

Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México

Recibido: 17 de marzo de 2012. Aceptado en versión final: 23 de julio de 2012.

Liliana A. Peñuela Arévalo*

J. Joel Carrillo Rivera**

Resumen. Este trabajo busca delimitar las zonas de recarga y descarga de agua subterránea en la porción centro-sur de la Mesa Central. Este objetivo se logró usando la teoría de los sistemas de flujo la cual ha demostrado ser una herramienta sumamente útil debido principalmente a su visión sistémica del ambiente, y por ende, en la integración de diversos elementos de la naturaleza. Existen diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en los que el agua subterránea está involucrada. Procesos que ocurren en el subsuelo debido al movimiento gravitacional del agua ocasionando su manifestación en superficie a través de evidencias naturales contrastantes entre las zonas de recarga y descarga, por lo que el objeto de este trabajo es mostrar la utilidad del análisis de tales indicadores para obtener la localización de áreas prioritarias, así como aportar una aproximación del funcionamiento del agua subterránea. La definición de zonas

de recarga y descarga se basó en el análisis de mapas sobre el tipo de suelo, vegetación, elevación topográfica, dirección del flujo subterráneo, manantiales y presencia de cuerpos naturales de agua. Dicho análisis se basó principalmente en la herramienta de superposición de mapas del paquete computacional ArcMap™. Los resultados señalan como zonas de recarga las sierras Fría, San Miguelito y Santa Bárbara, principalmente. Por su parte, las zonas de descarga naturales (antao presentes) corresponden con la planicie en la Fosa Tectónica de Aguascalientes, así como con algunos sectores planos y relativamente bajos en las cercanías de los Altos de Jalisco, Santa María del Río y Ojuelos.

Palabras clave: Agua subterránea, sistemas de flujo, zonas de recarga y descarga.

Definition of groundwater recharge and discharge zones through surface indicators: Centre-South of the Mesa Central, Mexico

Abstract. The aim of this paper is the delimitation of groundwater recharge and discharge zones in the centre-south portion of the Mesa Central. This was achieved using groundwater flow systems theory, which has proved to be a valuable tool since it considers a systemic perspective of the environment, integrating several natural elements. There are various physical, chemical and biological processes generated

in the subsoil within which groundwater is incorporated. This involvement is caused by the natural gravitational movement of groundwater which is manifested on the surface by contrasting evidences in the recharge and discharge zones. Therefore, the objective of this paper includes the demonstration of the usefulness of the analysis of those indicators to locate priority areas and also provides an approximation

* Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: lilianapenuela@gmail.com

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México. E-mail: joeljcr@igg.unam.mx

of groundwater functioning. The definition of recharge and discharge zones included the analysis of maps describing soil type, vegetation, topographic elevation, groundwater flow-path direction, springs, and presence of natural water bodies. Such analysis was carried out through the overlaying tool of ArcMap™ software. The results suggest that the highlands of Fría, San Miguelito and Santa Bárbara as recharge zones.

INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011) reporta, que hasta el 2009, el 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo provenía de fuentes superficiales y el 37% restante de fuentes subterráneas. Sin embargo, estas cifras no reflejan la dependencia del agua subterránea en diversos territorios cuyas características climáticas y geomorfológicas limitan la presencia de agua pluvial o su escorrentía permanente; o bien, cuando el crecimiento demográfico y económico ha superado la capacidad natural que suministraba el agua superficial antaño asequible. Existen diversos ejemplos en México donde el aprovechamiento del agua subterránea supera al del agua superficial, en especial en áreas localizadas en la porción central-norte y norte del territorio nacional. Aparte del caso notable de la Ciudad de México, destaca la ciudad de San Luis Potosí (SLP), donde un 92% del total del agua utilizada para su abastecimiento proviene de fuentes subterráneas y un 8% es de origen superficial (Contreras y Galindo, 2008); o por ejemplo el estado de Aguascalientes donde un 72% del agua que se consume proviene del subsuelo (Desde la red, 2011).

El agua subterránea es uno de los elementos que mayor impacto negativo ha sufrido desde la última mitad del siglo XIX. Sin embargo, a pesar de la gran dependencia del agua subterránea en el país, y por ser un elemento relativamente oculto, existe poco interés en realizar un análisis sistémico que permita entender la dinámica de su funcionamiento. Aspecto que finalmente permitiría su adecuado aprovechamiento, respetando su relación con el resto de los componentes del ambiente y minimizando así los posibles efectos negativos por su extracción. Actualmente, el enfoque dado al estudio del agua subterránea en el territorio nacional pretende cuantificar volúmenes a través

Natural discharge zones were originally present in the plain of the Aguascalientes tectonic depression, and some flat and topographic low zones in the vicinity of Altos de Jalisco, Santa María del Río and Ojuelos.

Key words: Groundwater, flow systems, recharge and discharge zones.

del balance hídrico, más no entender su respuesta ni relación con diversas componentes del ambiente (Carrillo, 2000; Hergt *et al.*, 2002; Huízar *et al.*, 2004; SEDESOL, 2005; Peñuela, 2007).

A pesar de los efectos ambientales negativos que se han presentado en el país a través de los años, no se han implementado medidas óptimas para restablecer las condiciones naturales originales como tampoco para preservar ecosistemas afectados. Una buena parte de este deterioro pudiera aliviarse si se logra entender el papel que juega el agua subterránea en el ambiente.

La Teoría de los Sistemas de Flujo (TSF) es una técnica que ha demostrado ser sumamente útil para definir el funcionamiento del agua subterránea, mediante el análisis sistémico y evaluación de su interacción con otros componentes del ambiente (Tóth, 2000), incluyendo vegetación, suelo, aspectos geomorfológicos, entre otros. De este modo, los resultados del análisis de diferentes elementos naturales deben mostrar congruencia entre sí.

Existen diversos estudios en México relacionados con el análisis del funcionamiento del flujo subterráneo en los que se aplica la Teoría de Tóth (2000); por ejemplo, para las cuencas superficiales de SLP (Cardona, 1990; Carrillo, 1992, 2000; Carrillo *et al.*, 1996; Cardona, 2007); de Aguascalientes (Molina, 1996), de México (Edmunds *et al.*, 2002; Huízar *et al.*, 2004; Carrillo *et al.*, 2008; Ángeles *et al.*, 2008; Peñuela, 2012). En general, estos trabajos sugieren la presencia de tres sistemas de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional. La descarga artificial (por medio de pozos) de flujos de tipo regional ha sido identificada especialmente por el alto contenido de diversos elementos químicos indicadores de un largo recorrido del agua; elementos que pueden potencialmente afectar la salud humana, como el caso del fluoruro. Es importante señalar que la obtención de este tipo de agua es resultado de un

inadecuado diseño y/u operación de pozos. En este sentido, es factible controlar la presencia de ciertos elementos químicos en el agua extraída con base en la comprensión de su funcionamiento (Carrillo *et al.*, 2002). Sin embargo, se requiere de mayor cantidad de estudios hidrogeológicos que incorporen el entendimiento de los sistemas de flujo para establecer la dinámica del agua subterránea en el área en estudio y la definición de la jerarquía de los diferentes flujos presentes. Adicionalmente, sería deseable incluir en los estudios hidrogeológicos y ambientales, el reconocimiento de evidencias superficiales del agua subterránea para diferenciar zonas de recarga y descarga. En este sentido, en este trabajo se propone una metodología que puede ser de utilidad en la identificación de tales evidencias.

El objetivo de este estudio es aplicar la teoría de los sistemas de flujo correlacionando indicadores superficiales como litología, suelo, elevación del terreno, vegetación, así como presencia de manantiales y lagos, para definir zonas de recarga/descarga de agua subterránea en el área en estudio. Cabe resaltar que este análisis está asociado con flujos de carácter regional debido a que su manifestación en superficie se hace más evidente debido a que ha tenido una mayor interacción con las rocas en el subsuelo, en comparación con los flujos local e intermedio.

Esta delimitación de zonas de recarga/descarga se considera de gran utilidad ya que permite el apoyo al diseño de planes para la conservación de áreas prioritarias (Peñuela y Carrillo, 2012) como lo es el pago por servicio ambiental hidrológico; igualmente esta delimitación será una primera aproximación dentro del conocimiento de la dinámica general del agua subterránea. La selección de tan extensa área ($> 40\,000\text{ km}^2$) es resultado de la revisión de diversos estudios de carácter hidrogeológico, especialmente de la cuenca de San Luis Potosí (Martínez y Cuellar, 1979 incluido en Cardona, 1990 y Carrillo, 1992; Carrillo *et al.*, 1992; Cardona, 2007; entre otros), en los que se señala la posibilidad de conexión hidráulica subterránea entre cuencas hidrográficas vecinas, a lo largo de las rocas volcánicas fracturadas del Terciario.

Por último, es importante enfatizar que los resultados de este trabajo corresponden con parte de una metodología necesaria para determinar el

comportamiento natural (original o menos perturbado) de la dinámica del agua subterránea. Esto, junto con un análisis de datos químicos e isotópicos del agua, de las propiedades hidráulicas del material litológico, y de la configuración geológica del subsuelo y flujos de agua, permite obtener mayor acercamiento al funcionamiento del sistema. Finalmente, tal comprensión se considera conveniente sea usada como referente de cualquier proyecto ambiental e hidrológico a realizar, así como para tener un apoyo óptimo en la toma de decisiones en materia ambiental.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

El desarrollo de este estudio se concentra en la porción centro-sur de la provincia fisiográfica Mesa Central (MC), abarcando una superficie de un poco más de $40\,000\text{ km}^2$. El área incorpora parte de los estados de Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes (Figura 1). Los límites geográficos del área son al noroeste la Sierra Fría, al noreste la Sierra Las Paradas, al sur la Sierra de Guanajuato y el Cerro La Giganta.

La MC se caracteriza por amplias planicies interrumpidas por sierras dispersas, en su mayoría de naturaleza volcánica (INEGI, 1991); en ésta predomina un clima semiárido templado con temperatura media anual entre 12 y 18°C , el mes más frío (enero) con -3 a 18°C y el más caliente (junio) $<22^\circ\text{C}$ (García, 1998). El relieve en el área en estudio permite la presencia de sub-climas, tales como el templado sub-húmedo al sur del área en estudio (Cerro La Giganta, Guanajuato); árido templado en la planicie que contiene la ciudad de San Luis Potosí y al noroeste del área, entre otros sub-climas.

Referente geológico

El área en estudio consiste, en general, en un conjunto de fosas tectónicas (fosas de Aguascalientes, Villa de Reyes, Villa Arista, entre otras) que manifiestan un par de conceptos de importancia hidrogeológica: *i)* las fosas son resultado de fenómenos tectónicos que ocasionaron la presencia de fallas y fracturas de tensión, y *ii)* las fosas permitieron el

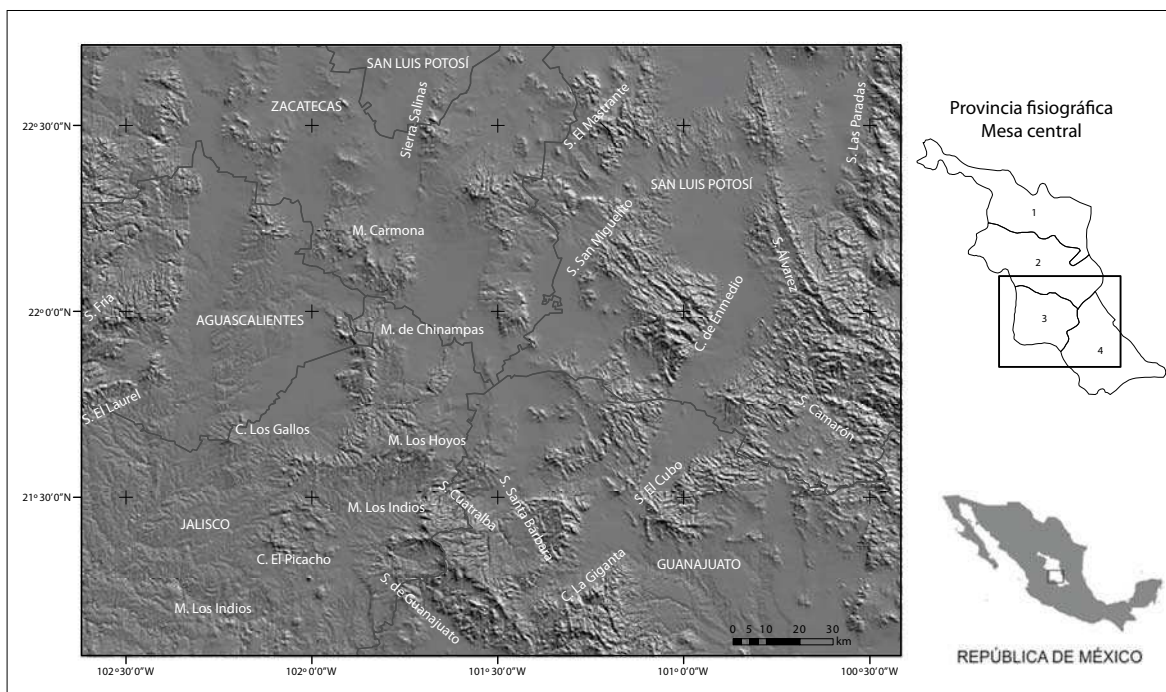


Figura 1. Localización del área en estudio y modelo de elevación con división estatal.

depósito de hasta 600 m de material granular como es el caso de la cuenca de San Luis Potosí (Cardona, 2007). Anderson *et al.* (1988) señalan que el espesor típico del material granular en las Cuenas Centrales Aluviales es de 2 000 a 3 000 m aunque en algunas cuencas puede ser menor a 300 m. En general, se presentan rocas sedimentarias del Mesozoico y volcánicas del Terciario, aflorando las primeras preferentemente al este y las segundas al oeste.

Las rocas más antiguas del área en estudio corresponden con una secuencia de esquistos y filitas del Triásico Superior. El Jurásico Superior incluye basalto, diorita, tonalita, ultramáfica, lutita, caliza arcillosa y arenisca. El Cretácico incorpora sedimentación marina con caliza y evaporita pasando a caliza arcillosa, lutita calcárea y culminando en roca clástica. Las unidades geológicas se encuentran afectadas por apófisis de un intrusivo post-Cretácico de composición granítica que aflora hacia la localidad de Salinas, así como al este y noreste de San Luis Potosí, el cual constituye el límite físico del sistema hidrogeológico hacia el este de la región de San Luis Potosí (Carrillo, 1992).

El Terciario representa una fuerte actividad volcánica que afectó gran parte del área, representada por riolita, dacita, latita, ignimbrita, andesita y piroclastos que cubren una extensión regional y alcanzan espesores promedio de 1 700 m (Vázquez *et al.*, 1990; citado en Carrillo *et al.*, 1996). La disposición regional en estas rocas y la presencia de fallas y fracturas permiten proponer una continuidad hidráulica efectiva entre ellas. Un referente geológico detallado puede cotejarse en el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1997a, b y 1998a, b), y en Nieto *et al.* (2005).

Referente hidrogeológico

Configuración hidrogeológica

Desde la perspectiva del agua subterránea, la configuración hidrogeológica general existente en el área en estudio sugiere la presencia de dos unidades acuíferas, tal como se describe en la cuenca superficial de San Luis Potosí (Carrillo, 1992; Carrillo *et al.*, 1996; Cardona, 2007) donde localmente se tienen dos unidades acuíferas separadas por una capa de arenisca compacta de muy baja conductividad

hidráulica. La unidad somera es acuífera de tipo libre, el material aluvial tiene una carga hidráulica entre 1 815 y 1 880 m (Cardona, 2007). Según Carrillo (1992), el material de la unidad acuífera somera presenta un espesor relativamente estable que alcanza los 90 m. La unidad acuífera profunda muestra confinamiento hacia el centro de la planicie de la cuenca y es libre fuera de ella; corresponde con material granular y un medio fracturado (rocas volcánicas del Terciario) de doble porosidad, el espesor promedio en la cuenca de San Luis Potosí es de 1 700 m, con carga hidráulica entre 1 715 y 1 760 m snm (Cardona, 2007).

Agua subterránea

El análisis hidroquímico, isotópico e hidráulico realizado en los trabajos mencionados en la introducción de este trabajo concluyen que la zona de recarga del agua de los flujos regionales que se extrae en San Luis Potosí y Aguascalientes se encuentra fuera del límite superficial de las cuencas hidrográficas asociadas. Asimismo, el análisis hidrogeológico regional de Peñuela (2012) sugiere que la recarga de flujos regionales de la porción oeste del área en estudio se genera posiblemente desde dos zonas principales: la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Transmexicano, en especial para el territorio asociado con la localidad de Villa de Reyes; validando así la posibilidad de una conexión hidráulica subterránea entre cuencas hidrográficas vecinas como lo han señalado estudios previos arriba citados.

Tipo de suelo

En el mapa edafológico a escala nacional del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias junto con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (INIFAP y CONABIO, 2005) se identifican para el área en estudio 22 subgrupos de suelo, éstos son: Xerosol haplico, lúvico, gypsico y cálcico; Feozem haplico, lúvico y calcárico; Planosol eútrico y mólico; Regosol calcárico y eútrico; Cambisol eútrico y húmico; Castañozem haplico, cálcico y lúvico; Luvisol cromico y ortico; Fluvisol eútrico; Vertisol pelico; Rendzina; y finalmente el Leptosol. De éstos, el Xerosol es el grupo predominante en

el área en estudio. Las características de cada uno de ellos pueden consultarse en la publicación del INEGI (2004).

Vegetación

De acuerdo con el mapa de uso del suelo y vegetación de la CONABIO (1999), el paisaje se encuentra ampliamente modificado debido a las actividades agrícola, pecuaria y forestal, afectando un 42% de la superficie del área. No obstante, para la superficie restante, la vegetación que predomina es el pastizal natural, seguido por matorral, del cual se presentan cuatro subgrupos; éstos son en orden de abundancia: *a)* matorral sarcocrasicaule; *b)* matorral desértico micrófilo; *c)* matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical, y *d)* matorral rosetófilo. Asimismo, se presenta en menor porcentaje bosque de encino y pino, vegetación tipo Chaparral, Mezquital-Huizachal, bosque de coníferas distintas a *Pinus sp.*, y vegetación halófila y gipsófila.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo se basó principalmente en la TSF (Tóth, 2000) debido esencialmente a su visualización sistémica del ambiente. Asimismo, se empleó una superposición de polígonos para definir territorios específicos, en este caso, zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Esto se logró con base en el análisis de indicadores superficiales, los cuales manifiestan determinadas condiciones y procesos dentro de la dinámica propia de la naturaleza. A continuación se describen las bases metodológicas empleadas.

Teoría de los sistemas de flujo

De acuerdo con Tóth (2000), los parámetros que rigen el funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional son: *clima, topografía y referente geológico*, los cuales permiten la formación de tres sistemas generales de flujo: local, intermedio y regional, en los que el tiempo de residencia del agua subterránea es de menor a mayor, respectivamente (Figura 2). Estos flujos presentan cada uno su zona de recarga, tránsito y descarga particular. Comparando la respuesta físico-química de un

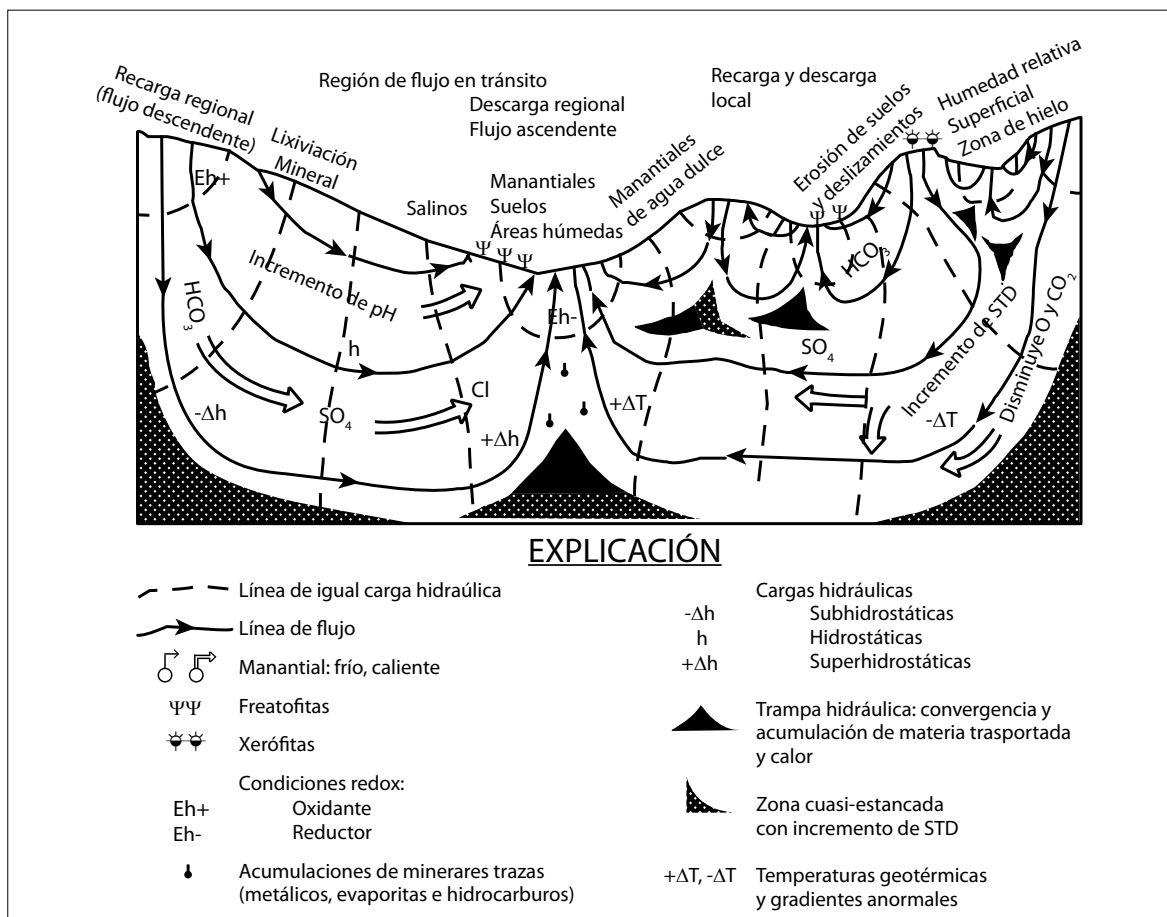


Figura 2. Sistemas de flujo en una cuenca regional (Fuente: Tóth, 2000).

flujo local con uno regional, el último presenta mayor profundidad y distancia de recorrido lo que le permite tener mayor interacción agua-roca; por tal razón, el agua en su zona de descarga presenta mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor salinidad y pH más alcalino. Generalmente, la descarga de este tipo de sistema de flujo se manifiesta en una cuenca hidrográfica diferente a aquélla donde se originó la recarga.

La importancia y utilidad de la TSF radica en el concepto de ambiente representado como sistema, es decir, se hace evidente la relación entre parámetros (suelo, vegetación, relieve, litología, propiedades hidráulicas, química del agua, carga hidráulica, posición de roca basamento, etc.) al ser analizados ya que todos están asociados con el funcionamiento del flujo de agua subterránea. Así,

el resultado de la interpretación de cualquiera de estos parámetros debe mostrar congruencia con el resto de ellos, dando así mayor confiabilidad a las conclusiones finales a las que se llegue a través de la aplicación de esta teoría. Esto es de particular importancia, dado que la lenta velocidad de movimiento del agua subterránea (de cm a^{-1} a m a^{-1}) evita observar cambios en el ambiente (o en el agua misma) a simple vista por cualquier efecto producido. Así, una buena, o una decisión incorrecta en el manejo del ambiente, será notoria hasta varias decenas de años después.

Características de las zonas de recarga y descarga

El funcionamiento sistémico de la naturaleza genera una dependencia o relación entre los diversos

componentes del ambiente, donde los elementos presentes en superficie son resultado de diferentes procesos que se originan en el subsuelo, procesos que contempla la TSF (*Ibid.*). El análisis de las características descritas en esta sección es la base de este estudio.

Zonas de descarga

Una zona de descarga es la evidencia más viable de identificar el funcionamiento del agua subterránea, es el sitio donde el agua aflora (superficie) y representa la fase final de recorrido del flujo subterráneo; así, el agua ha adquirido propiedades particulares (salinidad, temperatura, pH, OD, entre otros) teniéndose una continuidad específica de caudal en el tiempo que condiciona la presencia de determinado suelo y de una vegetación acorde con las variables del caso.

Una zona de descarga puede estar representada por un manantial, lago, suelo salino, vegetación controlada por la salinidad del agua-suelo, y/o un nivel de agua subterránea somero. Entre mayor ha sido el recorrido (tiempo de residencia) del agua subterránea en el subsuelo, se han originado diversos procesos, entre ellos el intercambio físico-químico agua-roca, que otorgan al agua propiedades fisicoquímicas peculiares que dependen del tipo de roca, profundidad y distancia de recorrido, principalmente. Así, un suelo asociado con una zona de descarga tiende a ser más salino y alcalino (posiblemente sódico), tornándose en general bien desarrollado, con alto contenido de materia orgánica (MO) y pudiendo llegar a tener rasgos hidromórficos (moteado y concreciones de Fe y Mn; colores gley). Por esto, la vegetación asociada con zonas de descarga (regional) sobrevive en regiones permanentemente inundadas (vegetación freatofita) y/o es tolerante a alta salinidad (vegetación halófila) y/o yeso (vegetación gipsófila). La descarga de agua subterránea ocurre a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga.

Zonas de recarga

La identificación de estas zonas es más complicada debido a que el agua se infiltra y no se tiene evidencia superficial como en las de descarga, a menos que se cuente con presupuesto suficiente para perforar y

tomar muestras de suelo y subsuelo en condiciones específicas. No obstante, un primer indicador está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua de lluvia; un segundo es que tal roca se localice en una elevación topográficamente alta. En la zona de recarga el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica, baja concentración de sodio y/o sales. La vegetación es xerófila, esto es, adaptada a un ambiente relativamente seco, con raíz larga para alcanzar captar el agua infiltrada en su camino al nivel freático.

Análisis espacial

La interpretación de elementos físicos realizada en este estudio se logró mediante el uso del programa ArcMap 9.3 (ESRI, 2008), el cual permite el manejo y análisis de gran cantidad de información espacial, así como la superposición de diversas capas y polígonos para obtener territorios de interés. La cartografía temática utilizada, fue a escala 1:250 000 principalmente, obteniéndose indicadores superficiales de diferentes fuentes tales como: CONABIO (1999), INIFAP y CONABIO (2005), SGM (1997a y b; 1998a y b), INEGI (2000), entre otros. La información cartográfica se usó bajo el sistema de coordenadas geográficas con *datum* WGS84.

RESULTADOS

El análisis de indicadores superficiales bajo la TSF permite obtener una adecuada aproximación del funcionamiento sistémico del ambiente y suministra información de importancia para cada rama de las ciencias naturales. Por ejemplo, para el caso de la Hidrogeología permite ubicar zonas de recarga y descarga de agua subterránea debido a que la presencia de cierto tipo de suelo, vegetación, topografía y manifestaciones del afloramiento/ausencia de agua, son respuesta de los sistemas de flujo (Tóth, 2000). Así, el análisis realizado consideró indicadores asociados con flujos de tipo regional ya que éstos manifiestan mayor contraste con respecto a flujos locales, incluso respecto a los de tipo intermedio. La descripción de las zonas de

descarga incorpora a aquéllas que se tenían previas al desarrollo económico a que ha estado sujeta el área en estudio, ya que muchas de ellas han sido transformadas.

Tipo de suelo

Para un análisis de la relación suelo-zona de recarga/descarga, se consideraron subgrupos de suelo, ya que los horizontes en éstos son indicadores de características que permiten una mayor aproximación del comportamiento hidrológico del suelo. A continuación se hace un breve referente descriptivo de horizontes; para mayor información consultar la guía cartográfica edafológica del INEGI (2004).

- *Cálcico*: suelo con una capa rica en cal (polvo blanco o caliche), sugiriendo zona de descarga.
- *Calcárico*: suelo rico en cal y nutrientes para la vegetación, sugiriendo zona de recarga.
- *Crómico*: suelo con fertilidad y nutrientes moderados para la vegetación, sugiriendo zona de recarga.
- *Gypsico*: suelo con una capa de yeso acumulado (cristales), sugiriendo zona de descarga.

- *Húmico*: suelo con una capa superficial ácida, pobre en nutrientes, sugiriendo zona de recarga.
- *Mólico*: suelo con una capa superficial fértil, rica en MO, sugiriendo zona de descarga.

Cabe señalar la necesidad de investigar detalladamente las propiedades de los suelos teniendo en cuenta que algunos horizontes carecen de representatividad. Ejemplos de esto son los horizontes *Háplico* y *Órtico*. Sin embargo, se buscó establecer una asociación suelo-zona de recarga o descarga obteniéndose que los suelos ligados con zonas de descarga son: *Xerosol cálcico y gypsico*, *Fluvisol eútrico*, *Castañozem cálcico*, *Planosol eútrico y mólico*. Los grupos de suelo asociados con zonas de recarga son: *Leptosol*, *Regosol calcárico y eútrico*, *Cambisol eútrico y húmico*, *Luvisol crómico y órtico*; y posiblemente el subgrupo *Feozem háplico* (Figura 3).

Vegetación

La vegetación original, al igual que el suelo, se considera indicadora de zona de recarga o descarga. El análisis realizado se basa en información de la página web de la Comisión Nacional Forestal

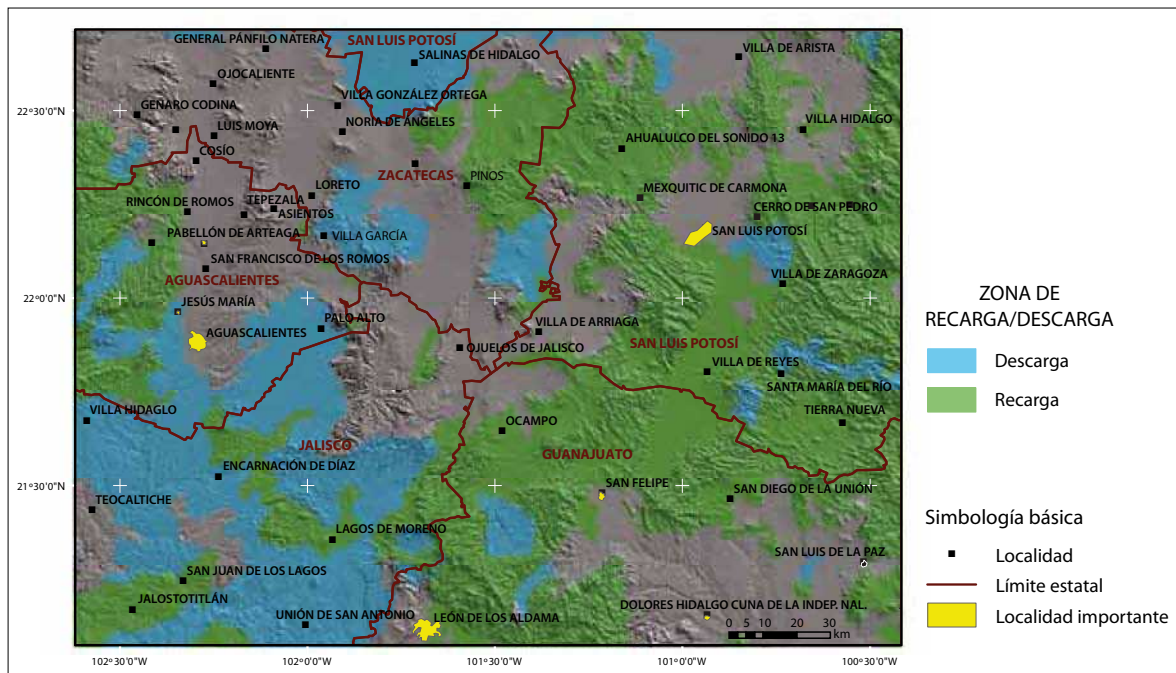


Figura 3. Definición de zonas de recarga y descarga a partir de tipo de suelo.

(CONAFOR, 2009), exceptuando el bosque de coníferas. A continuación se muestra la relación que se propone en este trabajo entre el tipo de vegetación existente en el área en estudio y su relación con zonas de recarga o descarga basada en las características del sitio en que habita. Los resultados se exhiben en la Figura 4.

- Pastizal natural; es una comunidad dominada por gramíneas, se localiza en el área de transición entre matorral xerófilo y la zona de bosque; reverdece en época húmeda sugiriendo una relación con el agua de lluvia, por lo que se considera está asociada con zona de recarga. Sin embargo, dada su gran distribución de altitud se determinó su asociación con zonas de recarga para aquellas regiones cuya elevación topográfica fuera igual o mayor a los 2 300 msnm.
- Bosque de pino; esta comunidad está formada por árboles del género *Pinus sp.*, el cual se ha relacionado preliminarmente con zonas de recarga en los fundamentos de los servicios ambientales hidrológicos de México (Peñuela, 2007) así como el oyamel.
- Bosque de encino, está constituido por diferentes especies de encino (roble) del género *Quercus*. Usualmente se presenta en la transición entre bosques de coníferas y selva, presenta relación importante con el bosque de pino, lo que hace suponer se asocia con zona de recarga.
- Chaparral, son arbustos que en ocasiones se mezclan con bosque de pino y encino; se desarrolla en suelo somero, poco fértil, sugiriendo una posible relación con zonas de recarga.
- Mezquital-Huizachal, el mezquite (*Prosopis spp.*), árbol espinoso que frecuentemente se encuentra en suelo profundo, aluvión cercano a un río y mezclado con otros individuos como el huizache (*Acacia spp.*), por lo que se le asocia con zona de descarga.
- Bosque de coníferas (*no pinus*), es una comunidad compuesta por bosque de oyamel (*Abies*), pinabete (*Pseudotsuga*), enebro (*Juniperus*), cedro (*Cupressus*), que generalmente se encuentran en regiones templadas y frías en la parte alta de cordilleras (Challenger y Soberón, 2008). Sus características ambientales lo relacionan con zonas de recarga.

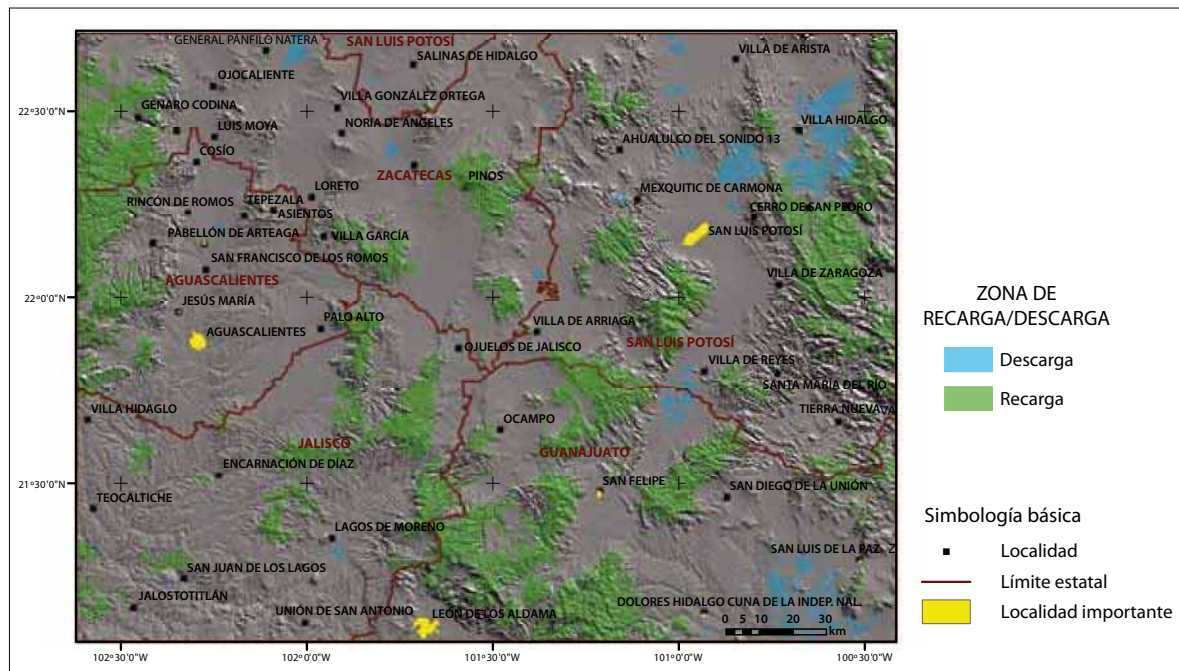


Figura 4. Definición de zonas de recarga y descarga a partir de la vegetación.

Elevación topográfica

En el área en estudio, la mayor elevación topográfica se encuentra al oeste, en Sierra Fría, hacia los límites de los estados de Aguascalientes y Zacatecas. Teniendo en cuenta la posibilidad de conexión hidráulica subterránea entre diversas cuencas hidrográficas en el área en estudio, es factible que en ésta se genere recarga de flujos regionales así como desde otras elevaciones prominentes del país como por ejemplo la Sierra Madre Occidental, el Nevado de Toluca, así como el Popocatepetl e Iztaccíhuatl (Peñuela, 2012; Peñuela y Carrillo, 2012).

Molina (1996) estableció la zona de descarga, para el territorio del estado de Aguascalientes, a una elevación igual o menor a los 2 000 msnm. Así, en éste se considera viable establecer la curva de 2 300 m como el inicio de la zona de recarga para diferentes sistemas de flujo debido a que es la elevación topográfica aproximada donde se aprecia un cambio de pendiente entre las unidades geomorfológicas de lomerío y piedemonte.

La Figura 5 muestra posibles zonas de recarga y descarga con base en la elevación topográfica,

apreciándose que la zona de descarga original cubriría bastante superficie del área. Esto es factible en especial para la porción oeste de acuerdo con la revisión histórica realizada (véase siguiente apartado); sin embargo, existen dudas para el este del área debido a que se carece de información histórica que valide tal suposición. Los resultados sugieren que la zona de descarga correspondía a sitios cuyo nivel freático era somero, con presencia de ríos perennes, vegetación de galería, manantiales y cuerpos de agua.

Presencia de manantiales termales y cuerpos de agua perennes

Los estudios arqueológicos y antropológicos realizados evidencian condiciones ambientales diferentes a las actuales, con presencia de ríos perennes, lagos, pantanos, bosques. De acuerdo con Weigand (2002), la zona de los Altos de Jalisco y la Ciénega de Mata (al norte)

integraban una sola zona ecológica generalizada, caracterizada por las montañas bajas y numerosas colinas, cuerpos de agua estancada, bosques

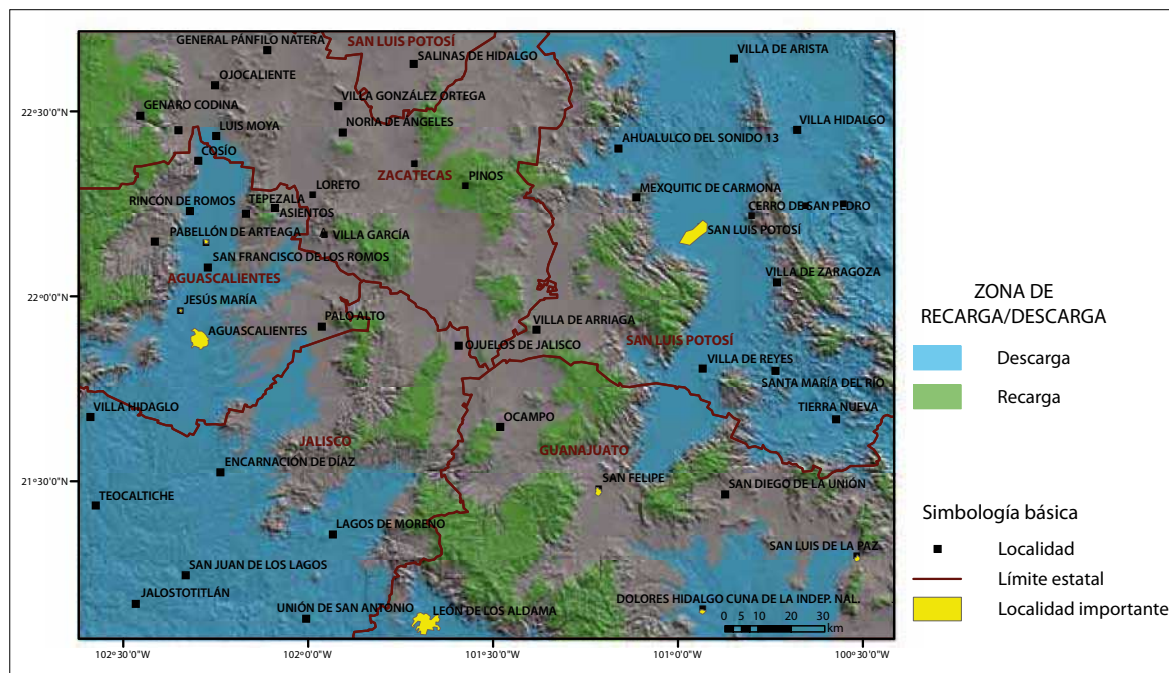


Figura 5. Definición de zonas de recarga y descarga a partir de la elevación topográfica.

abiertos, y bosques de galería densos, tupidos, a lo largo de muchos arroyos y ríos”.

El *Atlas de la República Mexicana* de 1858 reporta que el estado de Aguascalientes debe su nombre a la abundancia de fuentes termales. Diversas fuentes (INEGI, 1993, citado en Molina, 1996; CAPAMA, CNA, 1994; citado en Molina, 1996) mencionan que los manantiales de Ojo Caliente aseguraron la supervivencia de la población por más de 300 años, desde la fundación de la Villa de Aguascalientes en 1575, incluyendo toda la época colonial y el siglo XIX. Adicionalmente, la presencia de vegetación freatofita, química del agua (alto contenido de fluoruro), nivel freático somero y suelo salino, indican zonas de descarga en partes del estado de Aguascalientes (Molina, 1996). Asimismo, la toponimia en el área en estudio sugiere la existencia de zonas de descarga al hacer referencia a un nivel freático somero o presencia de manantiales que estarían asociados con zonas de descarga (flujos intermedio o local), como es el caso de Ojo Caliente, San Juan de los Lagos, Lagos de Moreno, Ojuelos, El Ojo

de Agua, Ciénega de Mata, Guanajuato (lugar de ranas), etcétera.

La Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH, 1976) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), (Prol, 1988) publicaron trabajos ubicando manantiales con una apreciable cantidad de puntos termales, en especial, en el estado de Aguascalientes. Con base en estos dos estudios y la cartografía del INEGI (2000) se ubicaron manantiales termales, ríos y/o corrientes perennes en el mapa de la Figura 6, que incorporan los territorios con manifestación de descarga de agua subterránea hasta hace un ciento de años.

Litología

Un aspecto importante en la búsqueda de zonas de recarga es aquel relacionado con la litología debido a que sus propiedades hidráulicas determinan la facilidad con que el agua se mueve a través de ese medio. Por ejemplo, al precipitarse una lluvia a determinada intensidad en un territorio montañoso pueden resultar dos procesos, los cuales dependen de la conductividad hidráulica (K) del material

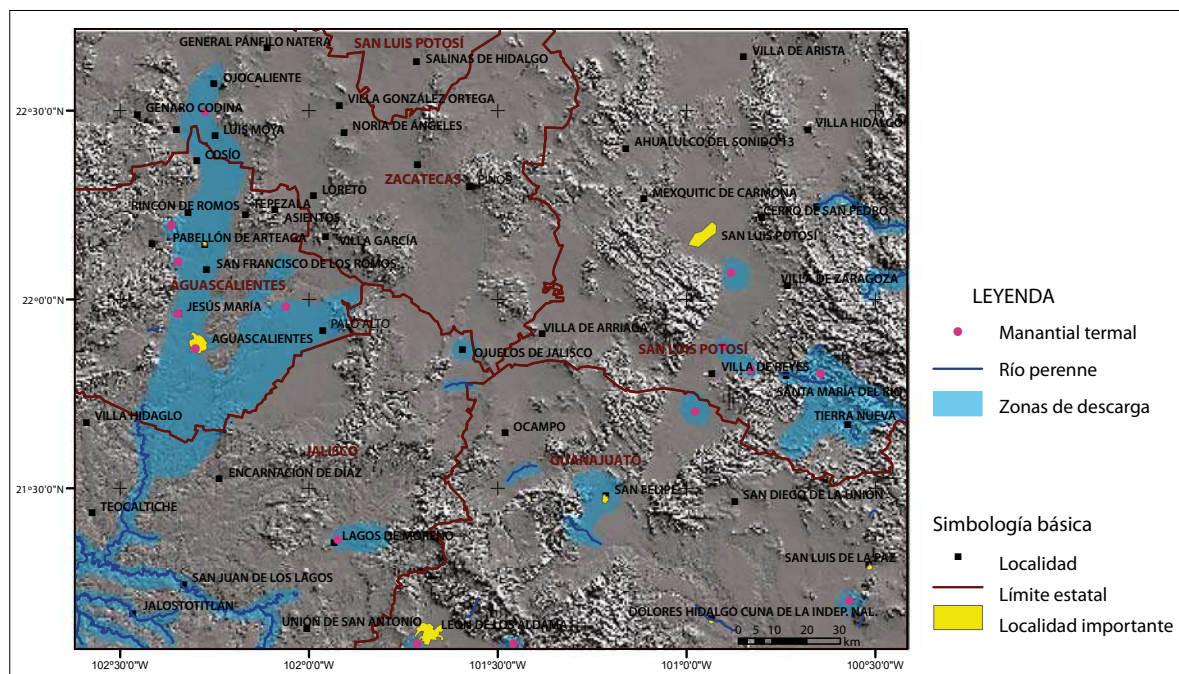


Figura 6. Definición de zonas de descarga con base en información histórica, los manantiales termales son extraídos del mapa de la CFE (Prol, 1988).

litológico, éstos son: *a)* escurrimiento del agua por el terreno, y/o *b)* infiltración.

Durante los trabajos para definir zonas de recarga con base en la litología, se seleccionaron las unidades del área en estudio ubicadas a una elevación igual o mayor a los 2 300 msnm. Posteriormente, a cada litología se le asignó un atributo denominado *propiedad* que hace referencia a un grado comparativo de *K* de la roca. Al igual que Carrillo (1992), en este estudio se clasifican como rocas con muy baja *K* a las rocas calizas Cretácicas del este del área en estudio, los cuerpos ígneos intrusivos (y capas de arcilla). Las ignimbritas y material granular corresponden con rocas con moderada a alta *K* ya que las primeras se encuentran fracturadas. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 7. Evidentemente, las rocas catalogadas como *im-permeables* no se relacionan con zonas de recarga, mientras que las semipermeables y permeables se consideran que tienen asociación con dichas zonas.

Zonas de recarga y descarga

La definición final de la localización de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en el área,

se realizó superponiendo los polígonos definidos previamente a partir de cada indicador (suelo, vegetación, elevación topográfica, hidrología superficial, *K*), seleccionándose así la intersección entre ellos mediante el programa ArcMap 9.3 (Figura 8).

Los resultados indican como zonas de recarga algunas sierras, cerros y mesas presentes en el área, en las que sobresalen las sierras Fría, El Cubo, San Miguelito y Santa Bárbara. Por su parte, las zonas de descarga naturales originales corresponden principalmente con la planicie sobre la fosa tectónica de Aguascalientes, así como algunas zonas en la cercanía de los Altos de Jalisco, Santa María del Río y Ojuelos. Estos resultados deben complementarse posteriormente con la trayectoria del flujo, desde su inicio hasta su manifestación en superficie (descarga), mediante análisis químico e isotópico del agua, carga hidráulica, propiedades hidráulicas del material litológico bajo la configuración geológica del subsuelo, para así lograr mayor conocimiento del funcionamiento del sistema agua subterránea (Peñuela, 2012).

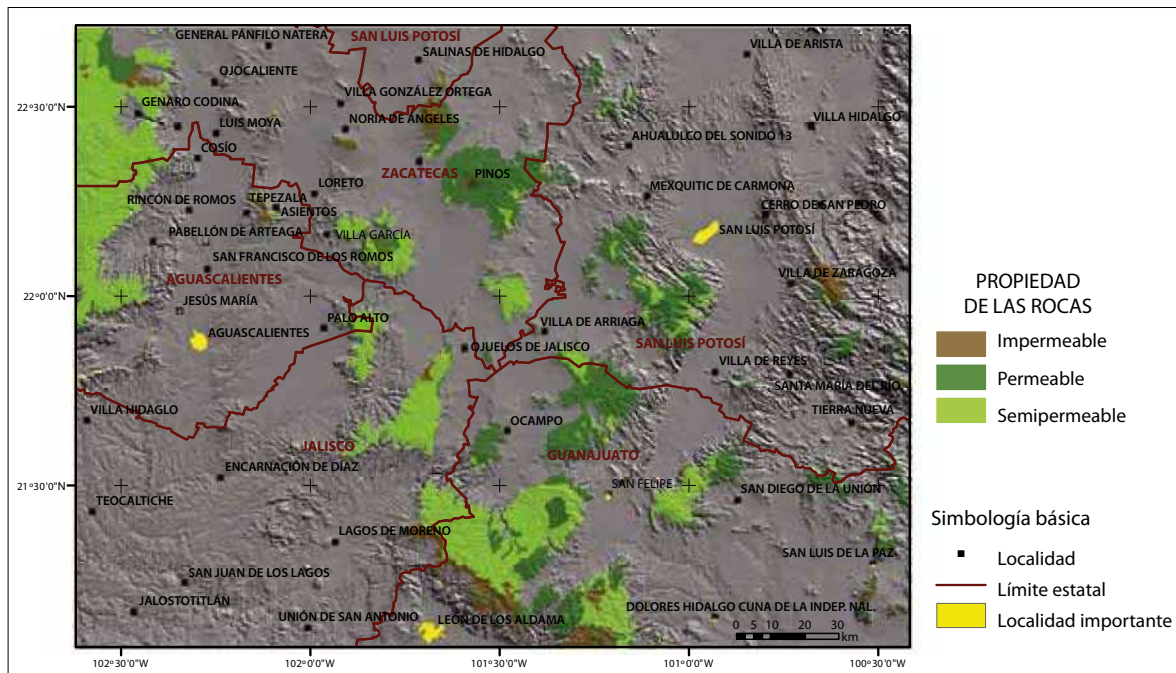


Figura 7. Permeabilidad comparativa de las unidades litológicas asociadas con posibles zonas de recarga.

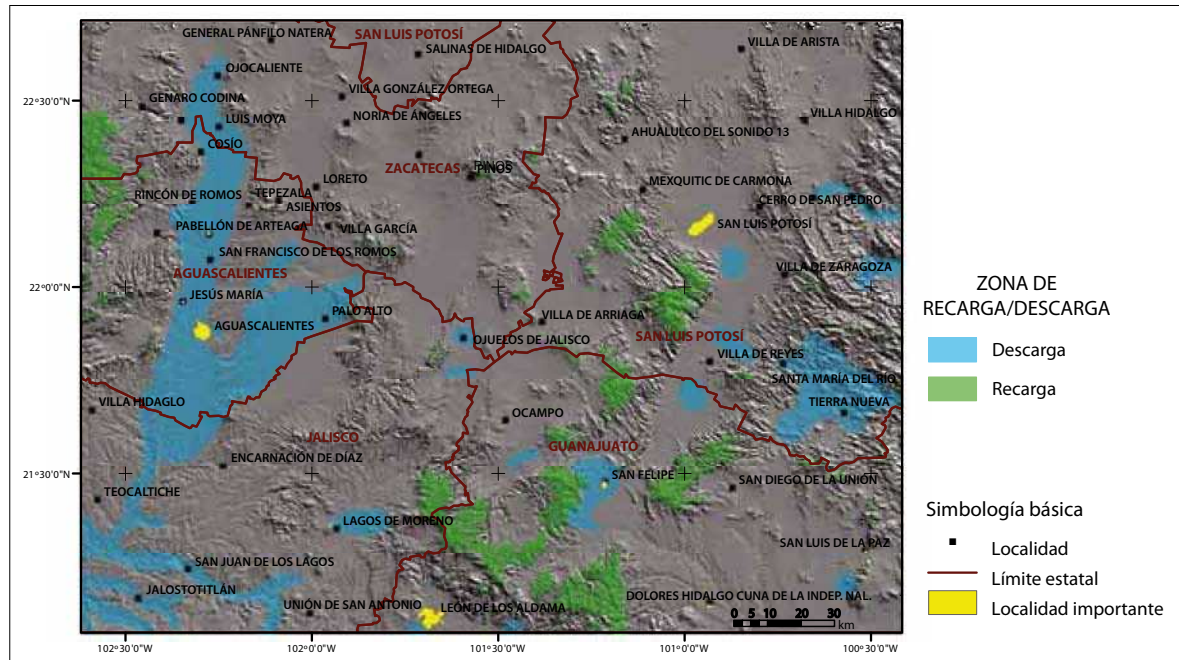


Figura 8. Localización de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en el área en estudio, a partir del análisis de diversos indicadores superficiales.

CONCLUSIONES

La teoría de los sistemas de flujo demuestra ser una herramienta útil en la definición de zonas de recarga y descarga debido a que incorpora la respuesta de la dinámica del ambiente desde una visión de sistema.

Las características de los elementos naturales (suelo, vegetación, elevación topográfica, litología, profundidad al nivel freático, presencia/ausencia de manantiales y cuerpos de agua) son resultado de diversos procesos involucrados en el funcionamiento del agua subterránea en la naturaleza, por lo que se consideran indicadores confiables de la manifestación superficial de zonas de recarga y descarga. Asimismo, el sistema de información geográfica ArcMap permitió un manejo y análisis espacial de la cartografía temática relacionada, facilitando la identificación regional de zonas de recarga y descarga.

Varios de los elementos naturales empleados en la búsqueda de indicadores superficiales se encuentran altamente perturbados por el crecimiento

poblacional y sus actividades económicas, entre los que destaca la vegetación y el tipo de suelo. Es notorio encontrar que gran parte del área en estudio está sujeta a actividades agrícola, pecuaria y forestal, lo que limita la factibilidad de aporte de información a poder asociarse con una zona de recarga o descarga de un flujo específico. Esta situación, junto con la intensiva extracción de agua subterránea a través de pozos, destaca el valor de la información histórica, la cual permite una reconstrucción conceptual del paisaje a través de definir zonas con características de descarga.

El panorama obtenido de la distribución de zonas de descarga confirma la presencia de agua que fue relativamente asequible a través de manantiales o por medio de norias, lo cual permitió el desarrollo económico y poblacional observado de la primera mitad del siglo XX. La evolución del sistema natural permite apreciar los efectos en superficie por acciones realizadas en el subsuelo (extracción de agua) afectando más del 95% del total de la superficie que cubrían las zonas de descarga (~4 600 km²).

Se hace evidente que la comunicación hidráulica subterránea de la zona de descarga del estado de Aguascalientes tenga una componente importante de recarga al oeste (fuera del área en estudio) desde cuencas hidrográficas vecinas en la Sierra Madre Occidental. Entre otras, la identificación de zonas de recarga propone territorios donde es deseable realizar acciones de mejora de los servicios ambientales hidrológicos (Peñuela, 2007; Peñuela y Carrillo, 2012).

Esta investigación es un estudio inicial, pionero, a escala regional, manifestando un esfuerzo por mostrar la aplicación de la relación entre los componentes de la naturaleza. Igualmente, que los elementos naturales superficiales son una herramienta potencial a ser usada como indicadores para determinar zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Este trabajo debe complementarse con la trayectoria de los flujos involucrados que permita vincular cada zona de descarga con su correspondiente recarga o viceversa, lo cual es fundamental para conocer el funcionamiento del agua subterránea y definir áreas prioritarias; por ejemplo, evitar acciones que deterioren la calidad del agua a recargarse. Se desea resaltar que la técnica propuesta en el presente documento es parte de una metodología general a complementarse con análisis de calidad química del agua, contenido isotópico, así como propiedades y cargas hidráulicas. No obstante, el conocimiento adquirido en el proceso de aplicar la metodología aquí descrita permite mayor comprensión de diversos escenarios posibles asociados con la dinámica del agua subterránea, en espacio y tiempo, como respuesta de actividades antrópicas o evolución natural del clima.

Teniendo en cuenta la conexión hidráulica subterránea señalada en diversos estudios, para partes del área en estudio, sobresale la importancia que los estudios hidrogeológicos mantengan una visión a escala regional donde se determine el funcionamiento del agua subterránea en su marco geológico de referencia incorporando su relación con los demás componentes del ambiente.

REFERENCIAS

- Anderson, T. W., G. E. Welder, G. Lesser and A. Trujillo (1988), *Region 7, Central Alluvial Basins*, Chapter 10 in Back, W., J. S. Rosenzhein and P. R. Seaber (eds.), *Hydrogeology*, The Geology of North America, vol. O-2, Geol. Soc. of Am., USA.
- Ángeles Serrano, G., M. Perevochtchikova y J. J. Carrillo Rivera (2008), "Posibles controles hidrogeológicos de impacto ambiental por la extracción de agua subterránea en Xochimilco, México", *J. of Latin Am. Geog.*, vol. 7, no. 1, pp. 39-56.
- Cardona, A. (1990), *Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea del Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo*, tesis de Maestría, Fac. de Ing. Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Cardona, A. (2007), *Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional, intermedio y local. Resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación*, tesis de Doctorado, Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Carrillo Rivera, J. J. (1992), *The hydrogeology of San Luis Potosí Area, Mexico*, tesis de Doctorado en Filosofía (Agua Subterránea), U. de Londres, Gran Bretaña.
- Carrillo Rivera, J. J., I. Clark and P. Fritz (1992), "Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes Basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes", *Applied Hydrogeol.*, vol. 1, no. 4, pp. 35-48.
- Carrillo Rivera, J. J., A. Cardona and D. Moss (1996), "Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the Valley of San Luis Potosí, Mexico", *J. of Hydrol.*, vol. 185, pp. 23-44.
- Carrillo Rivera, J. J. (2000), "Application of ground-water-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico", *Hydrogeol. J.*, vol. 8, no. 5, pp. 503-520.
- Carrillo Rivera, J. J., A. Cardona and W. M. Edmunds (2002), "Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high fluoride concentration in abstracted groundwater: basin of San Luis Potosí, Mexico", *J. of Hydrol.*, vol. 261, pp. 24-47.
- Carrillo Rivera, J. J., A. Cardona, R. Huízar Álvarez and E. Graniel (2008), "Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico", *Environ. Geol.*, no. 2, pp. 303-319.
- Challenger, A. y J. Soberón (2008), "Los ecosistemas terrestres", en *Capital natural de México. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*, CONABIO, México, pp. 87-108.

- CONABIO (1999), “*Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO*”, escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad, México.
- CONAFOR (2009), *Tipos de vegetación forestal y de suelos* [http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7#pastizales: 29 de septiembre de 2011].
- CONAGUA (2011), *Estadísticas del agua en México*, Comisión Nacional del Agua, México.
- Contreras, C. y M. G. Galindo (2008), “Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México”, *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, núm. 17, Bogotá, Colombia, pp. 127-137.
- Desde la red (2011), *Ag., con alta dependencia del agua subterránea... y en déficit*, Publicación del periódico de Aguascalientes por internet “Desde la red”, marzo 23 [http://www.desdelared.com.mx/2011/raices/0323-agua.html: Junio 27, 2011].
- Edmunds, W. M., J. J. Carrillo Rivera and A. Cardona (2002), “Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico city”, *J. of Hydrol.*, vol. 258, pp. 1-24.
- ESRI (2008), *ArcGIS 9.3*, Environmental Systems Research, Institute Inc. www.esri.com.
- García, E. (1998), “*Climas*” (clasificación de Köppen, modificado por García), escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad (CONABIO), México.
- Hergt, T., J. J. Carrillo Rivera, L. M. Morales Manilla, G. Ángeles Serrano, A. González Abraham y L. Rosales Lagarde (2002), *Asesoría sobre consideraciones geohidrológicas de la relación bosques-agua en la región Sierra Gorda*, Informe final para el INE, SEMARNAT, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Huizar Álvarez, R., J. J. Carrillo Rivera, G. Ángeles, T. Hergt and A. Cardona (2004), “Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City”, *Hydrogeol. J.*, no. 12, pp. 436-450.
- INEGI (1991), *Datos básicos de la geografía de México*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2000), *Hidrología superficial*, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2004), *Guía para la interpretación de cartografía edafología*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INIFAP y CONABIO (2005), *Edafología*, escalas 1:250 000 y 1:1 000 000, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad, México.
- Molina Maldonado, A. (1996), *Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México*, tesis de Licenciatura (Ingeniería Geológica), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Nieto Samaniego, A. F., S. A. Alaniz Álvarez y A. Camprubí Cano (2005), “La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica”, *Bol. Soc. Geol. Mex.*, vol. Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos Geología Mexicana, LVII, no. 3, pp. 285-318.
- Peñuela Arévalo, L. A. (2007), *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México*, tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Peñuela Arévalo, L. A. (2012), *Caracterización del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea en la porción centro-sur de la Mesa Central, México*, tesis de Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, en proceso.
- Peñuela Arévalo L. A. y J. J. Carrillo Rivera (2012), “Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico catchment”, *Environmental Earth Sciences*, julio 24, en línea.
- Prol, R. M. (1988), *El calor de la Tierra*, Fondo de Cultura Económica, México.
- SEDESOL (2005), *Integración del Sistema Nacional de Información para el desarrollo territorial en la fase correspondiente a la Caracterización del territorio: Diagnóstico funcional del territorio nacional*, Secretaría de Desarrollo Social, Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM, febrero-abril.
- SRH (1976), *Atlas del agua de la República Mexicana*, Cincuentenario de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación Precursora de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, México.
- SGM (1997a), *Carta geológico-minera Zacatecas F13-6*, escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano, México.
- SGM (1997b), *Carta geológico-minera Guanajuato F14-7*, escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano México.
- SGM (1998a), *Carta geológico-minera Aguascalientes F13-9*, escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano México.
- SGM (1998b), *Carta geológico-minera San Luis Potosí F14-4*, escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano México.
- Tóth, J. (2000), “Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones”, *Boletín Geológico y Minero*, vol. 111, núm. 4, pp. 9-26.
- Weigand, P. (2002), “Observaciones preliminares sobre la ecología histórica de la región de Los Altos de Jalisco”, en Weigand P. (comp.), *Estudio histórico y cultural sobre los huicholes*, Universidad de Guadalajara, México.