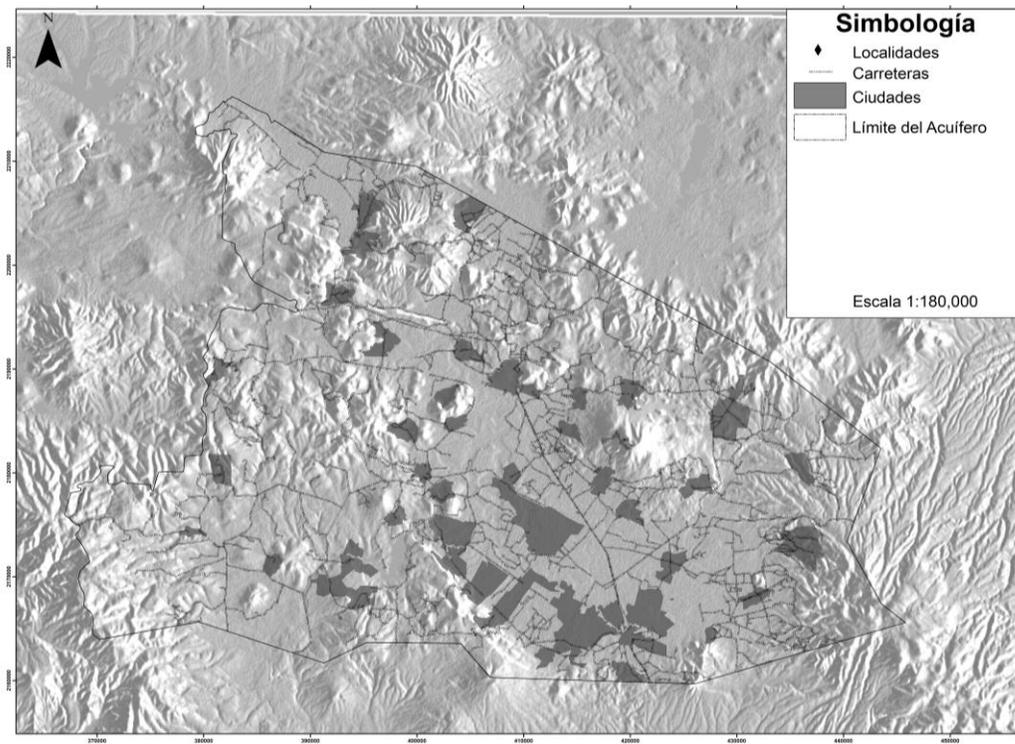
La propuesta se apegado al marco jurídico del Estado de México con énfasis en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y permitió identificar el concepto por retribución, que organismos lo administran y en que es empleado.

Capítulo 5 caso de estudio y discusión de resultados

5.1 ZONA DE ESTUDIO

El acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco AI-A (1502), se encuentra ubicado en el noroeste del Estado de México y pertenece a la Cuenca Alta de Río Lerma (CONAGUA, 2015) (Figura 5.1).

El AI-A tiene un área aproximada de 2,894 km² y asentados sobre la superficie se encuentran los municipios de Temascalcingo, El Oro, Atlacomulco y Jocotitlán, mientras que de manera parcial cubre los municipios de Jiquipilco, Ixtlahuaca, San Felipe de Progreso, Villa del Carbón, San José del Rincón, Acambay Ruiz de Castañeda, Morelos, Timilpan y Chapa de Mota (CONAGUA, 2015). De acuerdo con INEGI (2010), sobre la cuenca hay 625 localidades sobre el área del acuífero, de las cuales la que tiene la mayor población concentra es la comunidad de Atlacomulco de Fabela con 22,774 habitantes.



Figura

5.1 Mapa de ubicación del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco

5.1.1 Hidrografía

De acuerdo con CONAGUA (2015), el AI-A se encuentra dentro de la región hidrológica número XII denominada Río Lerma-Chapala. La hidrología superficial de la cuenca cuenta con 23,796.70 km de corrientes consideradas como intermitentes, así mismo la extensión total de las corrientes perennes corresponde a 4,665.20 km. Estos datos están basados en la información vectorial obtenida de CONABIO (2008). Así mismo, los ríos y arroyos más importantes del área superficial comprendida por el acuífero se describen en la Tabla.5.1.

Tabla 5.1 Escurrimientos perennes en el AI-A (IFOMEGEM, 2013)

Nombre	Municipio	KM	Nombre	Municipio	KM
Agua Brava	Ixtlahuaca	4.12	El Soleadero	San José del Ricón	2.45
Agua Negra	San Felipe del Progreso	5.96	El Tepetate	San José del Ricón	2.07
Arroyo Chichi	Jocotitlán	6.76	El Zapotal	Ixtlahuaca	4.45
El Pescador	Morelos, Chapa de Mota y Villa del Carbón	13.97	Garatachea	San José del Ricón	2.21
Embochatán	San Felipe del Progreso	2.85	Hoyos	San Felipe del Progreso	9.61
Grande	Ixtlahuaca	3.15	Jaltepec	San Felipe del Progreso	7.26
Hondo	San Felipe del Progreso	4.42	La Barranca	Jocotitlán	5.98
Joquicingo	Jiquipilco	3.79	La Calera	San Felipe del Progreso	4.13
La Ceniza	Morelos	3.11	La Catrina	Jiquipilco	2.48
La Garita	Morelos y Villa del Carbón	11.15	La Nava	San José del Ricón	3.26
La Planta	Jiquipilco	2.27	La Peña	San Felipe del Progreso	2.56
Las Carreteras	Morelos y Villa del Carbón	5.37	La Purísima	San José del Ricón	4.05
Los Cajones	Morelos	1.79	La Trinidad	San José del Ricón	4.7
Chaparrales	Morelos	2.1	La Venta	San José del Ricón	2.61
Los Tecolotes	Jocotitlán	5.17	La Víbora	Jocotitlán	4.63
Malacota	Jiquipilco	1.64	La Viga	San José del Ricón	2.96
México	Villa del Carbón	3.56	Las Huertas	Jocotitlán	2.45
Tabú	San Felipe del Progreso	2.62	Morelos	Ixtlahuaca	4.85
Vezda	Jocotitlán	2.47	Nimami	San Felipe del Progreso	3.31
Honda	Jocotitlán	6.28	Piedras Negras	San Felipe del Progreso	8.79
Bonyo	Ixtlahuaca	4	Pimrejé	San José del Ricón	2.92
Canal Enyejé	San Felipe del Progreso	5.94	Puentecillas	San José del Ricón	5.81
Tepeptitlán	San Felipe del Progreso	0.96	Purungeo	San José del Ricón	10.14
Chichijé	San José del Ricón	5.39	Rancho Verde	San José del Ricón	3.79
Chocati	San José del Ricón	7.8	Rechivati	San José del Ricón	2.36
Ciénega Larga	San José del Ricón	5.25	Río Lerma	Temascalcingo, Atlacomulco, Jocotitlán y Ixtlahuaca	113.9
Cedro	San José del Ricón	5.69	San Isidro	Ixtlahuaca	3.49
El Fraile	San José del Ricón	6.38	San Jerónimo	San José del Ricón	3.65
El Roble	San Felipe del Progreso	4	San José	San José del Ricón	6.34
El Salto	San Felipe de Progreso y San José del Rincón	3.76	Santa Rita	San José del Ricón	2.29
San Felipe	San Felipe del Progreso	2.45	Sila	Ixtlahuaca	2.67
Tamejé	San José del Ricón	3.16	Tache	San José del Ricón	3.05

Se observa que se tienen una cantidad considerable de ríos, así mismo la cuenca posee 53 lagos y 105 manantiales, En el mapa de la figura 5.2 se pueden observar la distribución de los cuerpos de agua.

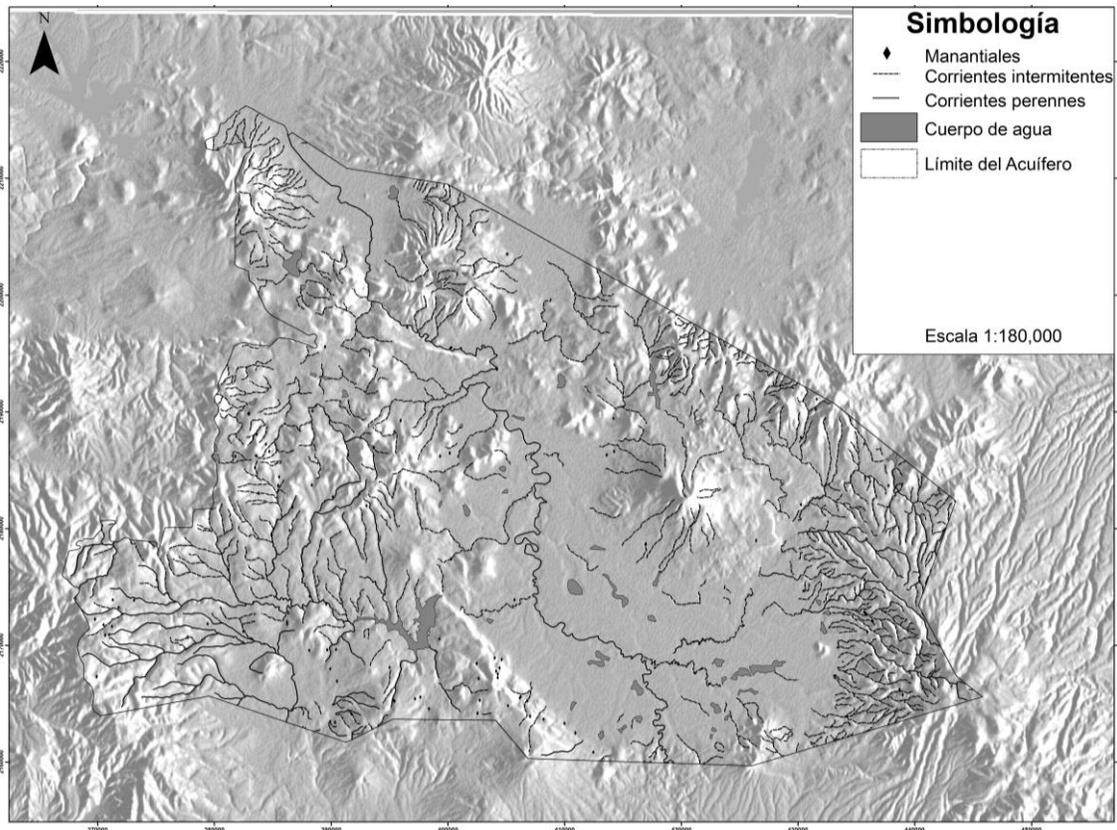


Fig. 5.2. Mapa hidrográfico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco.

5.1.2 Climatología

De acuerdo con CONAGUA (2015), en el área superficial correspondiente al acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco presenta dos tipos de clima: Templado subhúmedo con lluvias en verano y semifrío subhúmedo con lluvias en verano. Con respecto a la precipitación, esta oscila entre 653 y 861 mm al año (Ramírez, 2013), cabe destacarse que solo las partes altas experimentan precipitaciones de más de 700 mm al año. La temperatura varía entre los 17.5°C y 9.5°C, siendo mayo el mes más caluroso y diciembre el mes más frío.

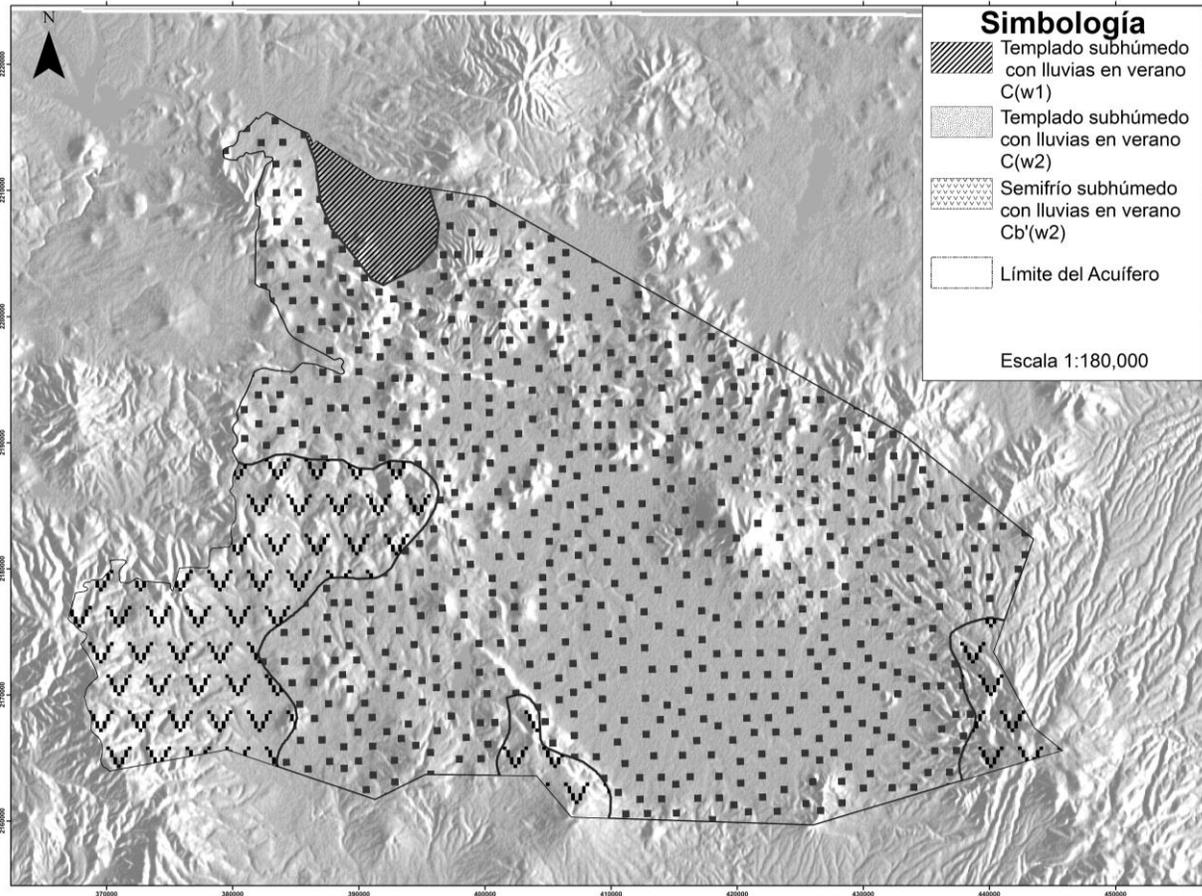


Fig. 5.3 Mapa de clasificación climática del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco.

5.1.3 Geología

El mapa geológico (figura 5.4) fue obtenido mediante el tratamiento de la capa litológica del Atlas Geológico-Ambiental (IFOMEGEM, 2013). El mapa resultante arroja que la mayor parte del territorio se encuentra compuesto por material lacustre que cubre un 21.5% de la superficie total comprendida por el acuífero acuífero y se localiza en la parte sur-central. Así mismo, cubriendo un 16.20% de la superficie total, se encuentra el material andesita-basalto el cual es de origen ígneo y está presente en el lado oeste del acuífero. Por otra parte, distribuidos en la zona suroeste de la cuenca, se encuentra roca denominada ignimbrita-riolita que solo se extiende sobre 8.25% del territorio.

El territorio se encuentra cubierto en un 25.45 % por tobas, alternando entre el origen andesítico, dacítico y riolítico, el cual consiste en un material de grano fino cuyo nombre atribuye a la composición magmática del que proviene.

Un 10.45% del área está compuesto por transiciones de roca entre andesitas y dacitas, rocas de origen volcánico extrusivo las cuales se distribuyen cercanas a los límites norte y oeste del área de estudio. Mientras que en el noroeste se encuentra una pequeña porción equivalente a los 4.50% compuesto de roca de basalto.

Un 0.5% del territorio está compuesto por cubierta sedimentaria como es aluvión., Finalmente distribuidos por el área superficial del acuífero se encuentra cuerpos de agua que concentra un 1.1% del total del territorio.

En este mapa de la Figura 5.4 también se observa la presencia de fallas, la mayoría de ellas concentradas en la zona norte con direcciones oeste-este y este-oeste. También se muestran algunas fracturas en la parte este del área de estudio, mientras que en la zona suroeste se presentan fracturas definidas.

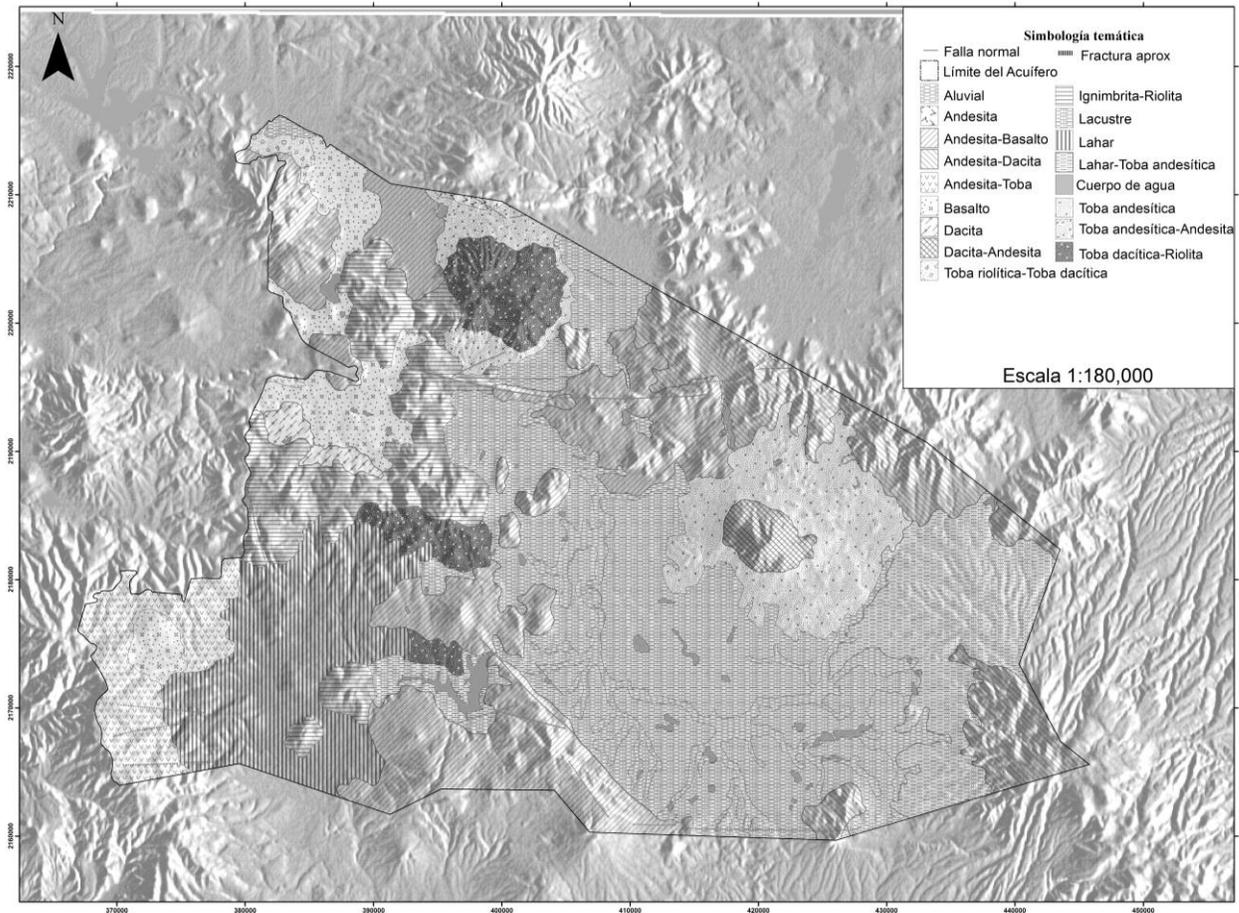


Fig. 5.4. Mapa geológico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco (con base en IFOMEGEM, 2013) .

De acuerdo con CONAGUA (2015) el acuífero AI-A tiene un sistema de recarga superficial en el que se distingue:

En el sur, conos volcánicos formados por derrames de lavas y materiales piroclásticos de origen basáltico con mediana permeabilidad que los hace funcionales para recargar el acuífero.

La zona oeste del acuífero contiene afloraciones de basalto del Terciario Superior, donde se encuentra una falla de orientación sureste-noreste, además de que la roca se encuentra con un alto grado de fracturamiento por lo que presentan una permeabilidad de media a alta.

Sobre el Cerro de Jocotitlán hay afloramientos de basaltos que se extienden hacia el norte, los cuales se caracterizan por un alto grado de fracturamiento proporcionando una alta permeabilidad.

El valle de la cuenca está compuesto por tobas intercaladas de arenas, arcillas y limos con alta permeabilidad afectada por la presencia de arcillas.

5.1.4 Vegetación y uso de suelo

El mapa de vegetación y uso de suelo es el resultado del tratamiento de información obtenida del Atlas Geológico Ambiental del año 2013, publicado por el IFOMEGEM. En la tabla 5.2 se concentra la información de la cobertura del suelo del área de estudio.

5.2.- Tabla de cobertura del suelo (Elaboración propia)

TIPO DE COBERTURA	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
Agrícola	71.90 %	Alfalfa, frijol, hortalizas y papas (Ramírez, 2013)
Pastizal Inducido	8.95%	Gramíneas y Graminoides (IEECC, 2013)
Bosque de Encino	5.67%	Especies de Quercus que se desarrollan de los 2200 a 2800 msnm (IEECC, 2013)
Bosque de Oyamel	4.36%	Especies vegetales de Abies, Pseudotsuga y Picea (Encina-Domínguez, 2008)
Bosque de Pino-Encino	6.21%	Especies de Pinus y Quercus.
Bosque de Pino	1.10%	Especies de Pinus que se desarrollan a partir de los 2800 msnm (IEECC, 2013)
Bosque de Cedro	0.25 %	Este tipo de especies de desarrollan alrededor de los 1200 msnm (IEECC, 2013)
Área Urbana	0.60%	Debido a que la mayoría de las localidades se encuentran catalogadas como rurales (Ramírez, 2013)
Cuerpos de Agua	1.06%	Concentrados principalmente hacia el este.

La figura 5.5 representa el mapa de vegetación y uso de suelo, donde se aprecia la distribución de las ocupaciones de suelo antes descritas.

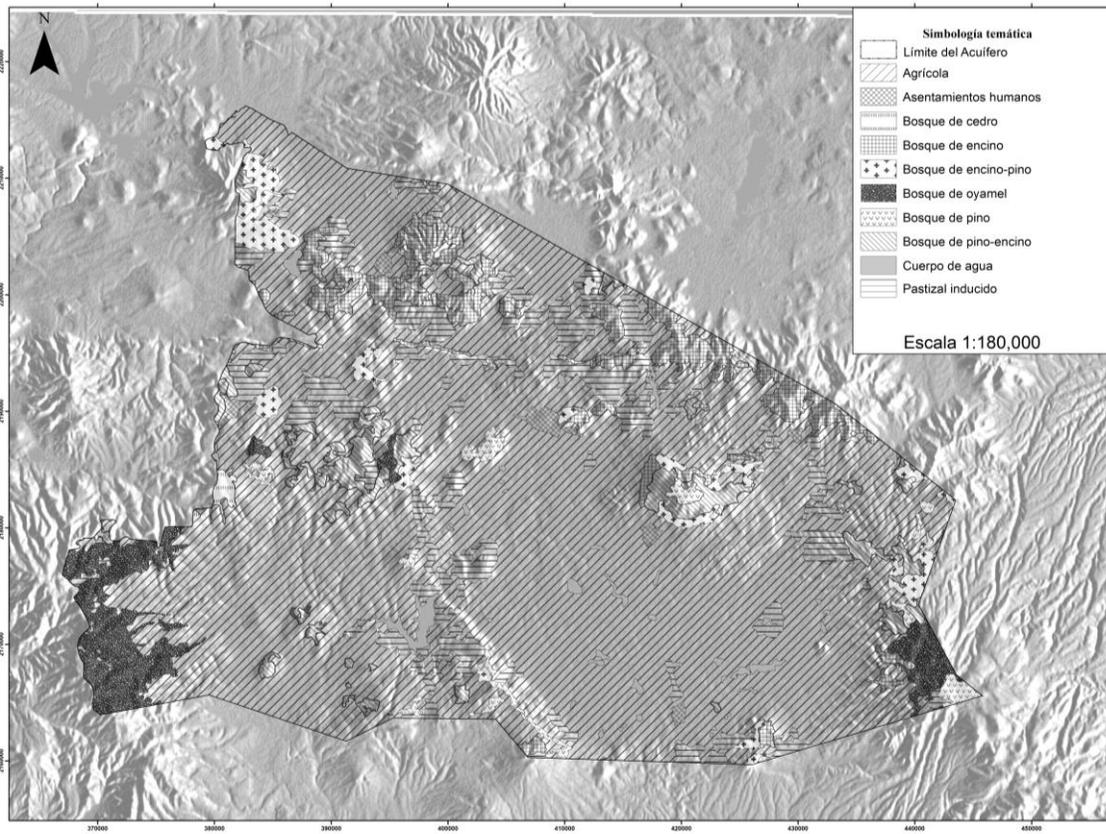


Fig. 5.5 Mapa de vegetación y uso de suelo del Acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco (con base en IFOMEGEM, 2013)

5.1.5 Edafología

La edafología se divide en 9 unidades principales:

Andosol. Está caracterizado por presentar materiales ricos en silicatos, provienen de materiales de vidrio, ceniza, tefra, pumita, así como otras rocas ígneas extrusivas (IEECC, 2013), dentro del área de estudio este tipo de suelo se encuentra distribuido en la parte suroeste principalmente y el límite este del área superficial comprendida por el acuífero.

Otro de los tipos de suelo encontrados es el durisol que de acuerdo con IUSS (2007) está compuesto principalmente por sílice, son muy duros y se encuentran asociados

a ambientes antiguos áridos o semiáridos: Este tipo de suelo se distribuye en pequeños polígonos ubicados al norte principalmente.

Fluvisol. Se ubica en dos franjas delgadas extendidas sobre la zona central de la cuenca. Este tipo de suelo se considera como un suelo joven que antecede a los suelos aluviales, y son compuestos de materiales sedimentarios, marinos o lacustres (IUSS, 2007).

El leptosol es un suelo somero, el cual se desarrolla sobre roca continua. Son suelos azonales comunes de las montañas (IEECC, 2013). En la zona de estudio se encuentra en la parte noroeste en áreas muy pequeñas.

El Luvisol, se distribuye en pequeños polígonos por toda el área de estudio. De acuerdo con IUSS, (2007) son suelos que contienen más arcilla. Esta misma condición provoca que los suelos no se encuentren consolidados.

Dominando la porción norte de la cuenca, se identifica el phaeozem, que son suelos desarrollados sobre pastizales y zonas forestales, con un grado alto de lixiviación, y superficialmente de color oscuro (IUSS, 2007).

El planosol se extiende por todo el valle. Este tipo de suelo se caracteriza por poseer un color café claro que indica el estancamiento de agua. Compuestos sobre todo por arcilla (IUSS, 2007).

Una pequeña porción ubicada al noroeste se compone de umbrisol, que es un suelo caracterizado por ser de color oscuro debido a la acumulación de materia orgánica de la que es producto (IUSS, 2007).

Finalmente, se tienen los Vertisoles que se localizan en el límite norte de la zona de estudio. Son suelos que concentran altas cantidades de arcilla. Un porcentaje considerable de éstas es de arcillas expandibles que al sufrir desecación tiende a provocar grietas en el suelo (IUSS, 2007).

En la figura 5.6 se muestra un mapa de edafología, donde se aprecia la distribución de los suelos.

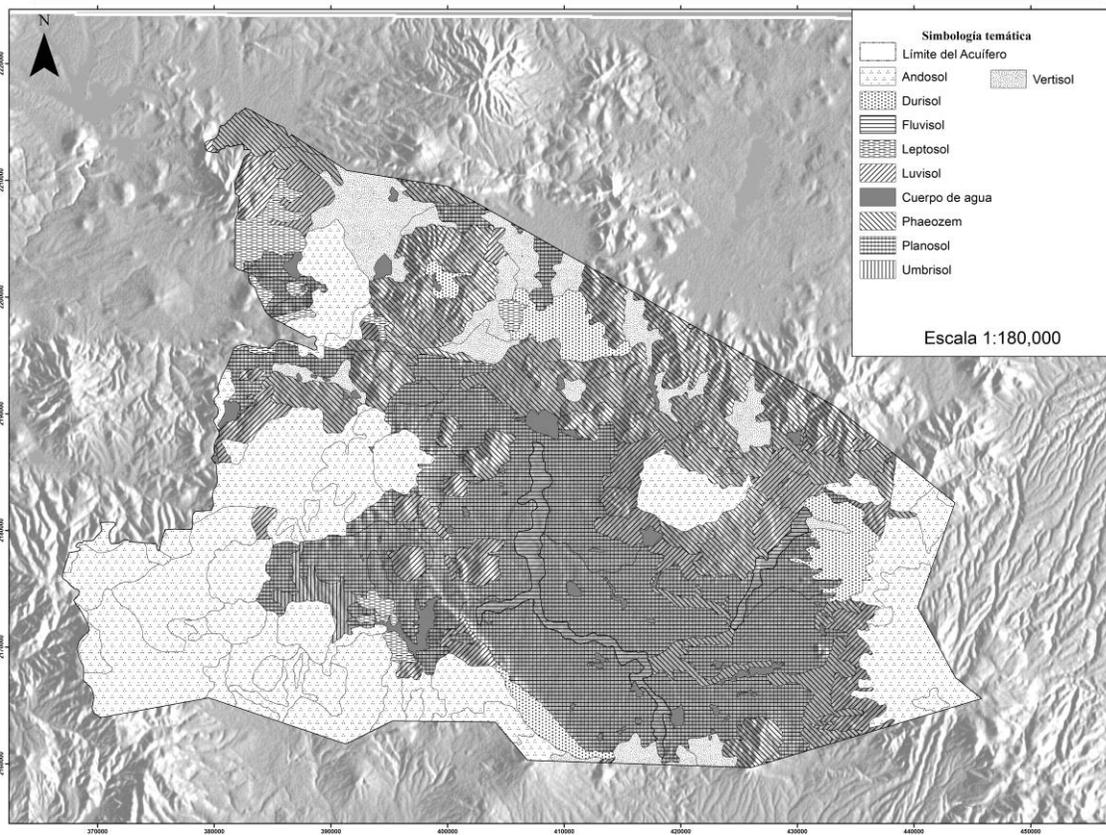


Fig. 5.6 Mapa edafológico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco (con base en IFOMEGEM, 2013)

5.1.6 Características sociales

La tabla 5.3 refiere a la población de los doce municipios según los Censos realizados por INEGI para el 2000, 2005 y 2010, así mismo se incluyen los datos de la Encuesta Intercensal realizada por INEGI, en 2015.

Tabla 5.3. Crecimiento de la población en lustros de 2000-2015, por municipio (INEGI, 2015)

Municipio	2015	2010	2005	2000
Temascalcingo	63721	62695	58169	77531
El Oro	37343	34446	31847	30411
Atlacomulco	100675	93718	77831	76750
Jocotitlán	65291	61204	55403	51979
Jiquipilco	74314	69031	59969	56614
Ixtlahuaca	153184	141482	126505	115165
San Felipe del Progreso	134143	121396	100201	177287
Villa del Carbón	47151	44881	39587	37993
San José del Rincón	93878	91345	79945	
Acambay	66034	60918	56849	58389
Timilpán	15664	15391	14335	14512
Chapa de Mota	28289	27551	21746	22828

5.1.7 Características económicas

En este apartado se contemplarán los aspectos económicos de la población. Aproximadamente la media de población económicamente activa del total de municipios es de 25, 526 por municipio, de los cuales el 94.17 % en promedio está ocupada (tabla 5.4).

También se incluye la tabla 5.5 que muestra las actividades desempeñadas por la población ocupada.

Tabla 5.4. Población económicamente activa (PEA) por municipio (INEGI, 2015)

MUNICIPIO	12 años y más	PEA	OCUPADA	DESOCUPADA
TEMASCALCINGO	48316	19964	94.72%	5.2%
EL ORO	28034	12034	94.97%	5.03%
ATLACOMULCO	76367	37274	96.96%	3.04%
JOCOTITLÁN	50615	23196	95.81%	4.19%
JIQUIPILCO	55269	23423	94.75%	5.25%
IXTLAHUACA	116166	54865	95.62%	4.38%
SAN FELIPE DEL PROGRESO	96574	39392	93.52%	6.48%
VILLA DEL CARBON	35120	15010.288	96.3%	3.7%

SAN JOSE DEL RINCON	66131	23628.6063	89.03%	10.97%
ACAMBAY	48976	19600.1952	93.4%	6.6%
TIMILPAN	12179	4958.0709	90.04%	9.96%
CHAPA DE MOTA	20791	9254.0741	94.96%	5.04%

Tabla 5.5. Sectores en los que se desempeña la población ocupada por municipio (INEGI, 2015)

MUNICIPIO	OCUPADA	FUNCIONARIOS	AGROPECUARIOS	INDUSTRIALES	COMERCIANTES
TEMASCALCINGO	18911	15.59%	15.93%	31.57%	35.87%
EL ORO	11429	17.47%	11.79%	28.12%	42.51%
ATLACOMULCO	36145	27.8%	9.05%	21.19%	41.48%
JOCOTITLÁN	22226	21.77%	13.62%	34.84%	28.45%
JIQUIPILCO	22194	12.08%	18.07%	24.16%	43.71%
IXTLAHUACA	52461	13.98%	11.37%	32.36%	41.55%
SAN FELIPE DEL PROGRESO	36837	10.99%	14.54%	29.84%	43.98%
VILLA DEL CARBON	14453	13.06%	20.13%	27.05%	38.59%
SAN JOSE DEL RINCON	21037	4.15%	30.08%	27.53%	37.02%
ACAMBAY	18305	4.16%	26.48%	26.47%	31.72%
TIMILPAN	4464	17.7%	15.14%	29.35%	36.92%
CHAPA DE MOTA	8788	10.67%	16.74%	36.5%	35.06%

5.1.8 Uso del agua en el Acuífero Ixtlahuaca- Atlacomulco.

De acuerdo con Ramírez (2015), el Al-A ha experimentado problemas de sobreexplotación derivados del crecimiento acelerado de la población, del desarrollo de las actividades económicas y del abasto de agua para el área metropolitana del Valle de México. Los acuíferos Ixtlahuaca-Atlacomulco y Valle de Toluca se encuentran en veda desde 1965 y es necesario realizar para los acuíferos que conforman el Sistema Lerma (Ixtlahuaca-Atlacomulco y Valle de Toluca) un plan gestión apropiado (Torres, 2010).

CONAGUA (2015) indica que la recarga del acuífero es de 119 Mm³/año, la descarga natural comprometida 18 Mm³/año, el volumen concesionado de agua subterránea corresponde a 106.80 Mm³/año y que la disponibilidad media anual de agua subterránea es nula debido a que el acuífero presenta un déficit de 5.80 Mm³/año. Dentro de la misma publicación se estima que el cambio de almacenamiento que ha tenido el acuífero es de -4 Mm³/año.

Vargas-Velázquez (2007) manifiesta que el AI-A, el acuífero Valle de Toluca y Lago de Chapala aportan agua para 16 millones de personas externas a la cuenca, 11 millones de personas locales de su cuenca y 5 ciudades de Jalisco.

De acuerdo con la tabla 5.6 sobre el consumo de agua, la extracción de agua registrada por REPDA es de 67.18 hm³/año, mientras que CONAGUA registra una extracción de 159.78 hm³/año.

Tabla 5.6 Usos del agua con datos de REPDA y CONAGUA (Escolero-Fuentes, 2009)

		PÚBLICO-URBANO	AGRÍCOLA	INDUSTRIAL	SERVICIOS	PECUARIO	MÚLTIPLE	OTROS
REPDA	hm ³ /año	18.4	17.38	3.15	0.02	0.15	18.07	0.002
	%	32.2	30.4	5.5	0	0.3	31.6	0
CONAGUA	hm ³ /año	125.44	26.44	3.15	0.02	0.15	4.58	0.002
	%	78.5	16.5	2	0	0.1	2.9	0

5.2 CARACTERIZACIÓN PIEZOMÉTRICA Y DE EXTRACCIÓN DEL ACUÍFERO

5.2.1 Caracterización de la profundidad del nivel piezométrico 1983

Para obtener este resultado se realizó una sobreposición de capas, donde se consideró como base la información de profundidad de nivel piezométrico del año 1983 en formato ráster. Sobre este mapa se añadió un vector puntual de la distribución espacial de los pozos que al mismo tiempo contenía la información de explotación de cada uno de los pozos. En la figura 5.7 se presenta un mapa que considera los aspectos ante mencionados pertenecientes al año 1983.

Con base en información de CONAGUA (1993) se identificaron 187 pozos de extracción de agua que se encontraban dentro del límite del AI-A, ocho de ellos eran empleados para el Sistema Lerma y el resto para consumo local. La profundidad del nivel piezométrico durante este año promedió 24.74 metros; con niveles en algunos pozos de 8.8 metros de profundidad mientras que otros tenían niveles a 130 metros de profundidad. La extracción promedio era de 0.026 m³/s, con un mínimo caudal extraído de 0.003 m³/s y un máximo de 0.225 m³/s.

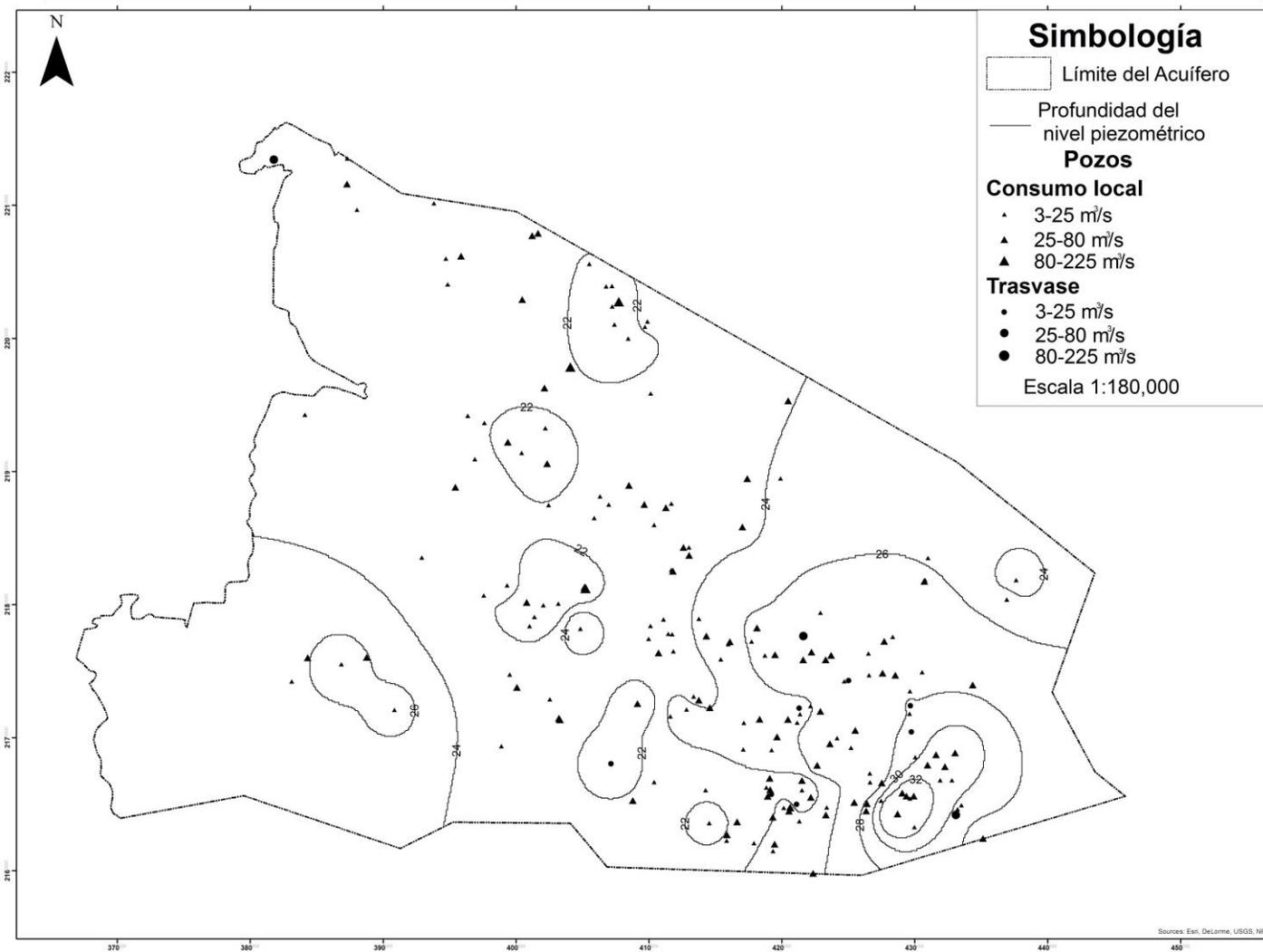


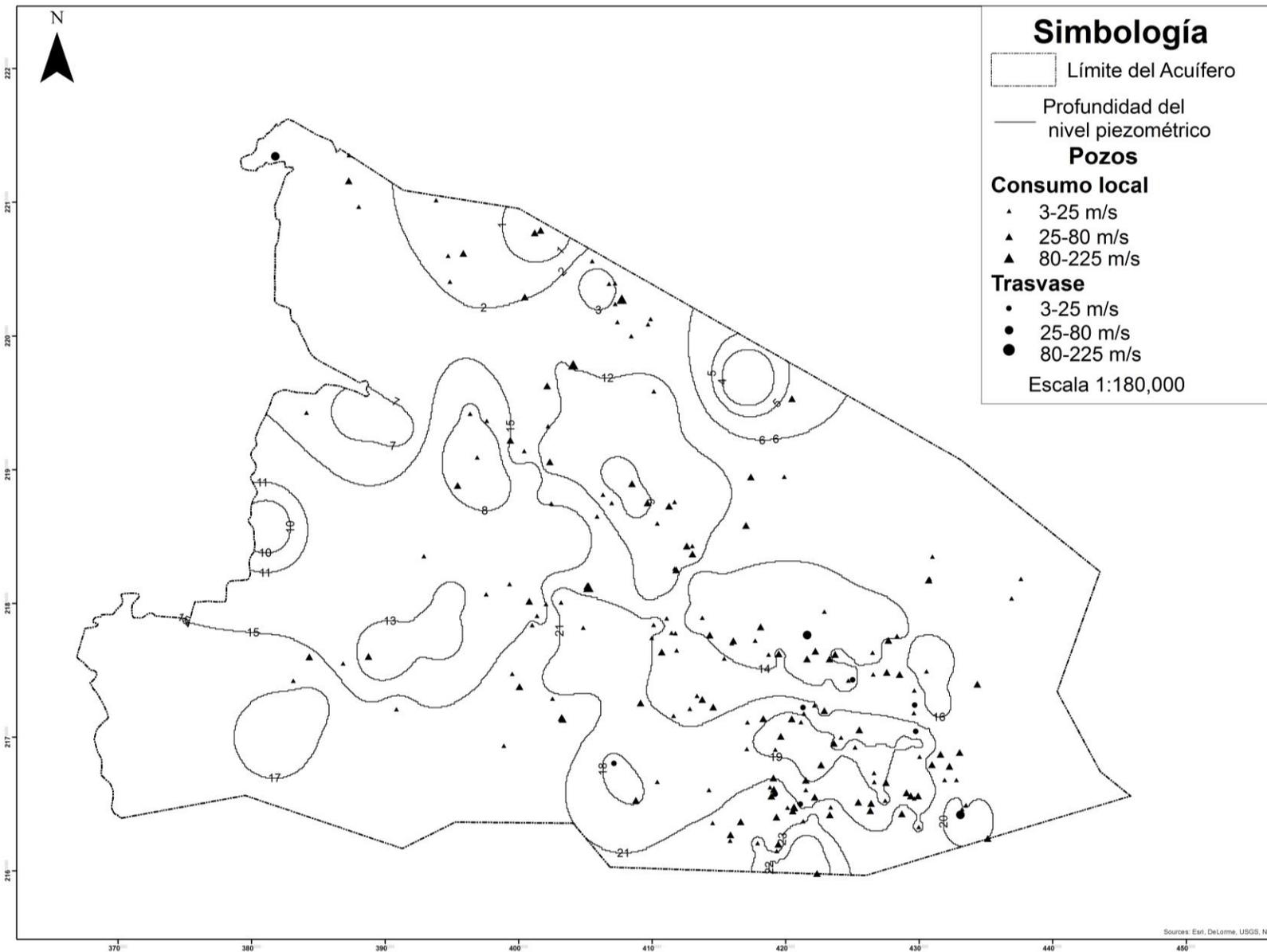
Fig. 5.7 Mapa de profundidad de nivel piezométrico del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco, 1983

5.2.2 Caracterización de la profundidad del nivel piezométrico 2009

Para el año 2009 se aplicó el mismo proceso. Se destaca que para este año el número de pozos de extracción era de 259, habiendo aumentado el número de pozos destinados para el trasvase, pasando a 14 pozos concentrados en la zona del valle como se puede observar en la figura 5.8.

Los pozos de trasvase, así como la mayoría de los pozos de consumo local, se ubican en la zona sureste del Al-A. La profundidad del nivel piezométrico promedio resultó de 37.88 metros de profundidad, la menor profundidad de nivel piezométrico fue de 3 metros y la mayor profundidad fue de 130 metros..

La extracción durante el año 2009 se promedió en $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo la extracción mínima de $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ y la extracción máxima de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$.



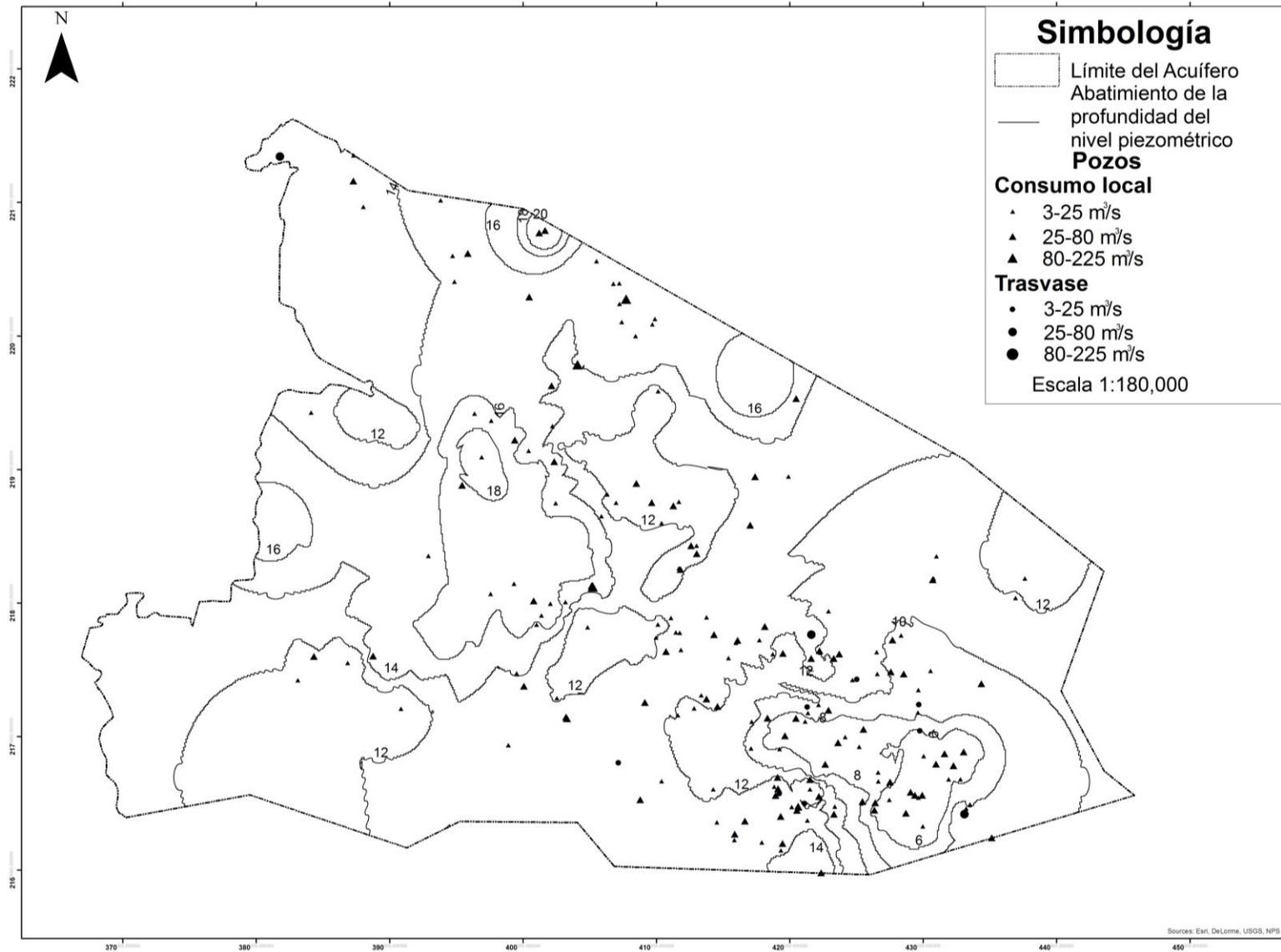
5.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL ABATIMIENTO EN EL AI-A

El abatimiento de las aguas subterráneas genera una variación de la carga hidráulica. En el presente trabajo, esta variación fue estimada por medio de un análisis espacio-temporal del abatimiento del nivel piezométrico a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Como resultado de esta etapa se obtuvo un mapa (figura 5.9) representativo del abatimiento generado durante el periodo de 1983-2009. Es decir el abatimiento producido en alrededor de 26 años de explotación del AI-A.

A partir de este mapa de descenso de nivel piezométrico se obtuvo un abatimiento promedio de 0.47 m/año entre los años 1983 y 2009. Con ello, fue posible dimensionar la magnitud de la extracción y el nivel piezométrico

La media ponderada del nivel piezométrico $\overline{h_p}_j$ (ecuación 4.1) resultó de 25.11 m para 1983, mientras que para el año 2009 corresponde a 36.77 m. Es decir, que en 26 años cada metro cúbico de agua aumentó su profundidad de extracción en 11 m. Por lo tanto, la tendencia de la media ponderada del nivel piezométrico en los pozos de extracción indica un descenso anual de 0.448 m.



Se realizó también la media ponderada de la profundidad de nivel piezométrico con relación al caudal extraído considerando solamente los pozos del trasvase. En este sentido, 14 pozos extraen un caudal total de 459 L/s para el 2009 mientras que en 1983 la extracción fue de 243 L/s. Para el año 1983 la profundidad del nivel piezométrico era de 23.07 m y Para 2009 la profundidad del nivel piezométrico promedio se encontraba en 36.07 m. El resultado promedio obtenido para la media ponderada de la profundidad del nivel piezométrico fue de 0.811 m por litro extraído, con un descenso mínimo de 0.5 metros por litro extraído y un máximo de 4 metros por litro extraído.

Para el consumo local se consideraron 242 pozos que extraen un caudal de 6,831 L/s. Para 1983 la profundidad del nivel piezométrico promedio era de 29.10 m y para el año 2009 el promedio fue 36.64 m. Por lo tanto, la media ponderada de la profundidad de nivel piezométrico en relación al caudal extraído fue de 0.85 metros por litro extraído en 26 años, con un mínimo de -15.5 metros por litro extraído y un máximo de hasta 22 metros por litro extraído.

5.4 CONSUMO ENERGÉTICO ASOCIADO AL ABATIMIENTO DEL AI-A

La figura 5.10 presenta el consumo energético estimado para 1983 de acuerdo al caudal y la distribución de pozos del 2009, debido a que fueron consideradas características de explotación iguales para ambos años a fin de comparar los resultados obtenidos para los diferentes años.

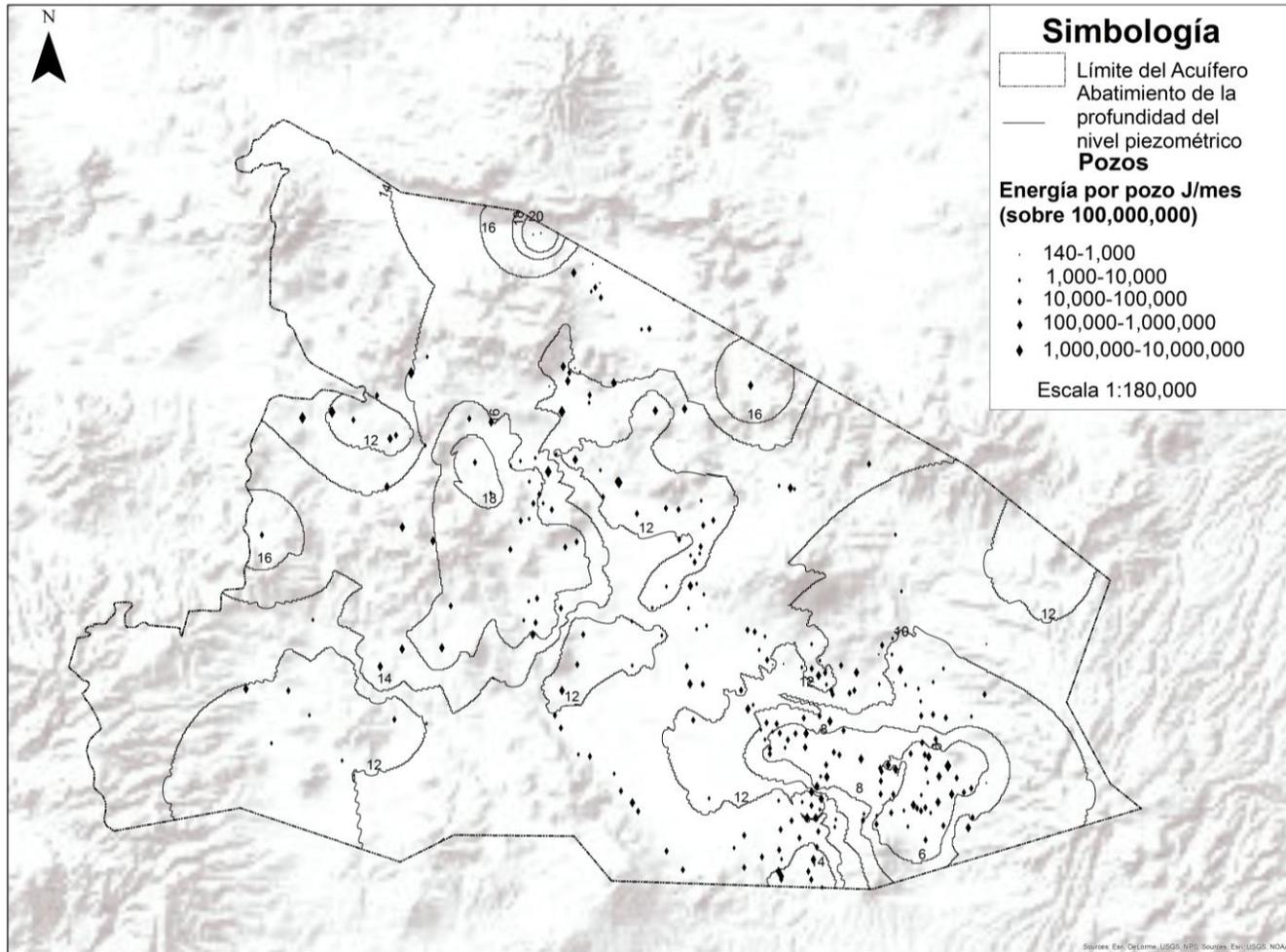
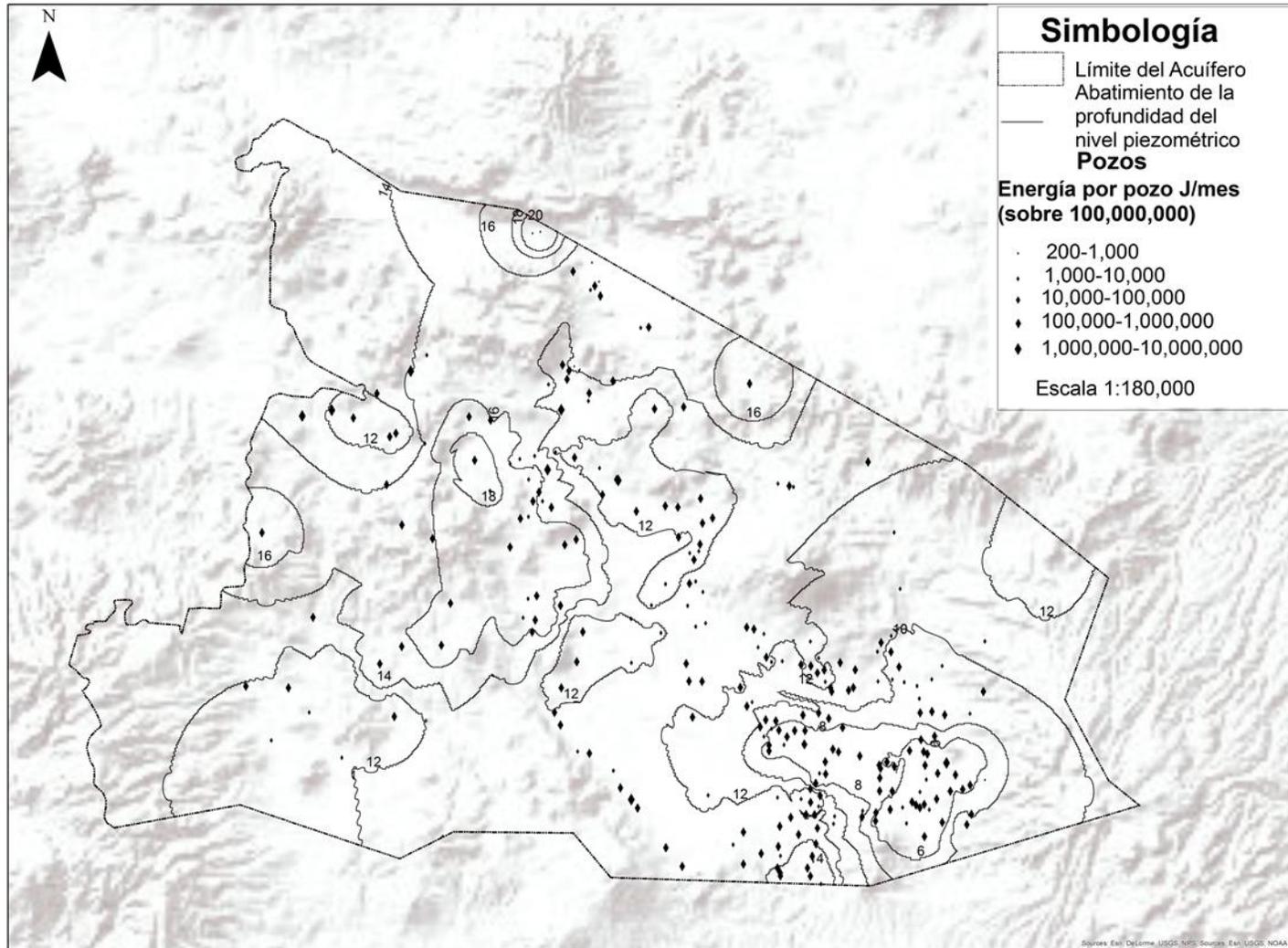


Fig. 5.10 Mapa de consumo energético por pozo de Acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco, 1983

El proceso ejecutado para obtener el mapa 5.10 arroja que el total de energía consumida por los 259 pozos que se han considerado en el presente estudio para una extracción de 3,806.61 hm³ por mes fue de 1,036 millones de kWh mensuales. La media registrada por los 259 pozos fue de casi 4 millones de kWh por mes, mientras que la desviación estándar de la media fue de alrededor de 14 millones de kWh al mes, teniendo en cuenta que el mínimo consumo energético por pozo llegó a ser de 3,962 kWh mensuales y alcanzando un máximo consumo de energía de 166 millones de kWh por mes.

Como ya se había mencionado, las características de extracción fueron consideradas de manera igual para ambos años, entonces con respecto al año 2009 se consideraron 259 pozos así como una extracción mensual de 3, 806.61 hm³. La diferencia reside únicamente en la profundidad de nivel piezométrico correspondiente al año 2009. El consumo energético total obtenido para este año fue de 1, 236 millones de kWh por mes. En la figura 5.11 se muestra un mapa que representa el consumo energético por pozo para este año.



5.11 Mapa de consumo energético por pozo en el Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco, 2009

Estadísticamente para el año 2009, la media de consumo energético fue mayor a 4 millones de kWh por mes, la desviación estándar de la media de los pozos se aproximó a 19 millones de kWh por mes, el mínimo consumo energético oscilo en torno a los 5,000 kWh por mes y el mayor consumo energético por pozo fue de 250 millones de kWh por mes, los resultados pueden consultarse en el anexo 1.

De acuerdo con la información de volúmenes de extracción, los 14 pozos destinados para el trasvase explotan mensualmente 19,828,800 m³, mientras que el total de los pozos representan una extracción mensual 317, 217, 600 m³, por lo tanto, la extracción mensual destinada al trasvase es del 6.25% con respecto al total. Así mismo, considerado únicamente los pozos de trasvase, el consumo energético durante el 2009 fue de 84 millones de kWh mientras que para 1983 el consumo fue de 83 millones de kWh lo que representa que para el año 2009 se utilizaron 1,105,210 kWh más por mes para extraer la misma cantidad de agua.

Como parte del presente estudio se infirió en qué proporción los pozos de trasvase era generadores del abatimiento, consecuentemente cual era la participación proporcional que tenía dentro del consumo energético como parte de la externalidad (anexo 1). El resultado de dicho proceso se presenta en la tabla 5.7 en donde para cada uno de los pozos se representa su influencia sobre el abatimiento (proporción), además de la diferencia de consumo energético que se tiene para cada pozo entre 1983 y 2009, asimismo se obtiene el consumo en relación con la influencia del pozo; para finalmente presentar en kWh el consumo energético generado. Respectivo a la tabla 5.7 los valores con signo positivo son indicadores de aumento en el consumo energético debido a la presencia de abatimiento, mientras que para los valores con signo negativo el consumo energético fue menor en 2009 que en 1983, lo cual puede ser considerado como recarga del acuífero.

Tabla 5.7. Proporción de consumo energético para pozos de trasvase (equivalencia kWh, anexo 2)

ID	PROPORCIÓN	DIFERENCIA CE 2009-1983	J/MES	KWh
50	100	612059930784.97	612059930784.97	170016.647
56	69.81	0.00	0.00	0
71	23.08	101189497090.19	23354535928.42	6487.37109
88	100	196055047967.45	196055047967.45	54459.7355
97	13.04	90190314232.41	11760816975.91	3266.8936
108	25	90190314232.41	22547578558.10	6263.21627
153	31.01	-73030527383.55	-22646766541.64	-6290.76848
185	41.86	326603816369.46	136716357532.26	37976.766
195	39.02	80595731803.10	31448454549.57	8735.68182
214	33.03	396590348448.63	130993792092.58	36387.1645
217	100	137297288046.58	137297288046.58	38138.1356
235	100	297838724969.22	297838724969.22	82732.9792
241	7.44	75610832518.10	5625445939.35	1562.62387
259	100	1647567456558.93	1647567456558.93	457657.627

5.5 Propuesta de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico

En conciliación con los resultados anteriores, el consumo energético por mes es de 903,684 kWh, sopesando el consumo negativo como 0. Ávila (2005) señala que para producir un kWh en México el promedio es de 63 centavos mientras que el costo de transmisión es de aproximadamente 81 centavos, lo cual equivale a \$1.44. Dentro de la misma bibliografía se maneja que la tarifa eléctrica para extracción de agua subterránea es de \$ 0.91 por metro cúbico.

Considerando que los pozos destinados al trasvase extraen sobre los 19 millones de metros cúbicos por mes y que entre los años 1983 y 2009 ha aumentado el consumo energético en 1.33 %, y teniendo en cuenta las cifras anteriores un kWh de trasvase equivale a 21.94 m³/mes, siguiendo este mismo razonamiento por cada m³/mes se debería realizar un cargo extra de \$0.06 considerando el valor promedio de \$1.44 para transmitir y producir un kWh.

Por lo tanto, la percepción mensual por el trasvase sería de \$1,189,728 que anualmente representaría un ingreso de \$14,276,736. Este importe puede ser recaudado mediante la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) ya que el

cargo debería realizarse directamente al recibo del usuario y posteriormente transferido a una cuenta supervisada por un comité conformado por ejidatarios correspondientes a las zonas donde se destinará el recurso.

Una primera propuesta sería definir en que zonas debería destinarse el recurso recaudado del pago por servicio ambiental hidrológico antes propuesto. Se identificaron las áreas de infiltración que serían parte de un programa de recuperación del espacio y posterior reforestación del mismo, ya que aportarían al acuífero una zona de recarga más eficiente. Además se buscó identificar las zonas más vulnerables a la contaminación que existen en el acuífero ya que, de acuerdo con el mapa de vegetación y uso de suelo (figura 5.5), el área que comprende el AI-A se encuentra en su mayoría empleada para la agricultura, lo que ocasiona el uso de herbicidas y diferentes fertilizantes que, en zonas recarga, pueden ocasionar la contaminación del acuífero, además de que si no se realiza la rotación de cultivos y el manejo adecuado del suelo este puede volverse infértil.

La figura 5.12 muestra un mapa en el que se aprecian las zonas aptas para la reforestación definidas por el método GOD el cual es utilizado para determinar las zonas vulnerables de un acuífero con base a la potencialidad de infiltración, estas zonas están principalmente ubicadas en el límite del AI-A.

A partir de la identificación de las zonas de mayor infiltración podrían seguirse las líneas de acción que se mencionan a continuación:

- Identificación de tipo de vegetación apta para la zona, debido a la altitud de las áreas de filtración el tipo de vegetación podrían ser especies de pino o encino.
- Identificación de zonas donde el suelo presente erosión para la aplicación de técnicas de recuperación evitando la desecación del mismo.
- Establecer polígonos de protección limitando algunas actividades sobre las zonas más vulnerables a infiltración.

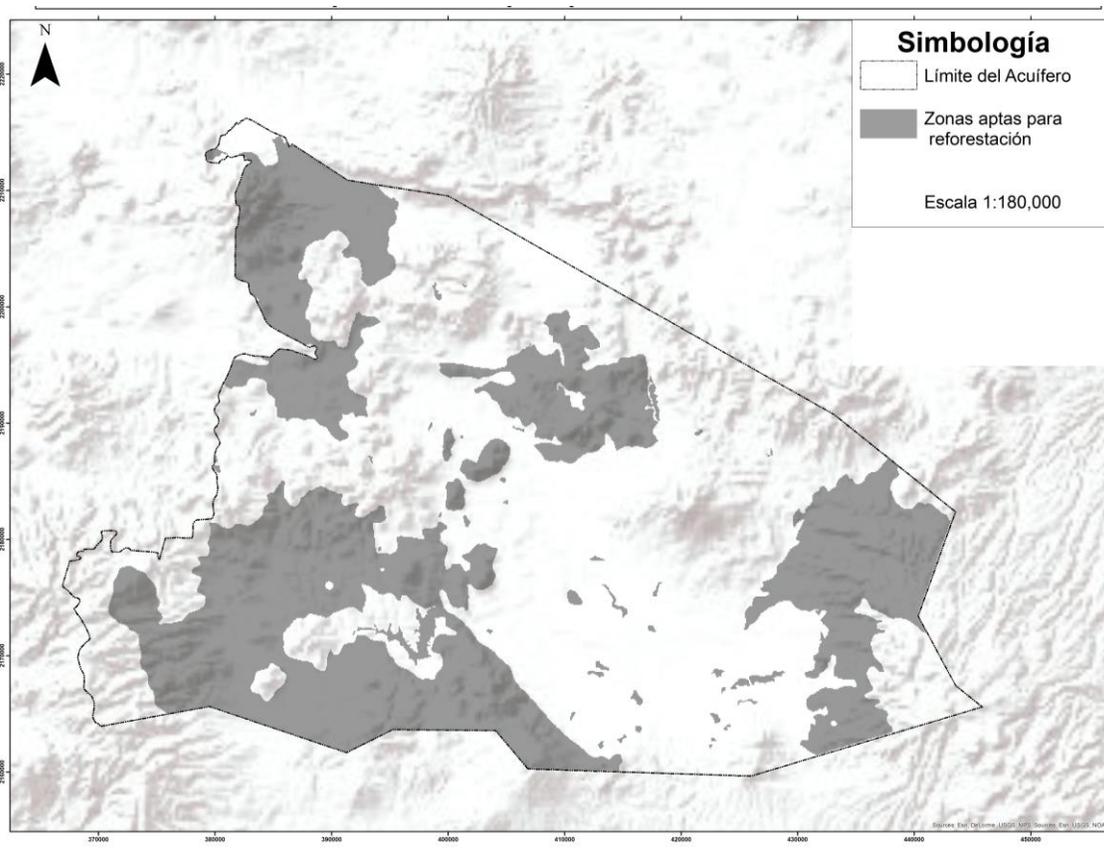


Figura 5.12 Mapa de zonas aptas para la reforestación en el AI-A

De acuerdo con Kido-Cruz, (2007), en un estudio realizado sobre Oaxaca, el costo aproximado por reforestar una hectárea de bosque templado o selva es de \$ 8,046 por ha. considerando que el costo de mano de obra para la reforestación de una ha. es de \$3,360.00 y que el costo de los materiales alcanzaría los \$4,686.00 (incluye el 10% de pérdidas, árboles como cedro en cantidad de 440 por ha.).

Se puede argumentar para valorar el pago del servicio ambiental que una ha. llega a generar 22.7 toneladas de papa (cultivo común dentro de la zona de estudio, (IFOMECE, 2013)) y que durante el 2008 en el Estado de México se generaron 126,000 toneladas de papa a un costo de \$41,000,000 de pesos (Morales-Hernández, 2011), por lo que el costo por tonelada fue de \$325.4 y por hectárea fue de \$7,386.00 pesos; entonces el pago al ejidatario por reforestar una hectárea sería de \$15,432.00 ya que se incluiría el costo de reforestar más el costo por la pérdida

de la producción de la papa(. Por lo tanto, mensualmente podría reforestarse 77 ha. aproximadamente si se recaudaría \$1,189,728 pesos.

La segunda propuesta es la infiltración con aguas pluviales, ya que representa una estrategia con un costo accesible. De acuerdo con Burns, (2009) esta estrategia consiste en la captación de picos de precipitación a través de lagunas de infiltración. Estas lagunas tienen una extensión comprendida entre una y diez ha. con un metro de profundidad, se ubican cerca de cauces de escurrimientos y reciben el agua por medio de compuertas.

Por lo tanto, dentro de esta propuesta, se considerarían gastos de mano de obra para la excavación de la laguna, herramientas, mantenimiento (desazolve) y renta del espacio ocupado para la laguna.

Finalmente, se recomienda destinar recursos a la dotación de infraestructura de riego para la agricultura, logrando optimizar el caudal empleado para dicha actividad y minimizando las pérdidas por evaporación y escorrentía. SEMARNAT, (2010) propone el uso de mecanismos de gravedad cuando se trata de suelos arcillosos. Sin embargo, Zimmatic, (2015), realiza una comparación entre el sistema de gravedad y el de aspersión, comprobando que el sistema de aspersión puede lograr de 13% a 25% de ahorro en la producción de cultivos.

Considerando el sistema de aspersión como el más eficiente se entiende que para realizar un sistema de riego por aspersión para 50 ha. se requiere una inversión de \$84,700.00 para la adquisición de materiales, y su instalación representa un costo de \$35,100.00. Así mismo, el operación anual tendría un costo de \$41,388.00 (agua, combustible y personal de operación) y finalmente el mantenimiento costaría \$10,485.00, Espinosa (2009). Por lo tanto, considerando un costo anual total de \$171,673.00, podrían ser dotadas de infraestructura alrededor de 4,100 ha., cubriendo el primer año de mantenimiento y operación.

5.5.1 Alcances de la propuesta

La propuesta anterior se encuentra formulada mediante el contraste de los resultados de las etapas, debido a que fue producto del diagnóstico a través de los diferentes Sistemas de Información Geográfica (SIG) así como una perspectiva holística acerca de la explotación y manejo del recurso.

Anualmente, por la aplicación del Pago por Servicio Ambiental Hidrológico dentro del recibo de agua de los consumidores del gasto proveniente del trasvase se tendría una retribución de \$14, 276,736, que mediante la correcta administración de este recurso sería posible impulsar las tres propuestas antes mencionadas, la reforestación de las zonas de alta filtración, la eficiencia a riego (agricultura) y, la infiltración de aguas pluviales para la recarga del acuífero.

Es importante reiterar que el recurso debe ser destinado para la conservación y restauración de las áreas determinadas como zonas de recarga en el acuífero principalmente, para lo cual es necesaria la participación de los organismos involucrados para la explotación y trasvase del agua dentro del AI-A, así mismo se requiere la participación y eficiente gestión del Gobierno del Estado de México junto con las dependencias competentes, tales como: CONAGUA, CONAFOR y SEMARNAT. Finalmente, como parte sustancial de la colaboración para el funcionamiento del Pago por Servicio Ambiental Hidrológico expuesto en este caso de estudio se requiere a la población. Como se exhibe en el mapa de vegetación y uso de suelo correspondiente a la figura 5.5 del documento, el área comprendida dentro del AI-A tiene un uso de suelo principalmente destinado a la agricultura, consecuentemente una población ocupada en la misma.

5.5.2 Factibilidad de la propuesta en un marco legal

De acuerdo con el Fondo Forestal Mexicano (2013) el pago por servicio ambiental es un instrumento para promover la conservación, incremento, aprovechamiento sustentable y restauración de los recursos y a través del acceso a los servicios financieros para impulsar proyectos. Derivado de este concepto, las propuestas anteriores en favor del cobro por servicios ambientales cumplen con el fin del pago

por servicio ambiental, debido a que contempla recursos económicos para el financiamiento de obras, proyectos y estrategias para conservar y restablecer la profundidad del nivel piezométrico del AI-A.

En la LGEEPA, dentro del Título Segundo (Biodiversidad), perteneciente a la Sección IV (Establecimiento, Administración y Manejo de Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación) se exponen los siguientes artículos:

Artículo 77 BIS.- Los pueblos indígenas, organizaciones sociales, personas morales, públicas o privadas, y demás personas interesadas en destinar voluntariamente a la conservación de predios de su propiedad, establecerán, administrarán y manejarán dichas áreas conforme a lo siguiente:

I.- Las áreas destinadas voluntariamente a la conservación se establecerán mediante el certificado que expida la Secretaría, en el cual las reconozca como áreas naturales protegidas. Los interesados en obtener dicho certificado presentarán una solicitud que contenga:

- a) Nombre del propietario;
- b) Documento legal que acredite la propiedad legal del predio;
- c) En su caso, la resolución de la asamblea ejidal o comunal en la que se manifieste la voluntad de destinar sus predios a la conservación;
- d) Nombre de las personas autorizadas para realizar actos de administración en el área;
- e) Denominación, ubicación, superficie y colindancias en el área;
- f) Descripción de las características físicas y biológicas generales del área;
- g) Estrategia de manejo que incluya la zonificación del área, y
- h) Plazo por el que se desea certificar el área, el cual no podrá ser menor a quince años.

Dentro de este artículo se manejan los datos que cada requisito debe contener así como las clausulas aplicadas para la protección de una zona.

Interinamente en la LGEEPA en su Capítulo II referente a Zonas de Restauración alude en el artículo 78 a las siguientes áreas “Aquellas que presente procesos de

degradación o desertificación, o graves desequilibrios ecológicos, la Secretaría deberá formular y ejecutar programas de restauración ecológica, con el propósito de que se lleven a cabo las acciones necesarias para la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los procesos naturales que en ella se desarrollaban. En la formulación, ejecución y seguimiento de dichos programas, la Secretaría deberá promover la participación de los propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales, y demás personas interesadas” .

Mientras que en su **Artículo 78 BIS**.- En aquellos casos en los que se estén produciendo procesos acelerados de desertificación o degradación que impiden la pérdida de recursos de muy difícil regeneración, recuperación o restablecimiento o afectaciones irreversibles a los ecosistemas o sus elementos, la Secretaría, promoverá ante el Ejecutivo Federal la expedición de declaración para el establecimiento de zonas de restauración ecológica. Para el efecto, elaborará previamente los estudios que las justifiquen.

Las declaratorias deberán publicarse en el **Diario Oficial de la Federación**, y serán inscritas en el Registro Público de la Propiedad correspondiente.

Las declaratorias podrán comprender, de manera parcial o total, predios sujetos a cualquier régimen de propiedad, y expresarán:

- I.- La delimitación de la zona sujeta a restauración ecológica, precisando superficie, ubicación y deslinde;
- II.- Las acciones necesarias para regenerar, recuperar o restablecer las condiciones naturales de la zona;
- III.- Las condiciones a que se sujetarán, dentro de la zona, los usos del suelo, el aprovechamiento de los recursos naturales, la flora y la fauna, así como la realización de cualquier tipo de obra o actividad;
- IV.- Los lineamientos para la elaboración y ejecución del programa de restauración ecológica correspondiente, así como para la participación en dichas actividades de propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales y demás personas interesadas, y

V.- Los plazos para la ejecución del programa de restauración ecológica respectivo.

A parte de la LGEEPA, hay muy poca legislación referente a los PSA y más aún cuando se trata de legislación en reseña al pago por servicio ambiental hidrológico. CONAFOR ha desarrollado diferentes programas en materia a los PSA con alusión principal en los recursos forestales tales como el Programa Nacional Forestal- Pago por Servicios Ambientales del 2013, el cual tenía por objetivo incorporar superficie forestal a procesos de restauración, conservación y aprovechamiento sustentable para contribuir a la restauración forestal y la provisión de bienes y servicios ambientales en el país.

Para participar en este programa se realizaban análisis de la cobertura y del sector para determinar la población beneficiada y la funcionalidad de las cuencas y el paisaje y va dirigido a dueños y poseedores forestales.

Por su lado, SEMARNAT, desde el año 2007, como parte de las políticas públicas para instrumentar los PSA lanzo su programa PROÁRBOL en el cual justifica a los PSA como:

- Instrumentos financieros eficientes para conservar los ecosistemas naturales.
- Búsqueda de opciones de más bajo costo para asegurar la provisión de bienes o servicios ambientales.
- Revalorizar y manejar adecuadamente todos los espacios.

Así pues, con base en este marco normativo, la propuesta planteada en este estudio está incluida dentro de los parámetros planteados por las diferentes dependencias gubernamentales de los Estados Unidos Mexicanos y que se encuentra enfocada al bienestar común de la población residente al área del AI-A, así como a los usuarios receptores del Traslase Alto Lerma, al recibir los primeros una retribución para la conservación y restauración del recurso cedido y para los segundos una forma de asegurar la dotación de agua futura.

**INVESTIGACIONES FUTURAS
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
PARA INVESTIGACIONES FUTURAS**

La hipótesis sobre la que se basó el presente estudio, en la que se sostenía que: “el abatimiento del nivel de aguas subterráneas, atribuido al trasvase desde el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco al Valle de México, genera un incremento al pago por servicios ambientales hidrológicos imputado al aumento del consumo energético “, se comprobó

La metodología fue desarrollada con base en el objetivo de determinar cuál debería ser el equivalente monetario cubierto por la cuenca receptora debido al abatimiento generado por los pozos de trasvase a la cuenca cedente. La metodología desarrollada cumple con los objetivos de determinar el abatimiento de la profundidad del nivel piezométrico en todo el acuífero y de manera puntual para cada uno de los pozos de trasvase. Posteriormente, el uso del módulo de *supply processes*, como una extensión de IDRISI Selva, hizo posible la estimación del consumo energético en la extracción del agua subterránea y determinar el aumento del consumo energético por la extracción del agua subterránea a niveles de agua cada vez más profundos.

Finalmente, se definió como externalidad, el equivalente económico del consumo energético, siendo esta externalidad la que debe ser incluida en el pago del servicio ambiental hidrológico. Con base en este pago, se definió, una propuesta y líneas de acción a implementar en el acuífero como son la reforestación de las zonas de recarga, la infiltración de aguas pluviales y la tecnificación del riego.

Así mismo, se resalta que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta poderosa para la representación y el análisis de fenómenos sociales, naturales y económicos, como en el caso de estudio donde solo se requirieron características espaciales y temporales. El SIG permitió visualizar un panorama completo del fenómeno que, para el caso de estudio, fue el consumo energético a partir del abatimiento generado dentro de un acuífero. Igualmente dentro de los SIG

INVESTIGACIONES FUTURAS

se realizaron métodos estadísticos que permitieron dimensionar el abatimiento y el consumo energético de manera individual, es decir, por pozo.

Con respecto a los PSA, se concluye que son un instrumento financiero competente para el apoyo económico en favor de los ecosistemas capaces de brindar servicios a partir de su equilibrio. Sin embargo, es un instrumento que requiere una mayor integración dentro de la población e establecer estándares sobre el costo de los servicios ambientales. Los PSA dentro de la metería del agua también son una parte importante de la gestión los recursos hídricos, ya que a partir de la determinación de su valor es posible instaurar una cultura de conservación, cuidado e interés por parte de la población, el gobierno y las instituciones (civiles o gubernamentales).

Dentro del caso de estudio solo se determinó el consumo energético por extracción del agua subterránea, así como el aumento del consumo energético imputado al abatimiento generado en 26 años de extracción de agua subterránea, con un enfoque en la extracción empleada para el Trasvase Alto Lerma; sin embargo, un mayor panorama para la observación, análisis y determinación del costo de los servicios ambientales del AI-A es el análisis de emergía del mismo.

ANEXOS

Anexos

Anexo 1. Inferencia de la proporción del abatimiento (Ejemplo pozo 153)

Para el caso del pozo de trasvase no. 153, los pozos dentro de su radio de influencia son los pozos 147, 150 y 159, por lo tanto es necesario obtener la proporción en la que el pozo 153 es responsable del abatimiento en esa área. Considerando entonces que los caudales de extracción son los siguientes: pozo 147= 604,800 m³/mes, pozo 150= 1, 728,000 m³/mes, 159= 1, 512,000 m³/mes y el pozo 153= 1, 728,000 m³/mes. De este modo el caudal extraído dentro del radio de influencia del pozo 153 es de 5, 572,800 m³/mes y la proporción del pozo 153 se obtendría mediante una regla de tres presentada a continuación.

POZO 153		
100 %	_____	5, 572, 800 m ³ /mes
X _{POZO153}	_____	1, 728, 000 m ³ /mes

La solución sería la siguiente.

$$X_{POZO153} = \frac{(1,728,000 \times 100)}{5,572,800} = 31.01 \%$$

Anexo 2. Equivalencia J/mes a kWh.

Para obtener los valores de energía en kWh se utilizó la equivalencia de 1kWh=3.6x10⁶ J/mes por lo tanto para el caso del pozo 214 cuya influencia dentro del aumento de consumo energético para la extracción de agua es de 130, 993, 792, 092.583 J/mes solo debe realizarse la siguiente operación en relación a una regla de tres.

POZO 214		
3.6x10 ⁶ J/mes	_____	1 kWh
130, 993, 792, 092. 583 J/mes	_____	X _{214kWh}

La solución es la siguiente

$$X_{214kWh} = \frac{(130,993,792,092.583 \times 1)}{3.6 \times 10^6} = 36,387.1645 \text{ kWh}$$

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

Arana, M (2012) BID: Primer informe, Noviembre-2012, México, 302 pp.

Arregín, F, López, M, (2007) Agua virtual en México, Ingeniería hidráulica en México, vol. XXII, núm. 4, pp. 121-132, 12, pp.

Asquith, N., Wunder, S. (2009) Pagos por servicios hídricos, las conversaciones de Ballagio, Fundación Natura Bolivia, Bolivia, 36, pp., 8-36

Bastida Muñoz, M.C., (2009) Crisis del agua en el Valle de Toluca, Repercusiones socioambientales por el trasvase, Simposio “El acceso al agua en América: historia, actualidad y perspectivas”, 53 Congreso Internacional de Americanistas. 27, pp.

Boufekane, A., Saighi, O., (2013) Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria), African Journal of Environmental Science and Technology, vol 7 (10), 949-960 pp. 12.

Brown M.T., Martínez A., Uche J. (2010) Emergency analysis applied to the estimation of the recovery of costs for water services under the European Water Framework Directive, ELSEVIER Journal, U.S.A., 10 pp.

Camacho, Y. (2007) Estudio del equilibrio de extracción líquido-líquido para la separación de ácido acrílico producido a partir de la biomasa, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 91 pp.

Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C. (2002) El Manejo del Agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: La Forma Difícil de Aprender, México, 12 pp.

Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C., Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., Presencia Ciudadana Mexicana A.C. (2006) El agua en México: lo que todas y todos debemos saber, México, 96 pp.

BIBLIOGRAFIA

Comisión del Agua del Estado de México CAEM (2010) Cuenta pública del gobierno y organismos auxiliares, México, 788 pp.

Comisión Estatal del Agua (2012) Mejores comités, mejores comunidades: Manual de Medición y Tarifas Eléctricas, Guanajuato, México, 38 pp.

CONAGUA (1994) Operación de Equipo Electromecánico en Plantas de Bombeo para Agua Potable y Residual, México, 92 pp.

CONAGUA (2002) ATLAS URBANO DE LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL RÍO LERMA, TOMO VII, Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, 108, pp., 13-30

CONAGUA, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana Unidad de Agua Potable y Saneamiento (2003) Términos de referencia electromecánicos, México, 8 pp.

CONAGUA (2007) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos Básicos, México, 85 pp.

CONAGUA, Subdirección General del Agua Potable Drenaje y Saneamiento (2009) Ahorro y uso eficiente de energía eléctrica, México, 18 pp.

CONAGUA, Subdirección General del Agua Potable Drenaje y Saneamiento (2009) Eficiencia en sistemas de bombeo, México, 15 pp.

CONAGUA, Banco Mundial, ANEAS (2013) ¿Un camino verde para mañana?, México, 92 pp.

CONAGUA, SEMARNAT (2014) Estadísticas del agua en México, edición 2014, México, 242 pp.

CONAGUA (2015) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco (1502), Estado de México, Gerencia de Aguas subterráneas, 15, pp.

CONAGUA, SEMARNAT (2015) Estadísticas del Agua en México, edición 2015, México, 298 pp.

BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional Forestal (2014) Diagnóstico del Programa Presupuestario U036 PRONAFOR- Desarrollo Forestal 2014, México, 36 pp.

Custodio, E., Llamas, M. R. (2001) Hidrología subterránea, Ed. Omega, ed. 2da., Barcelona, 1154, pp., 464-479.

Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Agricultura y Recurso Hidráulicos (1992), Reglamento para el uso, explotación y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Santo Domingo, Municipio de Comondú, en el Estado de Baja California Sur, y que establece la reserva de agua potable respectiva, México, 5 pp.

Diario Oficial de la Federación (1996) Norma Oficial Mexicana, eficiencia energética de bombas sumergibles límites y método de prueba, México, 13 pp.

Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010) Reglas de Operación para los Programas de Infraestructura Hidroagrícola y de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2011, México, 51 pp.

Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011) Reglas de Operación para los Programas de Infraestructura Hidroagrícola y de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2012, México, 60 pp.

Diario Oficial de la Federación (2012) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, México, 114 pp.

Diario Oficial de la Federación (2012) Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018, México, 90 pp.

Diario Oficial de la Federación (2013) Reglas de Operación del Programa Nacional Forestal 2013, México, 93 pp.

Diario Oficial de la Federación (2016) Acuerdo por el que se dan a conocer los formatos de los trámites a cargo del sector ambiental en las materias que se indican, México, 111 pp.

BIBLIOGRAFIA

Delacámara, G. (2008) Guía para decisores: Análisis económico de la externalidades ambientales, Metodología básica, Naciones Unidas, Santiago de Chile, 82, pp., 19-22

Díaz-Delgado, C. Fonseca, C.R., Esteller, M.V., Guera-Cobián, V.H., Fall, C. (2014) The establishment of integrated water resources management based on emergy accounting, Ecological Engineering, 63, pp. 72-87.

Domínguez-Acevedo A., Oropeza-Mota J.L., Palacios-Vélez E., Garfias-Solis J., (2003) Estudio de respuesta hidrodinámica simulada en el acuífero del Valle de Acambay, Revista Agrociencia, México, 247-258, 12 pp.

Eastman, R. (2012) Idrisi Selva, guía para SIG y procesamiento de imágenes.

Encina-Domínguez, J, Encina-Domínguez, F J, Mata-Rocha, E, Valdés-Reyna, J (2008) Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México, 12, pp., 13-24

Eker, I., Kara, T. (2002) Operation and control of a water supply system, ISA Transactions, 461-473, 13 pp.

Encina-Domínguez, J.A., Encina-Domínguez, F.J., Mata-Rocha, E., Valdés-Reyna, J. (2008) Aspectos estructurales, composición florística y caracterización, ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México, 12 pp.

Escolero-Fuentes, O.A., Martínez, S.E., Kralish, S., Perevochtchikova, M. (2009) Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la ciudad de México en el contexto de cambio climático, Informe final, Centro virtual de cambio climático, Ciudad de México, 169 p.

Espinosa M., Cárdenas, C., (2009) Diseño e instalación de un sistema de riego por aspersión para 50 ha. de Cultivo de Palma Aceitera (*Elaeis guinnensis*) en la Provincia del Guayas, 8 pp.

BIBLIOGRAFIA

Esquivel M. J. M. (2011) Uso de los SIG para el rediseño de las redes existentes de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea: Acuífero del Valle de Toluca, México, 124 pp.

Expósito C. J.L. (2012) Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad de agua subterránea, México, 220 pp.

FAO (2013) Captación y almacenamiento de agua de lluvia opciones y técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, Santiago, Chile, 272 pp.

Flores, L, Alcalá, J, (2010) Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de Física de Suelos, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, 56 pp.

Fonseca, C.R., Esteller, M.V., Díaz-Delgado, C. (2013) Territorial approach to increased energy consumption of water extraction from depletion of a highlands Mexican aquifer, *Journal of Environmental Management*, 128, pp. 920-930.

Fonseca, C.R. (2010) Propuesta metodológica para la gestión del agua en contexto urbano con enfoque termodinámico, México, 192 pp.

Fonseca, C.R., Díaz- Delgado C., Hernández M., Esteller, M.V. (2013) Demanda hídrica urbana en México: modelado especial con base en sistemas de información geográfica, *INTERDENCIA*, vol. 38, Número 1, 9 pp.

Fonseca, C.R. (2014) Sistema de modelos termohidrológicos de evaluación de eficiencia y optimización en asignación de recursos hídricos, México, 270 pp.

Fonseca, C.R., Díaz-Delgado, C., Esteller, M.V., García Pulido, D. (2016) Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: Case study of the Lerma river, México, *ELSEVIER Journal*, México, 436-453, 18 pp.

BIBLIOGRAFIA

Foster, S, Tuinhof, A, Garduño, H, Kemper, K, (2002) Explotación del Recurso de agua subterránea en acuíferos menores, Banco Mundial, programa asociado de la GPW, 8 pp.

Frausto J., Landa R. (2011) Avances y perspectivas de la política de pago por servicios ambientales en México, Seminario Internacional sobre Evaluación Políticas Públicas Forestales, México D.F., 7 pp.

Garfias S.J., Biblano C. L., Llanos A.H. (2008) Uso racional sostenible de los recursos hídricos de acuífero Valle de Toluca, Revista Ciencia Ergo Sum, vol. 15, número 1, México, 61-72, 13 pp.

González A.Z.I., Lessmann D. (2009) Proceedings of the workshop "Pollution Monitoring in the Upper Course of the Lerma Rivera and Application of Clean Technologies in Water Treatment, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, 94 pp.

González A. Z. I., Ávila-Pérez P., Tejeda-Vega S., Zarazúa-Ortega G., Longoria-Gándara L.C., (2006) Estudio del Curso Alto del Río Lerma desde una Perspectiva Sustentable, México, 10 pp.

Gutiérrez L.M.A. (2008) Cálculos hidráulicos, 69 pp.

Hinojosa P. A. (2006) Diseño de una red estratégica de monitoreo para el recurso alto del Río Lerma y su utilización en el estudio espacial y temporal de los parámetros físico-químicos, México, 141 pp.

IFOMEGEM, (2013), Atlas Geológico Ambiental del Estado de México, EDOMEX

INEGI (2015) Encuesta intercensal.

Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (2015) Atlas de Riesgo ante el Cambio Climático en el Estado de México, EDOMEX

BIBLIOGRAFIA

Instituto Nacional de Ecología (2003) Diagnóstico bio-físico y socio-económico de la Cuenca Lerma-Chapala, México, 285 pp.

International Union of Soil Sciences, World Soil Information, FAO (2007), Base Referencial Mundial del Recurso Suelo: Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional, no. 103, Roma, 130, pp.,

Isch, E., Gentes, I. (2006) Agua y servicios ambientales, visiones críticas desde los Andes, La valorización del agua y los servicios ambientales: una lectura crítica de los modelos conceptuales vigentes, Bustamante, R, Durán, A, Universidad de Wageningen, CAMAREN, Quito, Ecuador, 254, pp., 27-63

Jiménez, B, Torregrosa, M, Aboites, L, (2010) El agua en México cauces y encauces, Para dar de beber a las ciudades mexicanas: el reto de la gestión eficiente del agua ante el crecimiento urbano, Pineda, N, Salazar, A, Buenfil, M, Academia Mexicana de Ciencias, México, 702, pp. 117-141

Kido-Cruz, M.T., Kido, A., (2007) Análisis comparativo de costos para el manejo y uso del suelo en la cuenca alta del Río Calcuta en Oaxaca, México., Agrociencia, México, 355-362 pp. 8

Korenfeld D., Hernández O.J. (2011) Proyecto de planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero, Revista digital Universitaria, Vol. 12, Número 2, México, 15 pp.

Latin American and Caribbean Network of Environmental Funds (2010), Fondos Ambientales y Pagos por Servicios Ambientales, Introducción a los Pagos por servicios ambientales (PSA), RecLAC, Río de Janeiro 109, pp. 5-26

López-Morales C.A. (2012) Valoración de servicios hidrológicos por costo de reemplazo: Análisis de escenarios para el Bosque de Agua, México, 55 pp.

Mayrand, K., Paquín M. (2004) Pago por servicios Ambientales: Estudio y evaluación vigentes, Definición del concepto de PSA, Unisféra International Centre, Montreal, 65, pp. 2-33.

BIBLIOGRAFIA

Monroy H., O., Gómez R., E., Sánchez D., L.F., Breña, A., Pulido, M., Moctezuma, P., Raufflet, E., De la Torre, A., Segín, N., Maldonado, J., Aguilar C., R., Moncada H., A., López R., R., Miranda P., G., Garay, J.M., Méndez L., G., Espinoza H., C., Burns, E., (2009) Repensar la cuenca La Gestión de ciclos del agua en el Valle de México, México, 141 pp.

Morales-Hernández, J.L., Hernández-Martínez, J., Rebollar-Rebollar, S., Guzmán-Soria, E., (2011) Costos de producción y competitividad del cultivo de la papa en el Estado de México, *Agronomía Mesoamericana*, vol. 22, No. 2, Costa Rica, 339-349 pp. 12-

Muñoz, C, García, H, Rivero, E, Ángeles, G, Nieto, S, Rivera, J, (2009) Explotación racional de los acuíferos y conservación de humedales, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México, 2, pp.

Palacios, O, Palacios, E, Peña, S, Gutiérrez, N (2002) Escenario para el aprovechamiento sustentable del acuífero del Valle de Querétaro, *Revista de Agrociencia*, enero-febrero 2002, vol. 36, número 001, Colegio de Postgrados, Texcoco, México, 1-10 pp.

Palma, A, Mendoza, A, Cruickshank, C, González, F, Salas, M, Val, R, (2014) Inventario de la recarga artificial en México, XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, México, 6, pp.

Perevochtchikova, M., Ochoa, A. M. (2011) Avances y limitantes del programa pago por servicios ambientales hidrológicos en México, 2003-2009, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT, México, 24, pp, 2-7

Ponce, G, (1992) Explotación y gestión de aguas subterráneas en las comarcas del interior alicantino, *Revista de Estudios Agro-sociales*, Núm 159, Alicante, 24, pp., 5-7

Pulido Bosch A. (2000) La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización, *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 111-5, 3-18, 15 pp.

BIBLIOGRAFIA

Ojeda, C. A. (2013) Análisis socio-espacial del consumo de agua doméstica en Hermosillo, Sonora. Determinantes para el Diseño de una Política Pública, Nuevo León, México, 281 pp.

Ordorica, M.G (2006) Termodinámica, 50 pp.

Ospina N. J.E., Gay G.C., Conde Cecilia, Martínez M.A. (2010) La Ciudad de México ante el Cambio Climático: Estudios realizados en el Centro Virtual de Cambio Climático en la Ciudad de México, México, 130 pp.

Quintero, M. (2010) Servicios ambientales hidrológicos en la Región Andina, Estado del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes, Garzón, A, Una visión integral del estado del arte de los servicios hidrológicos en los Andes, Quintero, M, IEP, CONDESAN, Perú, 277, pp., 19-25, 91-193

Ramírez, A. M. (2015) Sobreexplotación del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco, Estado de México, Análisis espacio-temporal (1970-2010), México, 91 pp.

Reid, W. V., Mooney, H. A., (2004) Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 43, pp 6-11

Rodríguez, J.A. (2012) Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería, 723 pp.

SAGARPA (2012) México: el sector agropecuario ante el desafío del cambio climático, México, 439 pp.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas (2002) Atlas Ecológico de la cuenca hidrográfica del Río Lerma, Tomo VII, Ed. Comité Editorial del Gobierno del Estado de México, México, 108, pp.,

SEMARNAT (2003) Introducción a los servicios ambientales, SEMARNAT, México 73.

SEMARNAT (2007) Servicios Ambientales y PROÁRBOL, México D.F., 22 pp.

BIBLIOGRAFIA

SEMARNAT (2010) Riego por aspersión y Localizado, México, 69 pp.

SEMARNAT (2012) Programa de agua potable, alcantarillado y saneamiento en zonas urbanas, México, 64 pp.

SEMARNAT (2012) Pago por Servicios Ambientales, Taller Regional “Mejores Prácticas en el diseño e implementación de incentivos económicos para la conservación”, México, 31 pp.

SEMARNAT (2015) Programa de agua potable, alcantarillado y saneamiento en zonas urbanas, México, 26 pp.

Sotelo, G, (1997) Hidráulica general, LIMUSA, México, 286.

Tipacti, M.A., Ribeiro, A., Ordóñez, C., Capacle, V. (2010) Pago de servicios ambientales hidrológicos una estrategia para la gestión sustentable de los servicios ecosistémicos y desarrollo humano, Innovation and sustainable development in agriculture and food, Montpellier-France13, pp., 1-3,

Torres Bernardino, L, (2014) Sistema Lerma: Una visión política en la gestión pública del agua, ¿solución Estatal o Federal?, iapem, México, 290, pp.

Tobón W. (2013) Análisis multicriterio, Taller: información sobre biodiversidad para la conservación medioambiental, México, 16 pp.

Tribunal Latinoamericano del Agua (2006) Caso: Traspase de agua en la región del sistema Cutzamala a la cuenca del Valle de México. República Mexicana, México, 6 pp.

Universidad Autónoma del Estado de México (2015), Jocotitlán, una Ciudad Heroica, Secretaría de Rectoría, Dirección de Identidad Universitaria, Colegio de cronistas, Estado de México, México, 17, pp., 13.

Usaquén M. I. (2008) Externalidades: más que un problema de derechos de propiedad, Revista CIFE, Vol. 13, 19, pp., 3-6

BIBLIOGRAFIA

Vargas, M.C. (2010) Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, Bogotá, 45 pp.

Vargas S., Mollard E. (2005) Los retos del agua en la cuenca Lerma-Chapala: Aportes para su estudio y discusión, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 250 pp.

Vargas-Velázquez, S., (2007) Agua y sociedad en el Alto Lerma: el módulo Tepetitlán, Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 17, pp.

Vélez, M. V. (1999) Hidráulica de aguas subterráneas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 156, pp

Wunder, Sven (2006) Pagos por servicios ambientales, principios básicos esenciales, CINAFOR, Indonesia.

Zimmatic (2001) Conversión de riego por gravedad, 6 pp.