



El Colegio de la Frontera Sur Université de Sherbrooke

El papel de las áreas verdes en la recarga de acuíferos en
ciudades de regiones áridas y semiáridas de México: el caso
de Aguascalientes.

TESINA

presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestría Profesionalizante en Ecología Internacional

por

Marcel Roberto Rodríguez Sosa

2015

AGRADECIMIENTOS

Pocos son los momentos para reconocer y expresar la inmensa gratitud a las personas que han formado parte de este camino. Por ello quiero expresar un profundo agradecimiento a todos aquellos que han influido directa e indirectamente en mi desarrollo y en la conclusión de esta etapa de mi vida, con tanto cariño y apoyo moral.

Quiero agradecer de primera mano a mi asesora la Dra. Amalia Gracia por su paciencia, dirección y sus valiosos comentarios que dieron como resultado este trabajo. A mi casa de estudio ECOSUR junto con l'Université de Sherbrooke; a mis formadores y personal administrativo, especialmente a Caroline Cloutier y Birgit Schmook por su apoyo incondicional. Al soporte de CONACyT y el gobierno de Canadá que me permitió la realización de esta maestría de carácter internacional.

A mis compañeros y amigos de maestría que compartieron conmigo conocimientos, experiencias y alegría. A mis amigos de Quebec, Aguascalientes y Tlaxcala por su apoyo no importando el tiempo o la distancia.

Finalmente a mi familia, que es la piedra angular de mi vida. A mi hermano, hermana y mis hermosas sobrinas por ser la fuerza que me inspira a seguir creciendo. A mi padre por inculcar sus enseñanzas y mente crítica y a mi madre cuya sabiduría, apoyo y amor incondicional han influido para formar la persona que soy ahora; eres un ejemplo hermoso de maternidad, siempre sorprendiéndome.

RESUMEN

A partir de la segunda mitad del siglo XX la urbanización y la explosión demográfica han perturbado significativamente el ciclo hidrológico y la dinámica de los acuíferos, modificando intensamente la cantidad y calidad del agua subterránea. Se estima que el 80% de la reducción de las reservas de agua subterránea en el mundo se debe a la extracción antrópica. En las regiones áridas y semiáridas el agua subterránea es la única fuente permanente de abastecimiento. En México el 63% del territorio presenta algún grado de aridez y fuerte grado de presión sobre el recurso. Cerca del 20% de sus acuíferos no tienen disponibilidad, entre ellos se encuentra el “Valle de Aguascalientes” uno de los acuíferos más sobreexplotados del país.

La contaminación y la sobreexplotación de los acuíferos son fenómenos alarmantes; las fuentes de contaminación son diversas y no se restringen a zonas puntuales sino que están en continuo movimiento, transportando contaminantes provenientes de distintos orígenes provocando problemas serios de salud humana y de los ecosistemas. Por su parte la sobreexplotación genera un descenso en los niveles estáticos afectando ecosistemas dependientes, como los ríos o la fauna del subsuelo. Debido a la extracción desmedida se producen fenómenos geológicos como el hundimiento, grietas y colapsos que se traducen en pérdidas monetarias y zonas de riesgo. La extracción sostenida puede terminar en el agotamiento del acuífero.

Distintas técnicas y métodos han sido desarrolladas en diferentes partes del mundo y compiladas en varios modelos de recarga artificial. Las áreas verdes aportan diversos servicios ecosistémicos; de aprovisionamiento, culturales y reguladores. Además

existen ciertos modelos que promueven la sustentabilidad del entorno urbano y favorecen la infiltración a través de las áreas verdes.

A partir de una revisión bibliográfica se realizó análisis teórico sobre los elementos principales que conforman la propuesta, primero de manera general y posteriormente enfocado a la ciudad de Aguascalientes. El análisis mostró que la ciudad cuenta con los elementos básicos para la aplicación de métodos y técnicas de infiltración y recarga artificial, aplicación que permitiría alcanzar un balance equilibrado del acuífero y mejorar la habitabilidad urbana al beneficiarse de las virtudes de las áreas verdes.

Palabras clave: agua subterránea, áreas verdes, recarga artificial, Aguascalientes

RESUMÉ

Depuis la moitié du XXème siècle, l'urbanisation et l'accroissement démographique ont perturbé considérablement le cycle hydrologique global et la qualité des eaux souterraines. À l'échelle mondiale, on estime à 80% la réduction des réserves hydriques souterraines causée par l'extraction anthropique. Dans les régions arides et semi-arides, l'eau souterraine est la seule source permanente d'approvisionnement en eau. Entre autres, le Mexique subit une grande pression sur ses ressources hydriques puisque 63% du territoire présente un certain degré d'aridité. Par ailleurs, près de 20% des bassins versants du pays ont atteint leur limite d'exploitation. On compte parmi ceux-ci la vallée d'Aguascalientes, qui est l'un des bassins versants les plus surexploités du pays.

La pollution et la surexploitation des bassins versants menacent l'approvisionnement durable en eaux souterraines. D'une part, les sources de contamination sont très variées et les contaminants se déplacent constamment. Ceux-ci amènent des problématiques liées à la santé humaine et des écosystèmes. D'autre part, la surexploitation des aquifères produit une baisse du niveau de la nappe phréatique, affectant négativement les écosystèmes qui en sont dépendants. En plus de risquer l'épuisement des eaux souterraines, la surextraction peut entraîner des pertes économiques et augmenter les risques associés aux phénomènes géologiques tels la subsidence, les fissures et l'effondrement du sol. .

Partout dans le monde, diverses techniques et méthodes de recharge artificielle des aquifères ont été développées et compilées. Cependant la plupart manque d'une

perspective plus intégrale. En effet, seulement quelques modèles promeuvent le développement durable du milieu urbain ou favorisent l'inclusion d'autres aspects, dont la valorisation des espaces verts pour l'infiltration d'eau. Or, ces aires ont démontré être d'une grande contribution au maintien de plusieurs services écosystémiques.

Cet essai propose une analyse théorique réalisée à partir d'une révision bibliographique. Cette analyse a été effectuée selon une approche descendante: d'une vision générale de la problématique à l'applicabilité des solutions proposées à l'échelle de la ville d'Aguascalientes, au Mexique. L'analyse a montré que la ville détient tous les éléments essentiels pour mettre en œuvre les méthodes et techniques d'infiltration et de recharge artificielle en profitant des espaces verts, permettant d'atteindre un bilan positif de la balance hydrique du bassin versant et ainsi, améliorer l'habitabilité urbaine.

Mots clés : eau souterraine, espaces verts, recharge artificielle, Aguascalientes

INDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
RESUMÉ	IV
GLOSARIO	XI
ACRONIMOS Y ABREVIACIONES	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 LOS ACUIFEROS URBANOS: SITUACION ACTUAL Y GESTION.....	5
1.1 Panorama de los acuíferos en México y en la ciudad de Aguascalientes	7
1.1.1 La situación de los acuíferos en la república mexicana	8
1.1.2 La situación del acuífero Valle de Aguascalientes	9
1.2 Principales efectos negativos asociados a la sobreexplotación y contaminación de los acuíferos	13
1.2.1 Impactos ecológicos	15
1.2.2 Impactos sociales	17
1.2.3. Impactos económicos	20
1.3 Políticas de gestión del agua subterránea	22
1.3.1 Las aguas subterráneas en la política internacional	23
1.3.2 Normatividad y legislación del agua subterránea en México	25
1.3.3 Las aguas subterráneas en la política local	28

CAPÍTULO 2 LA CONTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS VERDES URBANAS A LA RECARGA DE ACUÍFEROS	29
2.1 La multifuncionalidad de las áreas verdes y su papel en la recarga de acuíferos	34
2.1.1. Servicios ambientales	36
2.1.2. Aportación económica	37
2.1.3. Aportación social.....	37
2.2 Algunos modelos que favorecen la recarga de acuíferos e infiltración mediante áreas verdes	39
2.2.1 Sistema de Drenaje Urbano Sustentable (SUDS).....	39
2.2.2 Infraestructura Verde (GI)	43
2.2.3 Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD)	44
2.2.4 Consideraciones de los modelos	46
2.3 Algunas experiencias de recarga artificial en México.....	46
 CAPÍTULO 3 PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE LAS ÁREAS VERDES COMO ESTRATEGIA DE RECARGA DEL ACUIFERO VALLE DE AGUASCALIENTES	 51
3.1 Elementos esenciales para el establecimiento de modelos de recarga artificial ..	52
3.1.1. Demanda de agua suficiente que justifique la aplicación de las técnicas de infiltración y recarga	52
3.1.2. El acuífero como un medio conveniente para el almacenaje y la recuperación de agua	53

3.1.3. Disponibilidad de fuentes de agua adecuadas para la recarga del acuífero.....	53
3.1.4. Espacios suficientes disponibles para capturar y tratar el agua	58
3.1.5 Capacidad de diseño, construcción y operación para el proyecto de recarga	66
3.2. Políticas de soporte	67
3.3. Desafíos para la integración de la propuesta	70
3.3.1. Desafíos en la política de planeación	70
3.3.2. Desafíos sociales.....	72
3.3.3. Consideraciones del entorno	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS.....	78
ANEXOS	93

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 CLASIFICACIÓN DE POZOS DE AGUA EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES	10
FIGURA 1.2 EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO DEL ACUÍFERO Y CRECIMIENTO URBANO	12
FIGURA 1.3 PRINCIPALES INSTITUCIONES Y DEPENDENCIAS EN COORDINACIÓN CON LA CONAGUA	27
FIGURA 2.1 COMPONENTES DE LOS SUDS.....	41
FIGURA 2.2 INFRAESTRUCTURA VERDE TÉCNICAS NO INCLUIDAS EN SUDS.....	43
FIGURA 2.3 POZOS DE ABSORCIÓN DE LA DELEGACIÓN IZTAPALAPA.....	48
FIGURA 2.4 POZO A CIELO ABIERTO	49
FIGURA 3.1 MICROCUENCAS Y AGUA SUPERFICIAL DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES	54
FIGURA 3.2 MAPA DE RIESGOS POR INUNDACIÓN EN LA CIUDAD	56
FIGURA 3.3 EXTRAPOLACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE DESCONEXIÓN DE DRENAJE PLUVIAL.....	61
FIGURA 3.4 EJEMPLO DE TÉCNICAS DE INFILTRACIÓN EN ÁREAS VERDES DENTRO DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES	63

INDICE DE CUADROS

CUADRO 2.1 ESCALAS DE MAR.....	32
CUADRO 2.2 PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MAR.	34
CUADRO 2.3 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROVISTOS POR ÁREAS VERDES EN LAS REGIONES URBANAS	35
CUADRO 2.4 PROYECTOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN MÉXICO	47
CUADRO 3.1 ESPACIOS DISPONIBLES PARA CAPTURAR Y TRATAR EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES	61
CUADRO 3.2 VINCULACIÓN DE DEPENDENCIAS GUBERNAMENTALES.....	67

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 SISTEMA HIDROLÓGICO	93
ANEXO 2 PANORAMA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO	94
ANEXO 3 SITUACIÓN DE LOS POZOS DE EXTRACCIÓN DEL VALLE DE AGUASCALIENTES.....	95
ANEXO 4 TEMPERATURA DEL AGUA EXTRAÍDA EN LAS REGIONES URBANAS.....	96
ANEXO 5 NÚMERO DE CONFLICTOS POR AGUA EN MÉXICO Y ACUIFEROS SOBREEXPLOTADOS 1990-2002	97
ANEXO 6 PRESENCIA DE COMITÉS TÉCNICOS DE AGUA SUBTÉRRANEA (COTAS)	97
ANEXO 7 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS MAR. CONTINUA... ..	98
ANEXO 8 MARCO NORMATIVO PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN MÉXICO.....	100

GLOSARIO

- Acuífero** Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo. LAN.- Artículo 3 Fracción II. El país se ha subdividido en 653 acuíferos o unidades hidrogeológicas. (CONAGUA, 2012)
- Acuífero sobreexplotado** Es aquel en el que la extracción del agua subterránea supera al volumen de recarga media anual, de tal forma que la persistencia de esta condición por largos periodos de tiempo ocasiona alguno o varios de los siguientes impactos ambientales: agotamiento o desaparición de manantiales, lagos, humedales; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; intrusión marina en acuíferos costeros; migración de agua de mala calidad. Estos impactos pueden ocasionar pérdidas económicas a los usuarios y a la sociedad. (CONAGUA, 2012)

Agua subterránea	Es el agua que satura por completo los poros o intersticios del subsuelo. Por lo tanto es aquella que constituye la zona saturada. (CONAGUA, 2012)
Agua virtual	Es la suma de la cantidad de agua empleada en el proceso productivo para la elaboración de un producto. (CONAGUA, 2012)
Colmatación	Reducción de la porosidad o área de infiltración debido a procesos físicos, químicos y biológicos, resultando una reducción en la efectividad de la recarga (Pérez y Carrera, 1998 citado en (Cortez 2012).
Estigofauna	Animales que habitan en el agua subterránea, comprende crustáceos, gusanos, caracoles, insectos, otros grupos de invertebrados y peces. (Humphreys 2006)
Morfología urbana	Hace referencia a la forma y distribución en el espacio de los edificios urbanos
Nivel estático	Es la distancia del suelo al nivel de espejo de agua sin que esté funcionando la bomba (Cuesta 2010).
Nivel de abatimiento	Es la distancia que reduce el nivel del agua al estar bombeando el agua (Cuesta 2010).
Sensibilidad ambiental	Es el carácter, condición o estado de susceptibilidad que indica la capacidad de asimilación y respuesta de los

sistemas ambientales ante la implantación de un proyecto, así como las dificultades que ofrece el entorno para el proyecto (Delgado 2002)

Zona de veda

Aquellas áreas específicas de las regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas o acuíferos, en las cuales no se autorizan aprovechamientos de agua adicionales a los establecidos legalmente y éstos se controlan mediante reglamentos específicos, en virtud del deterioro del agua en cantidad o calidad, por la afectación a la sustentabilidad hidrológica, o por el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos (Ley de Aguas Nacionales Art. 3° sección LXV).

Zona no saturada

Es la zona que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático. Incluye la zona radicular, la zona intermedia y la zona capilar. Los poros de esta zona contienen agua que se encuentra a una presión menor que la atmosférica y también contienen aire y otros gases. En esta zona pueden encontrarse niveles saturados, tales como los acuíferos colgados. También se la denomina zona de aireación o zona vadosa (IAEA 2003).

Zona radicular o radical

Es la zona que se extiende desde la superficie del terreno hasta el nivel que alcanzan las raíces de las plantas.

Puede contener parte o toda la zona no saturada, dependiendo de la profundidad de las raíces y del nivel freático (IAEA 2003).

Permeabilidad

Es la propiedad o la capacidad de una roca porosa, sedimento o terreno para transmitir un fluido; es una medida de la facilidad relativa del flujo del fluido bajo un gradiente piezométrico. Las expresiones "permeable" e "impermeable" tienen un significado relativo. El término permeabilidad se emplea coloquialmente como sinónimo de conductividad hidráulica.

Uso consuntivo

Se llama así a los usos fuera del cuerpo de agua para los que el líquido se transporta al lugar donde se utilizará y ya no regresa, ni total ni parcialmente, al cuerpo de agua del que se extrajo (Consejo Consuntivo del Agua, A. C.). El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo (Ley de Aguas Nacionales Art. 3° sección LV).

ACRONIMOS Y ABREVIACIONES

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
PDUA	Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Aguascalientes
PDUMA	Programa de Desarrollo Urbano del Municipio de Aguascalientes
PEDUA	Programa Estatal de Desarrollo Urbano Aguascalientes
PSMARN	Programa Sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
COTAS	Comités Técnicos de Aguas Subterráneas
WWC	Consejo Mundial del Agua
IGRAC	Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas
GW-MATE	El Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas
CEAA	Compendio Estadístico de Administración del Agua

AIH-GRA	Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Comisión en Gestión de Recarga de Acuíferos
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
PHI	Programa Hidrológico Internacional

El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.

(Leonardo di ser Piero da Vinci)

INTRODUCCIÓN

Históricamente el agua ha sido un aspecto primordial para el asentamiento y funcionamiento urbano, “*es un elemento fundamental para el bienestar material y cultural de las sociedades en el mundo entero*” (Shiva, 2002 citado en (Oswald & Hernández 2005). En la inmensidad del planeta azul menos del 1% del agua dulce se encuentra disponible para consumo humano. El agua subterránea es la de mayor abundancia pues representa el .68% (Martínez et al. 2006) y no es de extrañarse que sea la principal fuente de abastecimiento en las ciudades e industrias (Oswald & Hernández 2005). Pese a su importancia, en pleno siglo XXI el agua es un recurso infravalorado en todos los niveles o escalas desde instituciones hasta los individuos. La infraestructura, los instrumentos de planeación, además de los usos y costumbres, no han alcanzado una gestión racional y sustentable¹ de este recurso.

Durante las últimas cinco décadas la explotación de los acuíferos se ha generalizado e intensificado a partir del desarrollo industrial y el avance tecnológico en la perforación de pozos de bombeo (Shah 2005). Se estima que el 80% de la reducción de las reservas de agua subterránea a nivel mundial se debe a la extracción antrópica (Konikow y Kendy 2005 en Bayari et al. 2006a). Asimismo, el crecimiento poblacional y la expansión urbana son los principales factores agravantes de la calidad y

¹ La gestión sustentable se refiere a prolongar la productividad del uso de los recursos naturales a lo largo del tiempo, a la vez que se mantiene la integridad de esos recursos, viabilizando la continuidad de su uso para las próximas generaciones (UNESCO 2000).

disponibilidad del agua subterránea (Wong et al. 2012). Actualmente la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas; se calcula que para 2030 alcanzará los 4.9 billones de habitantes y se estima que el 90% del crecimiento poblacional tendrá lugar en las ciudades, incrementando con ello el área total urbana a casi el triple (Zandaryaa 2010; ONU-HABITAT 2009; SOCBD 2012). Esto hace que se ejerza mayor presión en la disponibilidad de los recursos hídricos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas en las que habita cerca del 85% de la población mundial (UN-WATER 2013) y en donde las fuentes de abastecimiento son escasas y el agua subterránea resulta es la única fuente permanente de abastecimiento. En México las zonas con aridez abarcan el 63% del territorio nacional (anexo 2[a]) y en ellas habita cerca del 41% de la población (Arreguín 2011; Díaz Padilla et al. 2011a).

La desertificación y el cambio climático afectan el ciclo hidrológico modificando espacial y temporalmente la disponibilidad del recurso (Solomon et al. 2007). Esta tendencia define un escenario donde las ciudades dependerán del aprovisionamiento de agua desde otras fuentes para satisfacer su demanda (Zandaryaa 2010) y en el que es previsible que se agraven y acentúen los actuales conflictos socio-políticos originados por la escasez del agua (Shiva, 2002 citado en Oswald & Hernández 2005). Frente a estos escenarios es imprescindible desarrollar estrategias apropiadas de gestión para hacer frente al paradigma adverso de la escasez y el estrés hídrico en las ciudades con mayor vulnerabilidad, preponderantemente aquellas situadas en regiones áridas y semiáridas (Falkenmark et al. 1989).

El uso desmedido del agua subterránea se acentuó en décadas pasadas, pues se daba por hecho que era un elemento renovable ignorando que es también un recurso

condicionado que puede tornarse finito (Oswald & Hernández 2005). El siglo XX fue un periodo de explotación intensiva, no obstante se desarrollaron también estrategias de recarga artificial para remediar la situación, principalmente en los países nórdicos y europeos. Sin embargo su uso no había sido reproducido ampliamente hasta épocas modernas. En la actualidad existe una variedad bastante razonable de métodos y técnicas, no obstante su implantación se limita a un par de ellas.

En esta tesina se propone la integración de dos elementos subutilizados con el fin de promover el potencial de ambos. El primer elemento refiere a las diferentes técnicas y métodos de recarga artificial, mientras que el segundo es la principal superficie permeable del entorno urbano, las áreas verdes, espacios multifuncionales que son esenciales para las ciudades pues proveen un gran número de servicios ecosistémicos.

El objetivo de este documento es analizar el emplazamiento de técnicas y métodos de recarga en las áreas verdes urbanas para contribuir a la mitigación de la explotación de las aguas subterráneas. La propuesta está enfocada a la ciudad de Aguascalientes con la finalidad de responder a un conflicto prioritario y visualizar un panorama local. El trabajo se divide en tres capítulos que responden a los objetivos específicos. Así, el primer capítulo consiste en presentar una descripción de la situación de los acuíferos en México y en la ciudad de Aguascalientes, así como de su gestión. El segundo capítulo buscó presentar un análisis sobre las áreas verdes, de los modelos de recarga artificial y algunos ejemplos de recarga artificial en México. Finalmente, el tercer capítulo tuvo como objetivo exponer la propuesta y sus desafíos en el contexto local de la ciudad de Aguascalientes.

Los principales motores de búsqueda o plataformas de acceso a distintos recursos bibliográficos de carácter científico fueron el Sistema de Información Bibliográfico de ECOSUR (SIBE) y el Servicio de Biblioteca y Archivos de L'Université de Sherbrooke. La información técnica referente al acuífero del Valle de Aguascalientes fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua mediante la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental.

CAPÍTULO 1 LOS ACUIFEROS URBANOS: SITUACION ACTUAL Y GESTION

Reconocer el ciclo del agua como un proceso biofísico esencial en los procesos ecológicos es imprescindible para alcanzar su manejo sustentable; los ecosistemas dependen del ciclo hidrológico global y los acuíferos son una parte importante para su funcionamiento (anexo 1) (Morris et al. 2013 en UN-WATER 2015; Ordoñez 2011). Dentro de este ciclo, parte del agua superficial se infiltra en el suelo, una proporción retorna mediante la evapotranspiración, el resto se vuelve subterránea y queda retenida en la zona radicular o percola a mayor profundidad donde fluye lentamente a través de estratos formados por materiales porosos desplazándose vertical y horizontalmente en función del gradiente (Ordoñez 2011; IGME 2010); a estos estratos permeables se les denomina acuíferos (Tuinhof et al. 2002).

Dependiendo de las características hidráulicas del acuífero (porosidad y permeabilidad de las rocas) el agua puede quedar almacenada desde meses hasta siglos o transportarse y surgir nuevamente en zonas más bajas en forma de manantiales o ríos. Los acuíferos pueden extenderse desde una decena de metros cuadrados (locales) hasta millones de kilómetros cuadrados (regionales). Según su estructura geológica, los materiales y sus condiciones hidráulicas se clasifican en tres tipos: los acuíferos libres (zona permeable saturada de agua sobre una base impermeable), confinados (zona saturada de agua confinada entre dos terrenos impermeables) y semiconfinados (zona saturada de agua confinada entre una base impermeable y un terreno semipermeable) (Ordoñez 2011; IGME 2010).

A partir de la segunda mitad del siglo XX la urbanización y la explosión demográfica han perturbado significativamente el ciclo hidrológico y la dinámica de los acuíferos, modificando intensamente la cantidad y calidad del agua subterránea (Wong et al. 2012). En primer lugar las ciudades modifican los acuíferos mediante la alteración de su flujo provocado por la extracción intensiva y sostenida del agua subterránea, su afectación está en función de la ubicación del pozo respecto a la red de flujo, en zonas costeras dicha alteración puede provocar la intrusión de agua salina (Lambán & Manzano 2012; Ordoñez 2011).

En segundo lugar el entorno urbano altera las tasas de infiltración debido a la impermeabilización de la superficie. En un ambiente no construido el agua superficial puede filtrarse de manera natural al subsuelo dependiendo de su grado de permeabilidad; pero en el caso de las ciudades el suelo es casi en su totalidad una capa impermeable que reduce la infiltración del agua superficial al subsuelo y varía considerablemente entre distintas zonas (por ejemplo las áreas verdes tienen mayor infiltración mientras que los estacionamientos con mayor superficie impermeable infiltran menor porcentaje). Sin embargo, existen estudios donde la urbanización genera infiltración incluso mayor que en tiempos pre-urbanos, lo anterior debido a bajas tasas de precipitación pluvial y fugas en el sistema de drenaje (Francis & Chadwick 2013b; Kruse et al. 2013; Garduño et al. 2006). Por otro lado, dicha capa impermeable incrementa el flujo y el volumen de agua de escorrentía que aumenta la contaminación superficial y la probabilidad de inundaciones (Björklund et al. 2009), además los ríos son en ocasiones entubados o canalizados lo cual reprime la dinámica de alimentación río-acuífero (Francis & Chadwick 2013b). Las inundaciones causan la mitad de los

desastres en todo el mundo (UN-WATER 2010), en algunos estados de India se han impuesto medidas obligatorias para la recolección de agua de lluvia con la finalidad de evitar este fenómeno perjudicial (Subramanian 2006).

El grado de alteración en los acuíferos depende en gran parte de la presión ocasionada por la densidad de población, de la morfología urbana y el diseño del medio físico construido. Por ejemplo: un mayor número de habitantes demanda mayor cantidad de recursos (principalmente agua y suelo) a tal punto que puede llegar a sobreexplotarlos; una ciudad con una tipología concéntrica tiene una mayor densidad y cobertura impermeable que una cuya urbanización tiene forma de satélite; a menor escala en zonas industriales y comerciales el suelo impermeable puede llegar a cubrir hasta el 95% de la superficie, ambas sin un diseño que tome en cuenta la sensibilidad ambiental (Francis & Chadwick 2013b; Chilton & Seiler 2006).

1.1 Panorama de los acuíferos en México y en la ciudad de Aguascalientes

En los últimos 50 años el uso del agua subterránea a nivel mundial se ha incrementado considerablemente gracias a la industrialización, a mejores tecnologías de bombeo y al desarrollo de máquinas de perforación en serie, lo cual ha permitido utilizar el agua subterránea con diferentes objetivos y contextos (Shah 2005). A escala mundial la mitad de la población y más de la mitad de las mega-ciudades dependen del agua subterránea aun cuando sus acuíferos ya están siendo fuertemente explotados (Werner et al. 2013; IGRAC 2014).

1.1.1 La situación de los acuíferos en la república mexicana

México es considerado como un país con baja disponibilidad de agua (<5000m³/hab/año) (ONU 2008; SEMARNAT 2015), lo cual se debe en parte a que cerca del 63% del territorio presenta algún grado de aridez (Díaz Padilla et al. 2011b). Paradójicamente en estas regiones se localiza el 80% de las superficies bajo riego, el 70% de la industria y se genera el 80% del producto interno bruto (ONU 2008). Asimismo en estas regiones habita el 41% de la población nacional (Díaz Padilla et al. 2011b), la mayoría (82%) en localidades urbanas (INEGI 2013), de las cuales 13 forman parte de los principales núcleos de población² del país (CONAGUA 2013a). La suma de esto factores acentúan en gran medida el estrés y presión de los recursos hídricos; de hecho de las 13 regiones hidrográficas³, 8 presentan un fuerte grado de presión, la mayor parte ubicadas en zonas áridas y semiáridas (CONAGUA 2013a).

En lo que respecta a las aguas subterráneas, estas son de gran importancia para el país, pues abastecen el 75% del agua utilizada en las ciudades y aportan el 38% del volumen total de agua concesionada para usos consuntivos⁴ (CONAGUA 2013b). A partir de los años 50 la disponibilidad ha disminuido considerablemente a menos del 75%, mientras que el alumbramiento de pozos se ha incrementado casi 10 veces más (El Banco Mundial 2009). De los 653 acuíferos del país 162 no tienen disponibilidad (106 están siendo sobreexplotados, 76 están en riesgo de sobreexplotación y 16

² La importancia de los núcleos de población radica primordialmente en el número de habitantes, establecidos en rangos, comenzando por localidades de 500mil a 1millon de habitantes. Existen en total 36 núcleos de población en el país (CONAGUA 2013a) (anexo 2[h])

³ Para fines de administración y preservación de las aguas nacionales, la república mexicana se dividió en trece regiones hidrológico administrativas formadas por agrupaciones de cuencas. Su delimitación respeta los límites municipales para facilitar la integración de la información socioeconómica (CONAGUA 2013c). (anexo 2[b])

⁴ Los usos consuntivos son: uso agrícola, para abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas.

presentan intrusión salina⁵). Desafortunadamente ante este escenario solo 13 de los acuíferos en déficit han puesto en marcha proyectos u obras de recarga artificial (Chávez 2013). Frente a este panorama se estipuló un acuerdo de ordenamiento de las aguas subterráneas resultando en la veda del 55% del territorio (CONAGUA 2013c). No obstante, dicha medida se ve mermada por la creciente necesidad del recurso y la falta de disponibilidad: tan solo en el año 2012 se registraron 3744 casos de alumbramiento de pozos sin concesión, con mayor incidencia (70%) en las regiones áridas y semiáridas (CONAGUA 2013b). Además, el 54.7% del volumen de agua utilizado a nivel nacional proviene de estos acuíferos y sus niveles piezométricos descienden de uno a cinco metros por año (Arreguín 2011; El Banco Mundial 2009; CONAGUA 2013c)⁶.

1.1.2 La situación del acuífero Valle de Aguascalientes

El 72% del agua consumida en el estado de Aguascalientes proviene del subsuelo (Peñuela et al. 2012); en total existen cinco acuíferos en el estado, pero el más importante es el “Valle de Aguascalientes” pues además de ser el de mayor extensión (abarca 3129 km² de la porción central del estado, CONAGUA, 2010), es uno de los acuíferos más sobrexplotados del país (CEPLAP 2011). Aun cuando la disponibilidad del Valle de Aguascalientes es nula, tiene un consumo⁷ (de 427.4 Mm³/año) que duplica la recarga media anual (de 235 Mm³), es decir que opera con un déficit de 192.4 Mm³ anuales. El mayor usuario del acuífero es el sector agrícola con 68% del volumen total, seguido del público-urbano con 28% y el 4% restante corresponde a otros usos

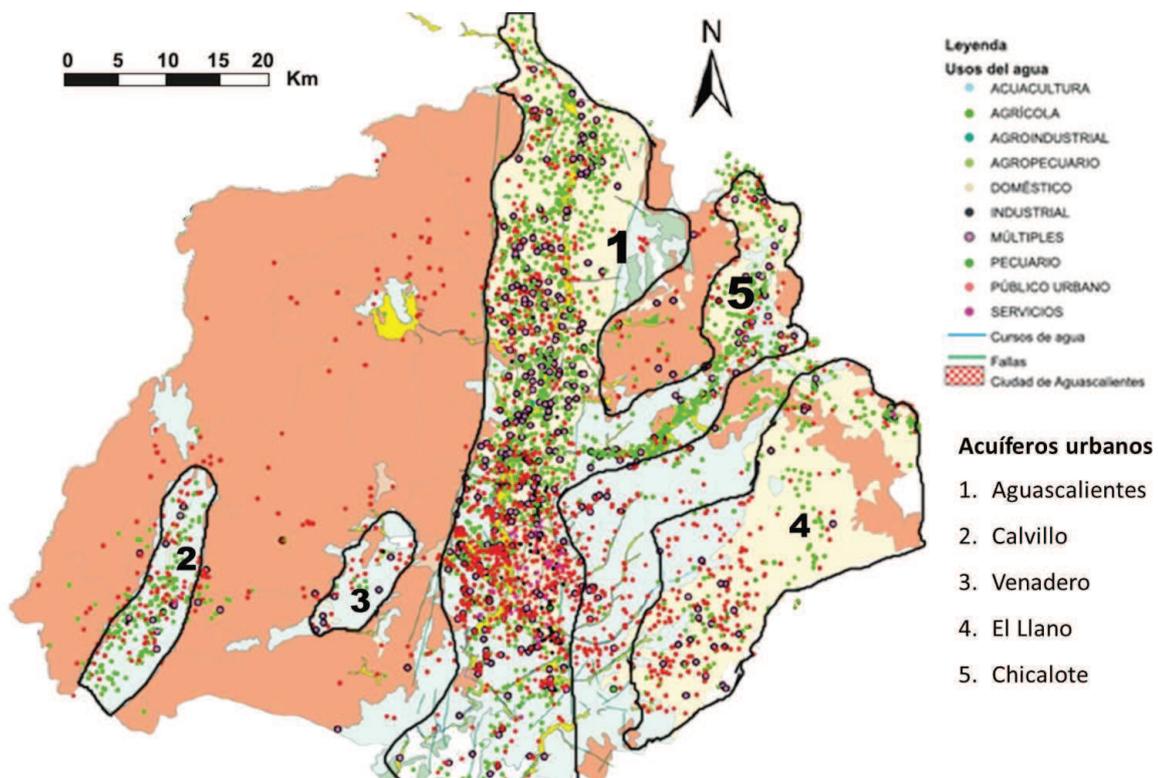
⁵ La sumatoria no coincide con el total 162 debido a que un mismo acuífero puede ser clasificado en más de una categoría.

⁶ En el anexo 2 se muestra la información contenida en este apartado de manera gráfica.

⁷ Si bien el volumen de extracción concesionado es de 335.4 Mm³ anuales; el consumo real alcanza los 427.4 Mm³/año.

(CONAGUA 2015a). La presión ejercida sobre el Valle de Aguascalientes es contundente, en el estado se han perforado 2387 pozos y casi la totalidad se distribuyen a lo largo del valle (figura 1.1) (INAGUA 2012). Desde 1963 con el fin de mitigar la sobreexplotación, se estableció una veda tipo III por tiempo indefinido en todo el estado de Aguascalientes; esta restricción permite únicamente extracciones limitadas en los pozos existentes y no es posible otorgar nuevas concesiones para el alumbramiento (CONAGUA, 2013; CONAGUA, 2010). Si bien existe el decreto de veda, los usuarios del distrito de riego de la región establecen sus propias reglas de operación, lo que disminuye la eficacia de esta medida (COTAS 2006).

Figura 1.1 Clasificación de pozos de agua en los acuíferos de Aguascalientes



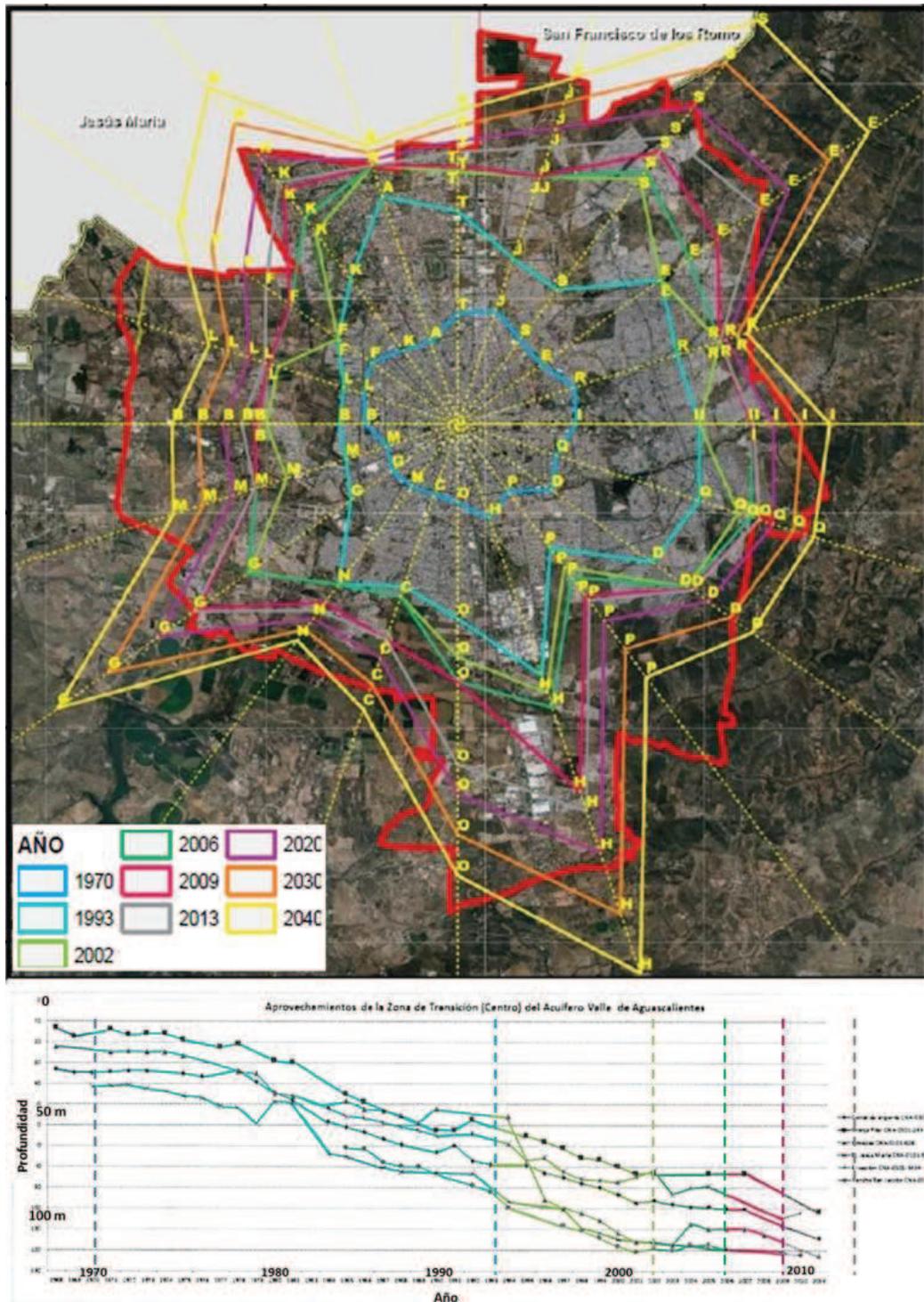
Fuente: modificación del mapa de clasificación de pozos INAGUA (2012), se añadieron los acuíferos del estado INAGUA (2010).

La ciudad de Aguascalientes se ubica en el centro del país en las coordenadas geográficas 21°52'51" latitud norte y 102°17'46" longitud oeste, a una altitud de 1885 msnm; su clima es semiárido (Díaz Padilla et al. 2011b) por lo que presenta una escasez hídrica natural, la mayor parte del agua pluvial se evapora y su precipitación media anual de 509 mm contrasta con los 2200 mm de evaporación potencial media anual de la región (CONAGUA, 2010).

A partir de la primera mitad del siglo XX la escasez del agua en la ciudad tuvo mayor presencia y continuó agudizándose paulatinamente, perceptible en el descenso de la profundidad del nivel estático en la zona urbana del acuífero (Caldera 2006), debido al crecimiento acelerado de la población quintuplicándose en 50 años (COTAS 2006), lo cual, aunado a políticas de producción de viviendas excesivas condujo a una expansión ineficiente de la mancha urbana abarcando no solo el entorno natural sino también zonas agrícolas y de reserva para recarga de acuíferos (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b).

La extensión de la mancha urbana actual es de 13250 ha de la cuales 93% es superficie impermeable. Es uno de los principales núcleos de población de México (anexo 2[h]) (CONAGUA 2013a); con 761,546 habitantes alberga el 64% de la población estatal y el 97% de la municipal (INEGI 2010). Se estima que sobrepase el millón de habitantes para el año 2040, incrementando así la demanda de agua. (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b). Debido a que la ciudad capital depende enteramente de este recurso se convierte en un factor que impide el cese o disminución de la extracción lo que provoca el descenso progresivo del nivel estático (figura 1.2) (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b).

Figura 1.2 Evolución del nivel estático del acuífero y crecimiento urbano



Fuente: modificado de Proyecciones de crecimiento 1970-2040 (IMPLAN 2013 en H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014a) se añadió tabla en la parte inferior Evolución del nivel estático de la zona urbana del acuífero Valle de Aguascalientes (CONAGUA 2015a).

La ciudad de Aguascalientes se abastece mediante 264 pozos de los cuales se extraen cerca de 82.6 Mm³/año; a pesar de representar tan solo el 20% de las extracciones totales del acuífero en esta zona urbana se registran los mayores caudales de extracción (de 250 m³/h a 436 m³/h) y la mayor profundidad de pozos (de 400 m a 600 m) (anexo 3) (INAGUA 2012). Debido a la sobreexplotación continua el flujo del acuífero ha cambiado formado un cono de abatimiento de aproximadamente 20 m (CONAGUA 2015b).

1.2 Principales efectos negativos asociados a la sobreexplotación y contaminación de los acuíferos

Debido a que la dinámica de los acuíferos es compleja, existe cierta incertidumbre en la delimitación de su grado de sobreexplotación (Bosch 2001; Valdivia 2013). Según la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) un acuífero está siendo sobreexplotado cuando existe un déficit en el balance hídrico, es decir, cuando la extracción del agua subterránea supera al volumen de recarga media anual ocasionando distintos impactos ambientales (CONAGUA, 2012). Esta definición tan general no dice nada sobre las conexiones entre los impactos ambientales y la sobreexplotación de acuíferos, al tiempo que no permite considerar factores fundamentales como los volúmenes permitidos y reales de extracción, lo cual vuelve imprecisos los indicadores para dar cuenta de la sobreexplotación y torna los cálculos poco certeros.

En regiones donde las fuentes de agua son escasas, la sobreexplotación del agua subterránea es una actividad que permite el desarrollo de asentamientos en continuo crecimiento (Bosch 2001). Un claro ejemplo es el desarrollo del estado de Aguascalientes, hasta 1940 sus principales fuentes de agua eran manantiales y norias,

pero ante el continuo crecimiento poblacional e industrial fue necesaria la perforación de 77 pozos (8 en la zona urbana) para asegurar el abastecimiento. Los volúmenes y tiempos de extracción de los pozos fueron tan intensivos que para el año 1963 fue necesario declarar la veda por tiempo indefinido, hecho que no frenó el crecimiento. En la actualidad existen 264 pozos en la zona urbana y más de 2300 pozos en el Valle de Aguascalientes (COTAS 2006; CONAGUA 2015a). En un modelo ideal, el uso del agua subterránea debería percibirse como una alternativa de desarrollo mientras otras opciones de abastecimiento son implementadas como la captación pluvial o la desalinización (Bosch 2001).

Referente a la contaminación del agua subterránea, esta ocurre mayormente mediante la infiltración de elementos exógenos de origen antrópico, las fuentes son diversas y no se restringen a zonas puntuales sino que están en continuo movimiento, transportando contaminantes provenientes de distintos orígenes; verbigracia organismos patógenos por el riego con aguas residuales en actividades agrícolas, fugas en las redes de drenaje que se infiltran por debajo de la mancha urbana, la deposición atmosférica de metales pesados en áreas verdes o por descargas ilícitas de residuos industriales peligrosos.

En el caso de la ciudad de Aguascalientes la contaminación hídrica del subsuelo es en gran parte originada por la sobreexplotación; a medida que descienden los niveles de agua en el acuífero, los pozos interaccionan con los flujos hidrotermales y fenómenos geoquímicos, lo que incrementa la temperatura del agua y ocasiona el aumento del contenido de especies químicas disueltas como fluoruro, hierro, calcio, estroncio y silicio (Carrillo et al. 2005); así las temperaturas de agua más elevadas (entre 33°C y

39°C) se registran en las regiones más densamente pobladas de la ciudad que tienen mayor demanda del recurso (anexo 4) (IMPLAN 2013c).

A continuación se desglosan los distintos impactos de la sobreexplotación y la contaminación de los acuíferos urbanos.

1.2.1 Impactos ecológicos

Los acuíferos forman parte de un sistema y ciclo hidrológico que da soporte a una amplia gama de seres vivos en forma de hábitat o fuente de energía (Puri 2006). Sin embargo los acuíferos son ecosistemas poco descritos y a los que hasta hace poco se dirigió la atención, por el contrario han sido percibidos como sistemas inertes de condiciones constantes (Datry et al. 2006; Stein et al. 2012). Especies y comunidades de algunos ecosistemas dependen parcial o totalmente del agua almacenada en un acuífero debido a que requieren condiciones de humedad permanente, especialmente los de zonas áridas/semiáridas o durante estación de secas (The NSW Office of Water 2015; Puri 2006). De hecho, la disponibilidad de agua es una de las principales influencias en la distribución y permanencia de especies (Morris et al., 2014). La mayor amenaza y fuente de degradación para los ecosistemas que dependen de los acuíferos (ecosistemas acuáticos, rivereños, cuevas y otros) es la continua extracción del agua (Groffman et al 2003 en Francis & Chadwick 2013b; Arreguín 2011). A medida que dicha extracción se intensifica se genera una recarga inducida: el agua superficial se drena al acuífero⁸ lo cual resulta en el agotamiento o desecación de los ecosistemas dependientes (Hancock et al. 2005 en Humphreys 2006). La rapidez de la afectación depende tanto de la difusividad y tamaño del acuífero, como de la distancia de la zona

⁸ Dicho fenómeno ocurre solo cuando el agua superficial y el acuífero se encuentran conectados.

de extracción y los ecosistemas dependientes (Jiménez et al. 2005; Armienta & Rodríguez 2005; UNESCO 2010; Wong et al. 2012). Aún si la extracción es detenida, la recarga natural del acuífero requiere varios años o décadas, dependiendo de los factores antes mencionados (Bayari et al. 2006).

En el caso del acuífero de Aguascalientes la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos fue tan intensiva que en tan solo 40 años (1940-1980) se abatió el nivel estático del acuífero trayendo como resultado la desaparición de los manantiales de la ciudad junto con la flora y fauna que dependían de ellos (COTAS 2006; CEPLAP 2011).

Asimismo, la sobreexplotación y la contaminación (particularmente el exceso de materia orgánica y la disminución de oxígeno disuelto) del agua subterránea afectan directamente a las especies del subsuelo (estigofauna) que son comunidades endémicas vulnerables y sensibles que habitan los acuíferos, en especial a los estigobiontes⁹ pues su ciclo de vida entero ocurre en aguas subterráneas (Datry et al. 2006; Humphreys 2006; Fenwick 2006). La importancia de la estigofauna radica en el servicio de regulación que brindan al purificar el agua que se filtra al subsuelo, descomponiendo contaminantes, materia orgánica y nutrientes; su presencia está relacionada con la calidad del agua (Stein et al. 2012).

En las zonas de aridez, la vegetación está controlada por la composición del agua subterránea y el nivel del manto freático. Por ello, las adaptaciones radiculares se extienden a diferentes profundidades, desde unos pocos centímetros (capa superficial)

⁹ Los invertebrados que habitan en los acuíferos se dividen en 3 categorías ecológicas: Estygoxenes son especies de la superficie encontrados accidentalmente en el acuífero, estygophiles son especies que pueden habitar tanto en aguas superficiales como subterráneas y etigobiontes especies estrictamente adaptadas a las aguas subterráneas (Stein et al. 2012).

hasta varias decenas de metros (capa profunda). En la capa profunda el agua es por lo general abundante y permanente; dicho suministro es alcanzado únicamente por las plantas freatofitas, que son un grupo ecológico de arbustos y árboles siempre verdes de enraizamiento profundo (de hasta 60m) independientes del agua de lluvia. En México destacan el Mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.), el Junco (*Koeberlinia spinosa* Zucc.), el Citabaro (*Vallesia glabra* Cav.) y la Granadilla (*Maytenus phyllantoides* Benth.) A pesar de las adaptaciones y estrategias desarrolladas por la vegetación ante la escasez de agua y el bajo contenido de humedad del suelo, el descenso del nivel del manto freático (ocasionado por la sobreexplotación) afecta los estratos donde se alojan las raíces exponiéndolas a la desecación de sus células radiculares ocasionando la pérdida de su turgencia y finalmente la muerte (Chambel 2006; Israfilov et al. 2006; González 2012).

Si bien existe conciencia sobre la pérdida de biodiversidad en Aguascalientes, su disminución se atribuye a actividades económicas y urbanas como el cambio de uso de suelo, modificación de la cobertura vegetal, ganadería entre otros. Hasta el momento no se ha tomado en cuenta la relación entre los disturbios, las etapas sucesivas de la vegetación y la sobreexplotación de los acuíferos (CEPLAP 2011).

1.2.2 Impactos sociales

El agua está relacionada con el desarrollo social a través de su influencia en las necesidades básicas de salud, seguridad alimentaria y sustento. El detrimento de la calidad del agua potable (su composición química) es una de las causas más comunes de enfermedad e incluso la muerte. Junto con su escasez se afecta también la producción de alimentos, aumenta la pobreza y la vulnerabilidad de la sociedad

(UNESCO-WWAP 2003). Entre los elementos más comunes que afectan la salud humana a través del consumo de aguas subterráneas contaminadas destacan el arsénico, nitratos, cianuro y microbios patógenos fecales. Sus repercusiones en la población son amplias: problemas renales, endurecimiento de las articulaciones, envenenamiento, afecciones en la piel y huesos, enfermedades gastrointestinales, cáncer y otros (Smith et al. 2000; Shrestha et al. 2003; Yang et al. 2011; Chowdhury et al. 2000; Böhlke 2002; Ortega 2009).

En el caso del acuífero Valle de Aguascalientes se pronosticaba que con el ritmo continuo de extracción del acuífero se promovería el ascenso del agua termal teniendo consigo resultados negativos en la calidad del agua extraída con una mayor concentración de elementos traza (Se, Sb, V, Cr, Mo, Re, Pb, Cu, Cd, Co y Zn) y mineralización (Carrillo et al. 2005). En efecto, resultados de un estudio revelaron la presencia de fluoruros, fenoles, mercurio, cadmio, plomo y nitrógeno amoniacal con niveles elevados muy por encima del límite máximo permisible por la Norma Oficial Mexicana. Dicho estudio mostró una amplia incidencia afectando a una población en un rango de 5 mil hasta casi 300 mil habitantes, que padecían de fluorosis dental, lesiones cutáneas (queratosis palmo-plantares) y daño renal. Entre otras cualidades del agua subterránea de este acuífero destaca su pH bajo, conductividad y dureza elevada (Javier et al. 2011).

El agotamiento de los acuíferos se traduce en escasez y conflictos por agua. Los hidrólogos suelen evaluar la escasez de agua analizando el volumen disponible per cápita. Un área está experimentando escasez de agua cuando el abastecimiento anual está por debajo de 1700 m³ por persona. Cuando el abastecimiento anual está por

debajo de 1000 m³ por persona la población se enfrenta a escasez de agua y por debajo de 500 m³ a "escasez absoluta". Una quinta parte de la población mundial, 1,2 millones de personas, vive en zonas que sufren escasez de agua (UN-WATER 2010).

En las regiones áridas y semiáridas la escasez de agua es endémica por lo que presentan mayor vulnerabilidad por su grado de dependencia de las aguas subterráneas, el agotamiento de este recurso conlleva a una desigualdad y marginación de grupos sociales, asimismo puede exacerbarse en zonas más bajas o transfronterizas. De esta situación surge una tensión política e incluso inestabilidad gubernamental como fue en su momento el caso de Bolivia (Houdret 2006). Este escenario se torna más complicado al acentuarse la competencia entre distintos consumidores y la gestión pública del recurso promoviendo movimientos de rechazo frente a las estrategias tomadas, esto incluye los sectores económico, agrícola, industrial, además del consumo urbano. (UN-WATER 2010; Sainz & Becerra 2003).

No es de extrañarse que más de la mitad de conflictos (60%) por agua registrados en México (anexo 5) ocurran donde los acuíferos han sido sobreexplotados (Sainz & Becerra 2003). El resultado final de la sobreexplotación es el abandono del pozo de extracción pudiendo producir en el caso más extremo una emigración masiva hacia lugares con mayor disponibilidad hídrica (Bosch 2001). Situación perfectamente ejemplificada por la sobreexplotación acuífera en Aguascalientes, donde de 76 pozos abandonados al menos 26 fueron completamente agotados y 13 fueron dejados por la falta de maquinaria (equipo de extracción a mayor profundidad) o debido a la contaminación; los dueños de dichos pozos migraron a otras regiones de México o Estados Unidos de América tras perder su sustento (El Banco Mundial 2009).

Previo a su desaparición, los manantiales brindaban seguridad de acceso a agua limpia y a espacios de esparcimiento a los habitantes de Aguascalientes (COTAS 2006). Actualmente dependen por completo del agua subterránea para llevar a cabo su vida cotidiana, ignorando la precariedad hídrica en la que se encuentran pues el estado de Aguascalientes experimenta una escasez absoluta de agua desde los años noventa (IMAE 2015; H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014c).

1.2.3. Impactos económicos

Existen tres fenómenos geológicos principales provocados por la alteración del agua subterránea (descenso del manto freático y cambio del flujo) que generan conflictos de tipo económico; el primero es el colapso, este fenómeno se origina por la desecación y movilización del suelo que reducen la resistencia del terreno, lo que genera en la mayoría de los casos la inestabilidad estructural del techo carbonatado del suelo resultando en el colapso. China y Estado Unidos de América son los países con mayor número de casos, las dimensiones promedio de los colapsos son 20 m de diámetro y 10 m de profundidad (Bosch 2001) provocan daños a bienes muebles (ej. vehículos) e inmuebles (ej. infraestructura, vivienda y vialidades).

El segundo fenómeno ocasionado por la extracción intensiva es el hundimiento diferencial o subsidencia, a diferencia del colapso esta problemática es gradual y se agrava con otros fenómenos como monzones, incremento del nivel del mar entre otros. la subsidencia ocurre con mayor rapidez en zonas metropolitanas como Las Vegas, Ciudad de México, París, Venecia y Shanghái donde la extracción es considerablemente mayor, llegando a registrar hundimientos de 10 cm por año (Waltham 2002; Chaussard et al. 2013; Chaussard et al. 2014). Algunos ejemplos de

asentamiento de terreno en la república mexicana son la ciudad de Celaya, Querétaro, la ciudad de Aguascalientes y la zona conurbada de Torreón (Arreguín 2011; Chaussard et al. 2014; H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b)

El tercer fenómeno producido por la sobreexplotación acuífera es el agrietamiento; en el acuífero del Valle de Aguascalientes el uso excesivo de las aguas subterráneas ha generado grietas superficiales que se extienden por más de 300 km de longitud. Esto provoca serios daños en aproximadamente 3500 inmuebles, así como a la infraestructura pública (redes hidráulicas, energéticas, etc.) y vialidades, principalmente en las ciudades de Aguascalientes, Jesús María, Pabellón de Arteaga y San Francisco de los Romos (CEPLAP 2011; Pacheco et al. 2011).

Las pérdidas económicas por colapso y subsidencia varían desde unos miles hasta billones de dólares (USD). Un ejemplo sobresaliente es el megaproyecto “*The Gate Garuda*” en la ciudad de Yakarta. Esta ciudad costera se hunde a un ritmo acelerado de 14cm por año. El objetivo de dicho proyecto de intervención es construir 17 islas que funcionaran como un dique de protección marina para la ciudad y como un nuevo desarrollo urbano que dará vivienda a 2 millones de personas y muchas otras funciones; el proyecto se desarrollará en 30 años y supone una inversión de \$40 billones (UDS) (Kuiper Compagnons 2015).

En relación con los procesos productivos (agrícolas e industriales) la contaminación y el descenso del manto freático provocan la disminución del gasto y rendimiento de los pozos. De la misma forma el incremento en los costos de extracción y potabilización acentúan la pérdida de rentabilidad de las actividades productivas; por un lado estas

circunstancias orillan a los actores con menor capital al abandono de su actividad y por otro lado se genera acaparamiento, pues únicamente aquellos actores capaces de costear una mayor inversión continuarán sus actividades (Houdret 2006). En México, por ejemplo, fue el caso del sector agrícola del acuífero Costa de Hermosillo. Después del descenso drástico del manto freático solo los agricultores más ricos con mejores bombas tuvieron acceso al agua; en Celaya, el incremento en los costos de extracción obligan a los ejidatarios a utilizar pozos compartidos (El Banco Mundial 2009). Referente al sector industrial el agua dura o con alta concentración de minerales disueltos incrementa los costos de operación al reducir la eficiencia de las tuberías y deteriorar el funcionamiento de maquinarias por calcificación.

1.3 Políticas de gestión del agua subterránea

Los problemas asociados al manejo de agua subterránea y el derecho a su uso pueden vincularse a cuestiones de inequidad (en el número de usuarios, estructuras, organizaciones) y a la capacidad del Estado para ejercer la ley. En países desarrollados los derechos de agua subterránea están bien estipulados ya sea por su fuerza gubernamental o por el menor número de usuarios; en el caso de los países en vías de desarrollo este derecho no está bien definido lo cual dificulta la regulación. Antiguamente se utilizaban varios sistemas tradicionales de manejo de aguas subterráneas hasta su colapso ocasionado por el uso de pozos profundos y el descenso del manto freático (Wegerich 2006). La definición de la gobernanza de las aguas subterráneas adaptada por la UNESCO enuncia: *“Es el proceso mediante el cual cualquier autoridad competente administra sus recursos de agua subterránea, a través*

de la aplicación de los principios de responsabilidad, participación, información y transparencia, y de las reglas jurídicas. Es el arte de coordinar las acciones administrativas entre los distintos niveles territoriales desde el local hasta el global". Los mayores retos de la gobernanza de aguas subterráneas son el énfasis centrado en el agua superficial y la falta de protección de los acuíferos contra la contaminación superficial ocasionada por aspectos normativos y regulatorios deficientes; asimismo nuevas tendencias y tecnologías plantean nuevos retos como la hidrofracturación y actores involucrados de manera indirecta en la decisiones públicas y privadas (UNESCO 2012). Si bien la mayoría de las naciones definen el agua subterránea como un recurso público su acceso es esencialmente privado representado por aquellos con el capital necesario para extraerla (UNESCO 2012).

1.3.1 Las aguas subterráneas en la política internacional

Las políticas internacionales constituyen una guía para de gestión del agua para las naciones, pues permiten el intercambio de conocimiento, la colaboración y promueven el compromiso para enfrentar problemáticas prioritarias. Por lo tanto sus esfuerzos se ven reflejados en el cumplimiento de metas y diseño de guías para llevarlas cabo. A continuación se muestran algunos de los organismos más importantes en materia de aguas subterráneas.

La Organización de las Naciones Unidas en materia de agua (ONU-Agua) busca coordinar a sus miembros y colaboradores para dirigir la atención hacia áreas prioritarias para alcanzar la sustentabilidad. Específicamente en la Meta B1 sobre mejoramiento del control de la extracción de agua dulce en función de los recursos hídricos disponibles sosteniblemente. Considera tres aspectos; [1] la relación

extracción-disponibilidad, [2] el equilibrio de la demanda de agua subterránea y superficial y [3] la capacidad de almacenamiento per cápita (UN-WATER 2014).

El Consejo Mundial del Agua (WWC por sus siglas en inglés) es una plataforma internacional formada por diversas organizaciones, tecnócratas y expertos; busca debatir y compartir experiencias en temas hídricos catalizando iniciativas y actividades que convergen en los Foros Mundiales del Agua donde participan jefes de gobierno, empresas, ONG's y representantes técnicos. Algunas de sus iniciativas/conclusiones resultantes del 4°,5° y 6° Foro (WWC 2015):

- 1 Desarrollar programas nacionales de acción estratégica para acuíferos prioritarios explotados.
- 2 El manejo sustentable de aguas subterráneas, desalinización y tratamiento de aguas residuales debe formar parte de estrategias nacionales.
- 3 Deben desarrollarse nuevos proyectos para represas de agua subterránea, captación pluvial y rehúso de aguas tratadas.
- 4 La escorrentía de aguas pluviales y zonas de descarga deben tomarse en cuenta al diseñar infraestructura para crear reservorios de agua subterránea.
- 5 Promoción de la sustentabilidad de aguas subterráneas utilizando nuevas tecnologías para la recarga artificial.
- 6 Promover la creación de comités de microcuencas y aguas subterráneas (México como modelo con los llamados COTAS en el 4° Foro).
- 7 Tomar las medidas necesarias para proteger los recursos hídricos del subsuelo, ej. Minimizar la contaminación industrial y el uso de pesticidas y fertilizantes.

8 La diversificación de fuentes de agua y actividades productivas incrementa la resiliencia de las comunidades ante cambios globales y crisis del mercado.

El Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC, por sus siglas en inglés) facilita y promueve el intercambio de conocimiento para mejorar la evaluación y manejo de aguas subterráneas, por medio de su colección de información, guías y protocolos (IGRAC 2015).

El Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas (GW-MATE) del Banco Mundial ofrece asistencia estratégica brindando consultas y consejos sobre sistemas de manejo mejorados y protección del agua subterránea. Produjo una serie de 12 notas informativas sobre la Gestión Sustentable del Agua Subterránea que brindan información concisa sobre las diferentes facetas de la gestión sustentable (WB 2015). Las temáticas de la serie se enuncian a continuación: [1] alcances y práctica, [2] caracterización de acuíferos, [3] estrategias de gestión, [4] legislación y reglamentos, [5] derechos de extracción, [6] gestión participativa, [7] instrumentos económicos, [8] protección de la calidad, [9] Planificación nacional, [10] los COTAS, [11] utilización de agua subterránea no renovable y [12] recarga con aguas residuales.

1.3.2 Normatividad y legislación del agua subterránea en México

La política hídrica en México ha cambiado de enfoque con el tiempo, actualmente la prioridad nacional se encauza a la sustentabilidad, buscando mecanismos que garanticen equilibrios a largo plazo; sin embargo una gran cantidad de voluntades y servidores públicos están involucrados de tal modo que se dificulta dicho objetivo (CONAGUA 2010). Su legislación en materia de concesión puede considerarse

moderna pues prevé mecanismos maleables de reasignación de derechos o mercado del agua, satisfaciendo así la creciente demanda (Hernandez 2010).

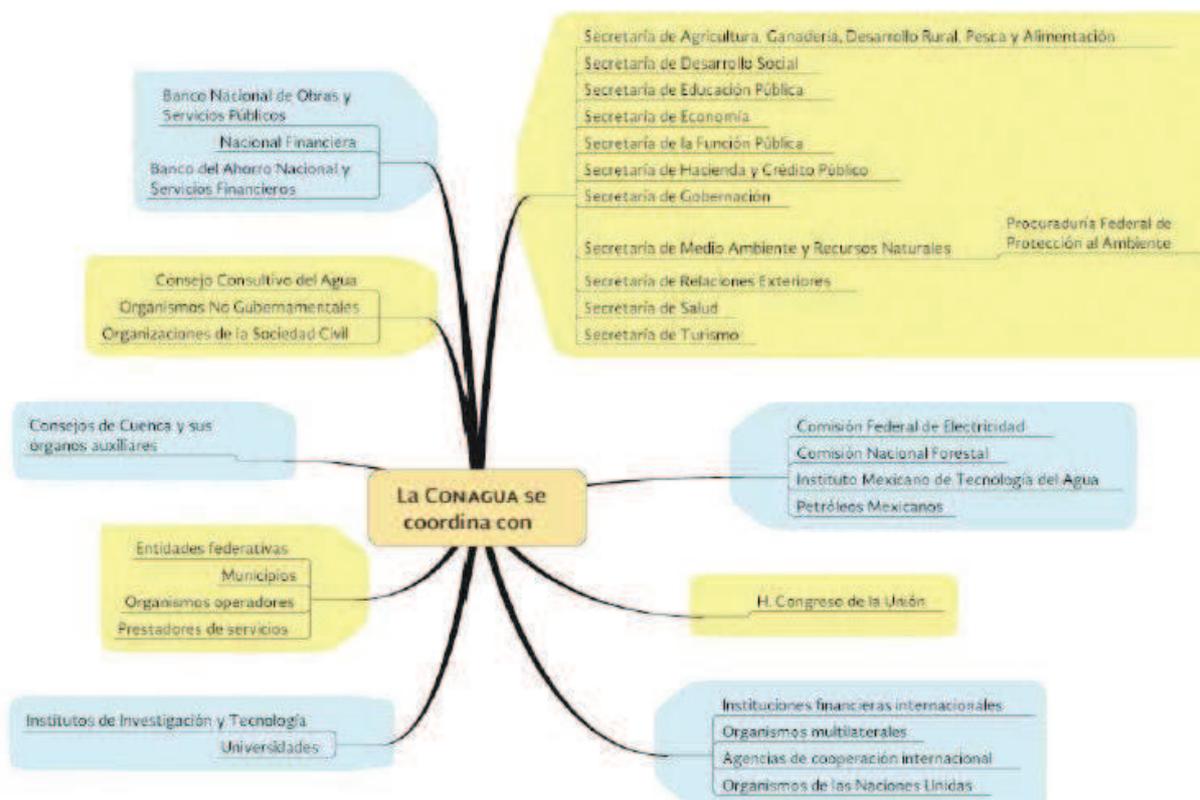
El marco legal en materia de agua es la Constitución Política de Los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 27. Dicho precepto legal se reglamenta a través de Ley de Aguas Nacionales (LAN) y se complementa con instrumentos normativos, de ordenamiento y de planeación a diferentes escalas. comenzando por el Plan Nacional de Desarrollo (PND) en su estrategia 2.3 busca promover el manejo integral y sustentable del agua desde una perspectiva de cuencas. Posteriormente mediante la Agenda Azul del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PSMARN) cuya meta es garantizar la gestión integral de los recursos hídricos por medio del manejo sustentable de cuencas y acuíferos. Continuando con el Programa Nacional Hídrico que a su vez deriva en 13 Programas Hidráulicos Regionales (Serrano & Núñez 2002). Dichos planes y programas delinean el futuro hídrico a corto, mediano y largo plazo del país mediante estrategias y líneas de acción (CONAGUA 2013d).

La autoridad encargada de administrar y preservar los recursos hídricos nacionales es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) su gestión está constituida por una red compleja y amplia conformada por instituciones, dependencias, organismos operadores y los prestadores de servicios locales que se vinculan en cuatro ámbitos de gobierno (federal, regional, estatal y municipal) (figura 3) (CONAGUA 2013c); en materia de acuíferos destaca la presencia de los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) como órganos auxiliares de los Consejos de Cuenca¹⁰. Su objetivo es

¹⁰ La LAN establece que los consejos de cuenca son órganos colegiados de integración mixta, e instancias de coordinación, concertación, apoyo, consulta y asesoría entre la Conagua (incluyendo el organismo de cuenca que corresponda) y las dependencias, las entidades, las instancias

alcanzar el uso sustentable del agua en los acuíferos del país. Los 82 COTAS se constituyeron mayormente en regiones con algún tipo de problemática, como la poca disponibilidad, vedas, conflictos y presión fuerte (anexo 6) (CONAGUA 2012).

Figura 1.3 Principales instituciones y dependencias en coordinación con la CONAGUA



Fuente: CONAGUA 2013c

El agua subterránea es propiedad de la nación, pero es posible transmitir su dominio a particulares para ser libremente alumbrada bajo las delimitaciones del ordenamiento nacional, donde se establece su disponibilidad (veda, reserva y reglamento). Dicha concesión es otorgada por la CONAGUA, del mismo modo está facultada para expropiar y negar la concesión cuando exista interés público o afectaciones; verbigracia

gubernamentales, los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad en la respectiva cuenca o región hidrológica.

casos de escasez, sobreexplotación o necesidad de reserva (CPEUM 2014; Arreguín 2011; Hernandez 2010). A pesar de que las concesiones son una herramienta eficaz de administración su efectividad se ve reducida debido a la falta de atención y respuesta oportuna de solicitudes (Hernandez 2010) resultando en la perforación clandestina y desmedida de pozos. Otros factores que ha intervenido en este fenómeno son: la corrupción de funcionarios federales encargados de administrar las aguas subterráneas e históricamente los diversos programas federales destinados a la perforación de pozos para apoyar a los productores agrícolas (Marañón-Pimentel 1999).

1.3.3 Las aguas subterráneas en la política local

A nivel local cada entidad federativa es la encargada de administrar y regular su territorio, por tanto su normatividad y gestión pueden diferir entre entidades; acatándose a la políticas nacionales mencionadas en el apartado anterior. Los instrumentos que regulan el ordenamiento territorial en Aguascalientes hasta lo local y por ende en materia de aguas subterráneas son los siguientes programas básicos (SEGUOT 2014a; H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b; H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014c):

Programa Estatal de Desarrollo Urbano Aguascalientes 2013-2035 (PEDUA)

- Lineamientos generales para la conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población enuncia: para el crecimiento urbano, se tomaran en cuenta las zonas de recarga de acuíferos determinadas como zonas de conservación.

Programa de Desarrollo Urbano del Municipio de Aguascalientes 2013-2035 (PDUMA)

- Estrategia 2.2.2 Regulación del crecimiento urbano para conservar áreas de recarga

- Estrategia 12.2.8.1 Compensar el déficit de extracción a través de la captación y retención del agua de origen pluvial.

Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Aguascalientes 2013-2040 (PDUA)

- Objetivo específico 7. Promover el uso y distribución más eficiente del agua potable pluvial y tratada, para disminuir el déficit hídrico contribuir a la recarga del acuífero
- Línea estratégica 1. Elaborar un proyecto para la reutilización y purificación de las aguas grises para consumo humano, así como un proyecto integral de reinyección.

CAPÍTULO 2 LA CONTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS VERDES URBANAS A LA RECARGA DE ACUÍFEROS

A pesar de que el entorno urbano es eminentemente impermeable, aún se produce la infiltración en el subsuelo, sea de manera imprevista o intencionada mediante proyectos de recarga artificial; en los últimos años esta práctica ha tenido mayor presencia en todo el mundo como un mecanismo de respuesta ante la necesidad y escasez de agua disponible para consumo humano. En países desarrollados la operación de recarga artificial es percibida como una fuente de apoyo para el suministro urbano y su inclusión en la planificación hídrica es cada vez más importante, pues forma parte de la búsqueda de un sistema integral de gestión del agua. Gracias a su abundancia y prosperidad económica pueden costearse macro-proyectos, plantas operativas (o en fase experimental y otros métodos de infiltración que forman parte de un sistema de recarga. Cada país utiliza el método más apropiado para cada caso, su aplicación no se limita al uso urbano sino también sirve como métodos de restauración de ecosistemas,

para compensar balances deficitarios en los acuíferos y desplazar aguas subterráneas no deseadas de mala calidad (Murillo et al. 2000).

Por otro lado en países en vías de desarrollo, la recarga de acuíferos ocurre por infiltración incidental. De hecho, en ciudades establecidas en climas áridos este tipo de infiltración representa una aportación importante a la recarga de acuíferos. La infiltración incidental puede originarse a partir del subsuelo o superficialmente. En el primer caso, el agua proviene de instalaciones de saneamiento ya sea *in situ* como fosas sépticas y letrinas o derivada de fugas en el sistema de drenaje. En el segundo caso se hace referencia a la escorrentía superficial que percola, ya sea desde el fondo de ríos o arroyos alimentados por la descarga continua de aguas residuales o a través de espacios permeables (ej. áreas verdes y pavimentos porosos). En ambos casos la aportación hídrica está saturada de elementos que alteran la calidad de los acuíferos. Dependiendo de su origen, la composición de esta fuente de agua puede contener materia orgánica, nutrientes en exceso, microorganismos patógenos, metales pesados, carbono orgánico disuelto y compuestos orgánicos tóxicos. Como se expuso en el capítulo anterior, estos factores ponen en riesgo la integridad del subsuelo y la calidad de las aguas subterráneas; el grado de afectación depende de la vulnerabilidad del acuífero (ej. los someros y fracturados son más sensibles), el nivel de tratamiento del agua residual o grado de disolución y de la rigurosidad normativa, incluyendo su aplicación (Garduño et al. 2006).

La infiltración intencionada tiene como objetivo mitigar el estrés del acuífero, aumentar la disponibilidad de agua y tratar las aguas residuales, pretende alcanzar un manejo más racional e integral del recurso hídrico a través de diversas técnicas y métodos (de

captación y almacenaje de aguas para la recuperación de acuíferos) a los que se refiere comúnmente como gestión de recarga artificial de acuíferos o MAR por sus siglas en inglés (anexo 7) (IGRAC & Acacia Institute 2007; Ward & Dillon 2012). Al igual que la infiltración incidental, la recarga artificial puede dividirse en superficial y en profundidad.

Los métodos superficiales corresponden a superficies permeables, zanjas, lagunas de infiltración o acondicionamiento de causes que permiten infiltrar agua de baja calidad utilizando la zona vadosa como sistema depurador de menor costo que las plantas de tratamiento; estos métodos requieren suelos permeables y una extensión de terreno considerable. Los sistemas en profundidad se basan en técnicas de inyección de agua directamente al acuífero por medio de pozos verticales, drenes y galerías; la ventaja de dichas técnicas es que requieren un espacio mínimo, pero el agua a infiltrar debe ser de óptima calidad. Una desventaja siempre presente en ambos sistemas es la colmatación¹¹ o reducción de la efectividad de la recarga, lo cual implica una limpieza periódica que en ocasiones requiere procesos especiales que puede tomar desde días hasta meses (Cortez 2012).

Cabe mencionar que aun cuando la recarga artificial enriquece los acuíferos, al estimular la producción y composición de la estigofauna, se debe prestar especial atención a la calidad del agua a infiltrar y a la capacidad de filtración del suelo para no sobrepasar los niveles adecuados que permitan una correcta depuración y así evitar resultados contraproducentes. En el mundo existen cerca de 500 instalaciones de MAR, entre los países con mayor número de proyectos se encuentran los Estados Unidos de América, India, Holanda, Australia, España y Alemania, a su vez países con

¹¹ La colmatación ocurre cuando la porosidad o área de infiltración disminuye por distintos procesos, estos son: físicos, biológicos, químicos, por aire/gas y por compactación (Cortez 2012).

considerables problemáticas en acuíferos (IGRAC 2012; Fernández 2004; IGRAC & Acacia Institute 2007).

Las técnicas MAR ofrecen una alternativa menos costosa de aprovisionamiento de agua, especialmente para asentamientos humanos en regiones áridas y semiáridas; sus aplicaciones son muy amplias y variadas y permiten también distinta capacidad de recarga. A pequeña escala estos sistemas se construyen y gestionan por medio de la participación comunitaria y tiene lugar primordialmente en áreas rurales. Los sistemas a mediana escala son más complejos y requieren profesionales expertos para el diseño y construcción; su manejo se realiza usualmente bajo el cargo de autoridades municipales. Finalmente, los sistemas a gran escala por ejemplo grandes embalses o bancos de infiltración- son implementados por la autoridad nacional o compañías de abastecimiento de agua. Es importante mencionar que si bien la tasa de recarga de los proyectos a pequeña escala es considerablemente menor, ésta puede compensarse realizando un mayor número de estructuras; por ejemplo, un embalse de arena puede repetirse en forma de cascada en un mismo arroyo incrementando así la tasa de infiltración (IGRAC & Acacia Institute 2007; Dillon 2005).

Cuadro 2.1 Escalas de MAR

Escala	Tasa de infiltración
Muy baja	< 50 millones m ³ / año
Pequeña	50 - 200 millones m ³ / año
Mediana	200 - 2000 millones m ³ / año
Grande	> 2000 millones m ³ / año

Fuente: modificado de IGRAC & Acacia Institute (2007)

Otro aspecto a considerar es la fuente de agua utilizada para la recarga artificial. Su disponibilidad y calidad es un prerequisite esencial para no alterar negativamente los acuíferos. Existen cuatro fuentes principales: [1] el agua superficial que incluye ríos y lagos cuya corriente es desviada hacia instalaciones de infiltración. [2] La escorrentía de tormenta, altamente variable en cantidad y calidad, proviene de áreas rurales y urbanas. [3] El agua reciclada, fuente de calidad constante y tasa uniforme, aunque su conexión al sitio de recarga suele significar más inversión es preferible para el tratamiento suelo-acuífero. [4] Agua potable, se utiliza en proyectos de almacenamiento subterráneo y recuperación, el agua es inyectada y confinada en una burbuja de agua potable, en zonas áridas de Medio Oriente el agua proveniente de desalinizadoras es inyectada para tener un reservorio para asegurar la disponibilidad ante emergencias (UNESCO 2005).

En el cuadro 2 se muestran algunas de las principales ventajas y desventajas de las diversas técnicas y/o métodos MAR. Es importante considerar que una limitante urbana en la recarga artificial se relaciona con la compatibilidad del uso de suelo, ya que las técnicas MAR requieren de una superficie o espacio para llevarse a cabo; en las ciudades el suelo resulta ser un bien escaso y por tanto de gran valor económico, el régimen de propiedad y el marco normativo acompañan dicha restricción. Sin embargo, el uso de áreas verdes o la adecuación de superficies construidas puede ser la mejor oportunidad de acción, funcionando y sosteniéndose en conjunto.

Cuadro 2.2 Principales ventajas y desventajas de los MAR.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Métodos extensivos	Infiltración de grandes cantidades agua a bajo costo; mantenimiento simple; depuración de contaminantes mediante la infiltración; surcos y canales pueden instalarse bajo tierra	Requiere una gran extensión permeable; potencial foco de contaminación, enfermedades; alta evaporación
Banco de infiltración inducida	Infiltración de grandes cantidades agua a bajo costo; depuración de contaminantes mediante la infiltración	Alto nivel de complejidad en el diseño, construcción, operación y mantenimiento; monitoreo continuo; alta probabilidad de colmatación
Pozos profundos de inyección	Infiltración de grandes cantidades agua a bajo costo; no requiere espacios extensos	Alto nivel de complejidad en el diseño, construcción, operación y mantenimiento; monitoreo continuo; Requiere agua de alta calidad
Pozos someros	Puede utilizar instalaciones ya construidas	Requiere agua de alta calidad
Modificación en canales	Las estructuras están instaladas en el lecho del arroyo; bajo costo y mantenimiento; no interfiere con el uso de suelo	Posibles afectaciones río abajo; susceptible a la contaminación superficial; menor infiltración; difícil control de la calidad del agua; estructuras afectadas fácilmente con corrientes fuertes
Recolección de escorrentía	Bajo costo; diseño, operación, construcción y mantenimiento muy simples; previene la erosión	Infiltra muy poca cantidad de agua

Fuente: modificado de IGRAC & Acacia Institute (2007)

2.1 La multifuncionalidad de las áreas verdes y su papel en la recarga de acuíferos

En este documento definimos a las áreas verdes bajo un enfoque amplio dentro del contexto urbano. Con ellas se hace referencia a todas las superficies permeables de la ciudad que son susceptibles de alojar vegetación. De esta manera se consideran: parques, jardines, patios, zonas arboladas, lotes baldíos, zonas ribereñas, camellones, jardineras, áreas naturales, áreas de reserva urbana, pavimentos permeables modulares, techos verdes, entre los principales espacios.

Las áreas verdes se encuentran en todas las ciudades, aunque en diferente proporción dependiendo de la región y la complejidad de la traza urbana; comprenden espacios públicos y privados que pueden no necesariamente tener una cobertura vegetal. Las áreas verdes son esenciales para las ciudades pues proveen un gran número de servicios ecosistémicos (figura 2.1) que ayudan a restaurar el balance natural en los sistemas urbanos, además de transforman a las ciudades en entornos más habitables. A pesar de estas virtudes se prescinde de ellas y se les deja en última prioridad gracias a los criterios de rentabilidad urbana (Francis & Chadwick 2013a; Carabias & Herrera 1986; FAO 2000).

Cuadro 2.3 Servicios ecosistémicos provistos por áreas verdes en las regiones urbanas

Grupo	Servicio ecosistémico	Referencias
Aprovisionamiento	Productos maderables	Matero et al. (2003) y Brauman et al. (2007), Xiao et al. (1998)
	Alimentos	
	Agua y suelo	
Reguladores	Microclimáticos	McPherson et al. (1997), Jo and McPherson (2001), Lebel et al. (2007), McHale et al. 2007, Balvanera et al. (2005), de Groot et al. (2002), Givoni (1991), McPherson et al. (1997), Nowak et al. (2006), Bowker et al. (2007), AAC (2002), Bolund and Hunhammar (1999), Guo et al. (2000), Ewel (1997), Bolund and Hunhammar (1999), Nabham and Buchmann (1997), Thomson and Goodell (2001), Daily et al. (1997), de Groot et al. (2002), Coutss et al. in press y Pickett et al. (2011), Carabias & Herrera (1986), Goddard et al. (2010), Romeiro et al. 2007
	Ciclos gaseosos	
	Secuestración de carbono	
	Provisión de hábitat	
	Evita la erosión	
	Purificación del aire y suelo	
	Barrera de ruido	
	Infiltración	
	Reducción de escorrentías	
Polinización		
Producción de humus y nutrientes		
Culturales	Recreación	Postel and Carpenter (1997), Bolund and Hunhammar (1999), Amberger (2006), Grahn and Stigsdotter (2003), Butler et al. (2005), Gidlof-Gunnarsson and Ohrstrom (2007), Hansmann et al. (2007) Tzoulas et al. (2007), Bolund and Hunhammar (1999) Matero et al. (2003), Zhou & Rana (2012); Francis & Chadwick (2013)
	físico y psicológicos	
	Educación e investigación	

Fuente: modificado de Kremen 2005 en Niemelä et al. (2010)

2.1.1. Servicios ambientales

La vegetación y los cuerpos de agua artificiales reducen substancialmente el efecto de isla de calor urbana, enfriando la superficie construida e incrementando la humedad del aire, lo que genera un microclima que amortigua los cambios mesoclimáticos producto del establecimiento urbano (Coutss et al. in press y Pickett et al. 2011 en Francis & Chadwick 2013a; Carabias & Herrera 1986). Asimismo, las áreas verdes proveen refugio y alimento para una amplia diversidad de especies de flora y fauna, reduciendo la pérdida de biodiversidad (Goddard et al. 2010; Kowarik 2011). También mejoran la infiltración de agua de lluvia, pues el crecimiento y descomposición de raíces incrementa la capacidad de infiltración del suelo, además los arboles interceptan y almacenan agua reduciendo la saturación hídrica del suelo mientras el follaje reduce la erosión del suelo (Xiao *et al.*, 1998 en FAO 2000).

Del mismo modo, coadyuvan a la mitigación de diversos tipos de contaminación urbana pues actúan como un sistema de tratamiento natural de aguas de escorrentías a través de la infiltración, pueden ser utilizadas como áreas de disposición de aguas recicladas y generar al mismo tiempo beneficios económicos como viveros y plantaciones de árboles (FAO 2000). También actúan como barrera de amortiguamiento para el ruido de vehículos y maquinarias (Bolund y Hunhammar, 1999 en Kabisch 2014) y mejoran la calidad de aire a través de la deposición de contaminantes en la copa de los árboles mientras secuestran carbono del aire (FAO 2000). Por último, la vegetación de los espacios verdes puede actuar como un instrumento de remediación para elementos nocivos como metales pesados que afectan la salud de los ciudadanos (Romeiro et al. 2007).

2.1.2. Aportación económica

Dentro del mercado inmobiliario el precio de los bienes inmuebles es heterogéneo. Un factor que influye en la variación de su costo es la calidad ambiental (proximidad a áreas verdes, agua, paisaje, calidad del aire, ruido, etc.) ya que promueve la disponibilidad positiva a pagar por un mayor precio por dicha calidad (Müller 1977 en Miranda 2006). En lo que refiere a áreas verdes el valor de las viviendas se incrementa con la presencia de espacios públicos cercanos, los lotes arbolados contiguos incrementan 60% el valor de la propiedad y el paisaje estético aunque sea mínimo también incrementa los precios de alquiler (Li et al. 2015). Para el Estado las áreas verdes pueden significar una reducción en costos derivados de conflictos con escorrentías pluviales, inundaciones, sobrecarga del sistema de drenaje y otros, en Beijing por ejemplo se obtuvieron beneficios cercanos a \$21 billones (USD) (Zhang et al. 2012).

2.1.3. Aportación social

La Organización Mundial de Salud (OMS) define la salud humana como el completo estado de bienestar físico, mental y social (WHO 1948 en Zhou & Rana 2012); las áreas verdes benefician sustancialmente dicha conceptualización al proveer oportunidades de recreación, promueven la salud física, reducen la fatiga mental y la agresión brindando un sentimiento de paz y tranquilidad. Además, mejoran las relaciones sociales al ser un espacio de reunión e interacción y contribuyen al desarrollo físico y mental infantil (Zhou & Rana 2012; Francis & Chadwick 2013a). Los beneficios mencionados anteriormente son vitales para grupos vulnerables; por ejemplo en zonas marginadas las condiciones de vivienda, suministro de agua y saneamiento son inadecuados, por lo que son más

susceptibles a sufrir problemas sociales de violencia y desempleo. Las áreas verdes contribuyen como un alivio al brindar refugio, fuente de combustible y alimento (Roberts, 1996 en FAO 2000).

Es importantes resaltar la actividad agrícola urbana, ya que extiende las oportunidades de las áreas verdes como una panacea bien documentada en diferentes ciudades del mundo (Guitart et al. 2012) ya que en ella confluyen las tres aportaciones mencionadas anteriormente (ambiental, económica y social) al combinar la producción de alimentos con las áreas verdes (incluyendo los lotes baldíos). Su establecimiento es adaptable a casi cualquier espacio de la ciudad y a diversos tipos de organización y cultura; desde un patio trasero cultivado por una familia para autoconsumo, hasta un huerto comunitario en un parque en el que participan docenas de personas con o sin fines de lucro (de Lange 2011; Boily 2012; Smit et al. 2001) jugando un papel significativo en la construcción del capital sociocultural y promoción de la resiliencia en zonas vulnerables (Birky 2009; Rae Brown 2012).

Algunos de sus beneficios más importantes se enlistan a continuación:

- ❖ Reduce la delincuencia
- ❖ Fomenta la cohesión social
- ❖ Incrementa la biodiversidad
- ❖ Mejorando la imagen urbana
- ❖ Incrementa el precio del suelo
- ❖ Promueve la seguridad alimentaria
- ❖ Incrementa la salud y calidad de vida

- ❖ Es una fuente de ingresos monetario
- ❖ Provee alimento y refugio para la fauna
- ❖ Funge como refugio o hábitat para la biodiversidad

Tanto las áreas verdes como las técnicas de recarga artificial se ven limitadas por la propiedad y rentabilidad del suelo en las ciudades, sin embargo nuevos conceptos de diseño y modelos de gestión hídrica impulsan su inclusión en la planeación urbana.

2.2 Algunos modelos que favorecen la recarga de acuíferos e infiltración mediante áreas verdes

Los modelos que presentaremos en este apartado buscan mejorar la gestión hídrica urbana, or medio de distintas técnicas que utilizan a las áreas verdes como principal componente y soporte. Si bien comparten la mayoría de las técnicas de manejo sus alcances son distintos; por ello enfatizaremos a continuación sus principales características y diferencias.

2.2.1 Sistema de Drenaje Urbano Sustentable (SUDS)

Este sistema, también llamado SUDS por sus siglas en inglés, se ha especializado en la las técnicas de recarga superficial urbana, sirviéndose del agua de origen pluvial o agua de tormenta (la fuente más común para la recarga artificial de acuíferos). El SUDS engloba las mejores prácticas de manejo de drenaje que permiten replicar procesos naturales, principalmente mediante la bioretención y filtración. El desalojo del agua pluvial se basa en dos componentes: la infraestructura gris conformada por el drenaje geocelular y pavimentos permeables que dirigen el agua hacia colectores y por la

infraestructura verde que redistribuye el agua mediante el drenaje o canaletas hacia zonas vegetadas donde percola al subsuelo. (susDrain 2012)

Asimismo, busca reducir los riesgos por inundación y mitigar la contaminación por escorrentías de tormenta mediante tratamientos pasivos con vegetación (en lo que han resultado ser muy efectivos); adicionalmente, permite aprovechar las virtudes de las áreas verdes para enfatizar la estética urbana (Abbott 2005). Este sistema se utiliza ampliamente en distintas ciudades del Reino Unido así como en Portland, Malmö, Tokio y Emscher, por mencionar algunos casos ejemplares donde la desconexión o descentralización del sistema de drenaje ha sido exitoso. En los casos anteriores la participación social y de las autoridades locales permitió un manejo integral del curso del agua en tres escalas: el control desde la fuente (ej. techos verdes), el control de sitio (ej. jardines de lluvia) y el control regional (ej. humedales) (Stovin 2003; susDrain 2012; Gobierno de Islington 2012). Su implantación es adaptable a cualquier espacio en la ciudad (sean escuelas, zonas habitacionales, vialidades, parques, etc.) y a diferentes escalas.

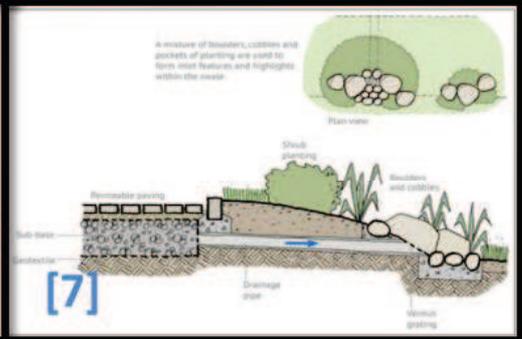
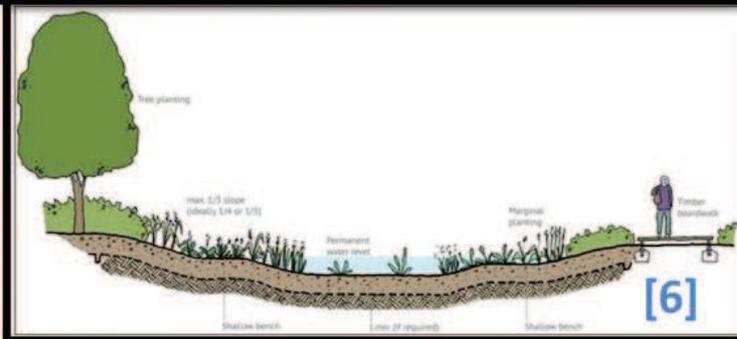
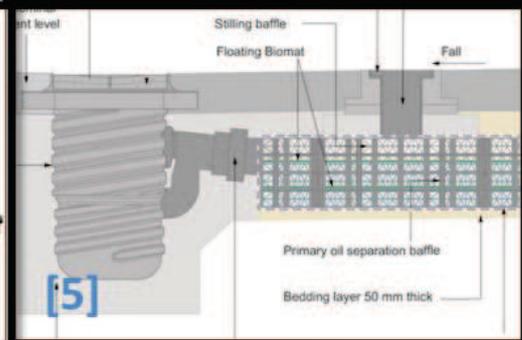
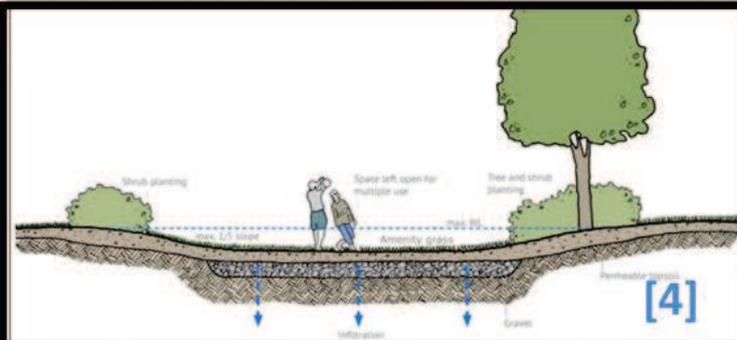
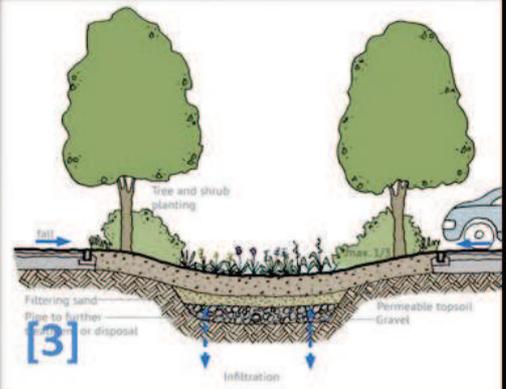
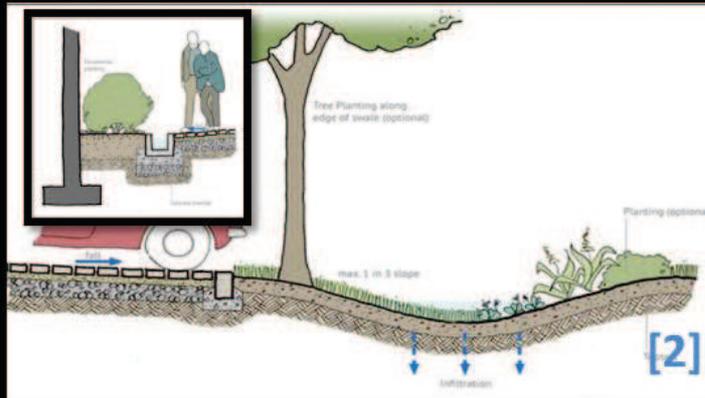
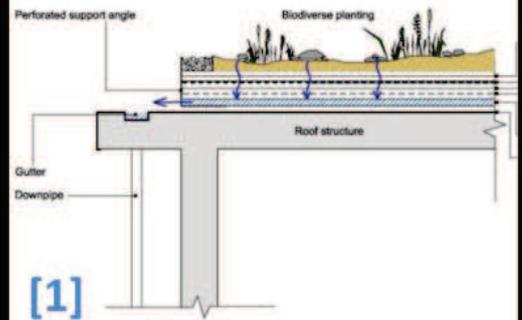
A continuación se describen brevemente sus diversos componentes:

- ❖ Control desde la fuente: su propósito es manejar el agua de lluvia desde el lugar más próximo a su caída por lo cual abarca techos verdes, colectores pluviales a pequeña escala y superficies permeables.
- ❖ Cunetas, canales y arroyuelos: utilizan la pendiente para dirigir la escorrentía hacia otros puntos de control o tratamiento, tiene un buen desalojo durante eventos de tormenta.

- ❖ Filtración: componente principal diseñado para remover sedimentos y contaminantes, principalmente metales pesados e hidrocarburos, mediante fitoremediación y bioretención.
- ❖ Infiltración: pozos someros, trincheras de infiltración y jardines de lluvia, son usados para la captura del agua pluvial pero a diferencia de la filtración su diseño es menos complejo para el tratamiento de contaminantes por tanto se recomiendan para sitios con niveles bajos de contaminación.
- ❖ Retención y detención: conformado por estanques permanentes o temporales (también multifuncionales), tanque geocelular el agua acumulada puede ser reutilizada (estacionamientos) o filtrada al subsuelo.
- ❖ Humedales: área vegetada con plantas macrófitas que recibe descargas de tipo regional.
- ❖ Control de entrada y salida: permiten que las corrientes de agua sean desalojadas de zonas saturadas hacia otros componentes de SUDS. (susDrain 2012)

Figura 2.1 Componentes de los SUDS

- [1] Control desde la fuente: techo verde
- [2] Zanjas y canales
- [3] Filtración: trinchera de bio-retención
- [4] Infiltración: trinchera de infiltración
- [5] Retención y detención: tanque geocelular
- [6] Humedales
- [7] Control de entrada y salida

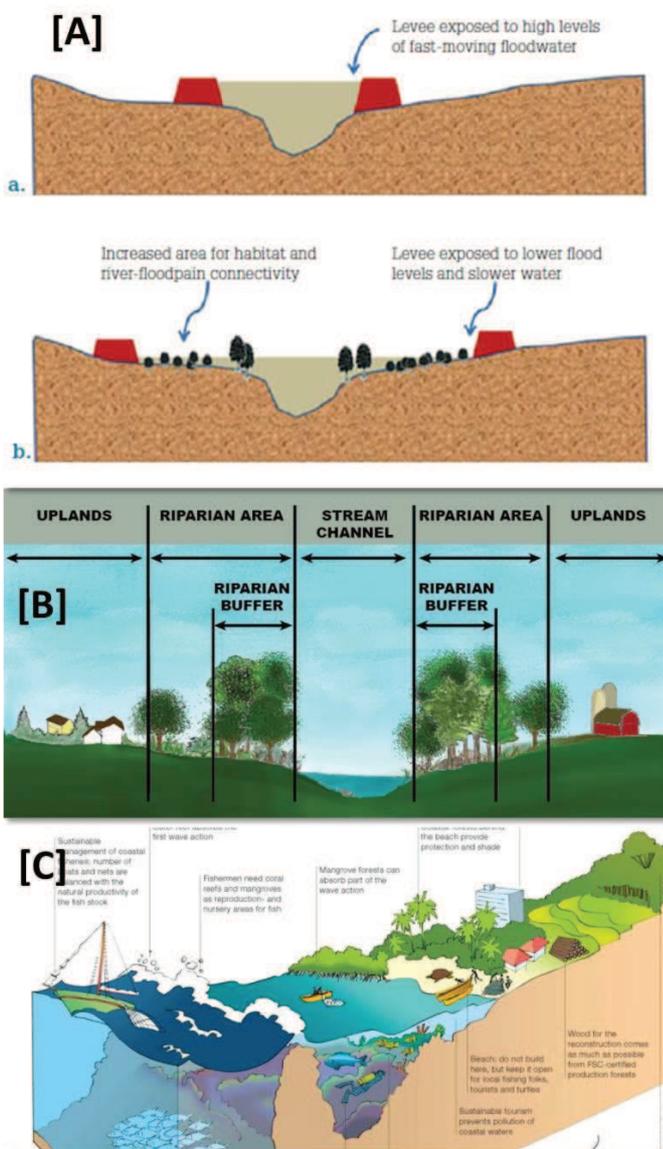


Fuente: compilado de susDrain (2012)

2.2.2 Infraestructura Verde (GI)

La infraestructura verde no es muy diferente de los SUDS pues también busca reducir los riesgos de inundación y mejorar la calidad de agua mientras se beneficia de los servicios brindados por las áreas verdes. Sin embargo, a diferencia de los SUDS, la

Figura 2.2 Infraestructura verde técnicas no incluidas en SUDS



Fuente: Elaboración propia, [A] reconexión de ríos con llanuras aluviales basado en (UNEP 2014), [B] cinturones de vegetación ribereña basado en (EPA 2012) y [C] protección o restauración de manglares y arrecifes basado en (Wetlands International 2015).

infraestructura verde se enfoca mayormente en incrementar la resiliencia de los asentamientos rurales y urbanos ante el cambio climático, respetando la capacidad de carga o límite tolerable de los ecosistemas desde una mayor escala; su rango de acción es más amplio e incluye un manejo a nivel regional o por cuenca. Entre algunas de las soluciones propias de este modelo (no incluidas en SUDS) se encuentran: la reforestación y forestación para combatir la pérdida de biodiversidad y la erosión; los cinturones de vegetación ribereña para reducir la evaporación y la temperatura del agua; la reconexión de ríos con llanuras aluviales; la protección o restauración de manglares y arrecifes

para reducir la vulnerabilidad costera (UNEP 2014).

Un ejemplo de utilización de GI es la ciudad de Nueva York donde su aplicación ha tenido mejores resultados de los esperados. La reducción del volumen de agua pluvial en el sistema de drenaje alcanzó un 25% en un periodo de 3 años (The City of New York 2014). Aparentemente su éxito se debe mayormente a la voluntad política, la rapidez de instauración y la gestión participativa. Para su implementación se creó una oficina especializada en GI que desarrolló un plan de manejo de aguas pluviales con diversos proyectos. Un aspecto destacable es la inclusión de grupos comunitarios en la construcción y mantenimiento de los sitios en zonas públicas y privadas (The City of New York 2011); en la ciudad se utilizan hasta 15 técnicas diferentes, toda la información relativa a este plan y sus proyectos son accesibles a través de su sitio web y un mapa en línea en donde los ciudadanos pueden solicitar apoyo o ingresar su propio proyecto (The City of New York 2015).

2.2.3 Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD)

Esta propuesta incorpora la disponibilidad del agua residual, agua pluvial y agua subterránea al ser definido como un diseño integral del ciclo del agua urbano. Un aspecto diferente de los modelos antes presentados es que busca minimizar la demanda de extracción de agua, promoviendo el reúso de fuentes pluviales y residuales (Chandran & Gowda 2014). WSUD actúa desde un enfoque más gubernamental por lo que se basa en planes de desarrollo que incorporan, entrelazan y reconocen la importancia del diseño urbano, la arquitectura del paisaje y la gestión de agua pluvial. Su objetivo es cambiar la estructura y composición del diseño convencional de áreas urbanas mediante la aportación de diversas prácticas

alternativas de diseño y planeación a nivel local y regional (Bach et al. 2015). En distintas ciudades, notoriamente Filadelfia y Melbourne se han adoptado planes y programas sensibles al recurso hídrico; algunos ejemplos incluyen nuevas políticas de consumo de agua y convenios con instituciones y empresas para implementar elementos de diseño sustentable para la gestión de agua de tormenta, como captadores pluvial, techos verdes y superficies permeables. Tan solo en el año 2000 el gobierno australiano financió más de AUD\$100 millones en iniciativas de manejo de agua pluvial (Bach et al. 2015; Chandran & Gowda 2014).

Una aportación que destaca en este modelo es el uso de herramientas computacionales que permiten modelar la implementación de WSUD con la finalidad de alcanzar una mejor toma de decisiones sobre la gestión y diseño del sistema hídrico urbano. Dichos softwares están diseñados para simular la dinámica espacial y temporal del agua pluvial. Destacan dos softwares: el primero aun en sistema beta es el Simulador de Tecnologías y Ambientes Biofísicos Urbanos (UrbanBEATS por sus siglas en inglés) que se diferencia de otros por su consideración de las interacciones entre la planeación urbana, el WSUD (diseño técnico e integración del paisaje) y el ambiente urbano (uso del suelo, limitantes biofísicas y aspectos demográficos); asimismo la dinámica de simulación de BEATS incluye la repetición alternada de los ciclos de planeación e implementación, lo que permite retroalimentar la información entre los instrumentos de planeación, la infraestructura existente y la infraestructura por construir o adaptar. En segundo lugar el Modelo Conceptual de Mejora de Agua Pluvial Urbana (MUSIC por sus siglas en inglés) donde la planeación y diseño a nivel conceptual

estima el flujo y contaminación del agua pluvial y simula el rendimiento de los dispositivos de manera individual y en conjunto (Wong 2002; Bach et al. 2015).

2.2.4 Consideraciones de los modelos

Es importante recalcar el beneficio del uso de estos modelos, si bien representan solo una parte de las técnicas MAR, contribuyen enormemente en la disponibilidad de agua para su posible uso en otras técnicas de recarga. Al reducir el volumen de agua en el sistema de drenaje se permite un mayor abasto y eficiencia de las plantas tratadoras de aguas residuales, por tanto su capacidad de tratamiento se vuelve excedente convirtiéndose en una fuente de agua para infiltración y se genera un ahorro en futuras expansiones de la red (UNESCO 2005; UNEP 2014; The City of New York 2011).

2.3 Algunas experiencias de recarga artificial en México

La recarga artificial en México comenzó desde mediados del siglo XX con la modificación de canales. Sin embargo la operación de estas técnicas fue interrumpida un par de décadas después debido a inundaciones ocasionadas por la falta de mantenimiento y operación; en décadas recientes se ha retomado la aplicación de técnicas de esta naturaleza. A la fecha existen 12 proyectos de recarga identificados oficialmente por la CONAGUA (anexo 2 [g]); todos hasta el momento con experiencias satisfactorias (Palma et al. 2014). Exceptuando el Valle de México (VM) y Valles Centrales de Oaxaca, los proyectos de recarga están ubicados en regiones con aridez, y déficit de recarga natural. Buscando experiencias afines para analizar únicamente se distinguieron dos proyectos de tipo urbano, el VM y la ciudad de Aguascalientes; sin embargo este último solo es un estudio (no especifica el uso de áreas verdes) por lo

que solo se analiza el caso del VM el resto se abordan solo de manera somera (cuadro 4). Cabe mencionar que pueden existir aún más proyectos de recarga artificial que no están siendo tomados en consideración, en Celaya, Guanajuato se implementan técnicas de dispersión y embalses como respuesta de manejo ante inundaciones, denominadas “zonas de amortiguamiento”, así la recarga del acuífero es tan solo un beneficio colateral (Comisión de Cuenca del Río Turbio 2014).

Cuadro 2.4 Proyectos de recarga artificial en México

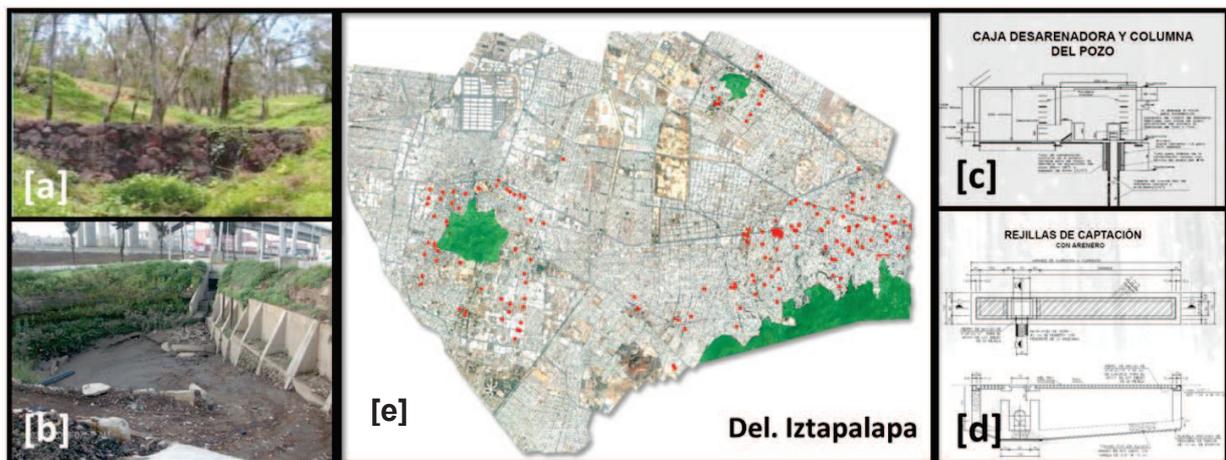
Proyecto	Situación	Método	Técnica	Fuente de agua de recarga	Vol. de infiltración
Valle de México	I-P	Directo	Pozos de absorción	Agua pluvial	50 Mm ³ /año
Aguascalientes	P	Directo	Pozos de inyección	Agua residual tratada	25 Mm ³ /año
Caborca	I	Directo	Pozos de absorción	Agua pluvial	-
Ciudad Juárez	P	Directo	Pozos de inyección	Agua pluvial	-
Valles Centrales de Oaxaca	P	Directo y superficial	Pozos de inyección/presas de infiltración	Agua pluvial, residual tratada y escurrimientos	35 Mm ³ /año
San José del Cabo	P	Superficial	Modificación de causas	Presa	-
Santo domingo	P	Superficial	Presas de infiltración	Presa	40 Mm ³ /año
La Victoria	P	Superficial	Lagunas de infiltración	Presa	15 Mm ³ /año
Región Lagunera	I	Superficial	Lagunas de infiltración	Presa	50 Mm ³ /año
Valle de Palmas	P	Superficial	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada	45 Mm ³ /año
San Luis Río Colorado	I	Superficial	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada	12 Mm ³ /año
Hermosillo	P	Superficial	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada	70 Mm ³ /año

Fuente: modificado de Palma et al. 2014; en columna “Situación” *P - pozos por evaluar, *I – instalado Mm³ = Millones de metros cúbicos

El proyecto de recarga en el Valle de México está conformado por distintas obras de recarga y se ubica específicamente en la delegación Iztapalapa en el Distrito Federal. La problemática hídrica de esta delegación es homóloga a que acontece en la ciudad de Aguascalientes; exceptuando la aridez, coinciden en la mala calidad de agua, inundaciones, agrietamientos en la superficie, hundimientos diferenciales y déficit de agua.

La delegación Iztapalapa tiene el mayor número de zonas con tandeos¹² del Distrito Federal; 363 sitios con tandeo semanales y 545 con tandeo diario. Cabe mencionar que también es la delegación con más pozos de extracción en el DF. Para este proyecto de recarga se aprovecharon las pendientes pronunciadas y las áreas verdes (tres cerros) para conducir la escorrentía superficial hacia 183 pozos de infiltración que captan anualmente alrededor de 16,000m³. Se aplicaron tres técnicas de recarga artificial, la primera consiste en la construcción de 66 gaviones que funcionan como diques filtrantes ubicados en las áreas verdes (cerros); en el área construida la escorrentía pluvial es recolectada mediante rejillas de captación y líneas de conducción filtrantes que transporta el agua hacia la segunda y tercera técnica, los pozos de infiltración con caja drenadora y pozos de absorción a cielo abierto (Hernández 2013).

Figura 2.3 Pozos de absorción de la delegación Iztapalapa



Fuente: modificado de Hernández (2013); [a] gaviones, [b] pozo a cielo abierto, [c] pozo de infiltración y [d] rejillas de captación, [e] .

Si bien es cierto que los ejemplos expuestos anteriormente utilizan áreas verdes, cumplen con el propósito de recargar el acuífero y mitigan las inundaciones; éstos carecen del enfoque integral visto en los modelos expuestos en el apartado anterior,

¹² Tandeo. m. Distribución del agua de riego alternativamente o por tandas. (RAE 2014)

son una solución aislada que no toma en consideración el medio ambiente, la estética o la participación de la comunidad. Por el contrario, son espacios subutilizados cuya ausencia de diseño puede generar otras problemáticas como vandalismo y trampa letal para la fauna nativa; además puede convertirse en un basurero y proveer un hábitat para fauna nociva o convertirse en un foco de contaminación para el acuífero (FAO 2014).

Figura 2.4 Pozo a cielo abierto



Fuente: tomado de Hernández (2013); pozo de absorción a cielo abierto en la colonia Buenavista en la delegación Iztapalapa, se observan llantas y basura el interior además de grafitis.

Otro proyecto más ambicioso de recarga artificial que se llevará a cabo en el valle es un programa de recarga artificial. Como en muchas otras ciudades, la zona metropolitana de valle de México (ZMVM) tuvo un crecimiento demográfico explosivo y una expansión

urbana descontrolada que redujo las zonas de recarga y aumentó la demanda de extracción y producción de aguas residuales, factores que dieron origen a la sobreexplotación del acuífero. Frente este escenario adverso se tomaron medidas correctivas diseñadas desde una escala regional hasta local. A escala regional se generó el Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México (PSHVM) cuyos objetivos principales son: tratar el 100% de las aguas residuales, reducir la sobreexplotación, desarrollar nuevas fuentes de suministro y prevenir inundaciones. Dicho programa incluye dos megaproyectos dirigidos hacia el tratamiento y reúso del agua residual y pluvial; el primer proyecto representa una inversión cercana a los 14 millones de pesos mexicanos, llamado Túnel Emisor Oriente (TEO). Tiene una capacidad de desalojo de $150\text{m}^3/\text{s}$, 7m de diámetro y 62km de longitud, la maquinaria utilizada es de alta tecnología, tiene como objetivo desalojar las aguas de la ZMVM hacia una planta de tratamiento proyectada en el municipio del estado de Hidalgo.

Dicha planta de tratamiento de aguas residuales es el segundo proyecto, tiene una extensión de 158has y una capacidad de $35\text{m}^3/\text{s}$ (60%) de las aguas residuales de la ZMVM) su inversión asciende a poco más de 9mil millones de pesos mexicanos. El tipo de recarga de este proyecto es de manera incidental pues el agua tratada se utilizara para riego. Otros instrumentos de planeación anexos en la ZMVM son: el programa de sustitución gradual de agua de primer uso por agua residual tratada para riego agrícola dentro del Valle de México (recarga incidental) y el programa de recarga de acuíferos del valle de México, el cual consta de cuatro módulos, [1] el riego de una zona de protección ecológica (recarga incidental superficial), [2] recarga artificial en profundidad

mediante pozos de inyección, [3] intercambio entre el agua de pozos y agua tratada para riego agrícola (recarga incidental superficial) y [4] el reúso municipal e industrial del agua tratada. En conjunto estos tres programas pretenden reducir la sobreexplotación del acuífero en un 70%, es decir pasar de 879 Mm³ extraídos al año a tan solo 251 Mm³/año (Espino 2011).

CAPÍTULO 3 PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE LAS ÁREAS VERDES COMO ESTRATEGIA DE RECARGA DEL ACUIFERO VALLE DE AGUASCALIENTES

El eje central de la propuesta se enfoca en valorizar las áreas verdes del espacio urbano para contribuir a la mitigación del abatimiento del acuífero del valle de Aguascalientes. En los capítulos anteriores se presentó la problemática que enfrenta la ciudad referente a la sobreexplotación del acuífero y las políticas públicas que rigen las aguas subterráneas. Se expusieron también las propiedades multifacéticas benéficas de las áreas verdes, así como algunos modelos representativos que favorecen la infiltración en las ciudades a través de estas áreas. Del mismo modo se hizo una referencia somera a proyectos de recarga artificial llevados a cabo en el país y un ejemplo en el valle de México que no se vincula con la integración de áreas verdes. En este último capítulo se analiza de manera teórica la viabilidad para aplicar las técnicas de recarga artificial en la ciudad de Aguascalientes por un lado tomando como guía los factores esenciales para la instauración de MAR expuestos por Dillon et al. (2009) y por otro, los distintos modelos presentados en el apartado 2.2 que se apoyan en las áreas verdes.

3.1 Elementos esenciales para el establecimiento de modelos de recarga artificial

Para lograr con éxito el establecimiento de las técnicas de recarga se recomienda considerar cinco elementos que se expondrán a continuación:

3.1.1. Demanda de agua suficiente que justifique la aplicación de las técnicas de infiltración y recarga

Como se mencionó en el apartado 1.3.2 el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de Aguascalientes: cerca del 72% del agua consumida a nivel estatal proviene del subsuelo, el 87% del agua subterránea extraída se utiliza para uso público-urbano (72, 506,784 m³), y aproximadamente 5.5% es utilizada para servicios y uso industrial. Los cinco acuíferos del estado se encuentran sobreexplotados y en veda, al tiempo que datos recientes (diciembre 2013) muestran que el acuífero del Valle de Aguascalientes tiene un déficit de 110.41 Mm³ (CONAGUA 2015a).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) una persona tiene un acceso óptimo al agua cuando existe una dotación de entre 100 y 300 l/día (Howard & Bartram 2003); la dotación promedio por habitante en la ciudad de Aguascalientes es de 300 l/día, 50 litros por encima del promedio nacional (Montesillo & Crespo 2006). Este hecho sería un aspecto plausible si no fuera un acuífero en déficit, en veda y uno de los más sobreexplotados a nivel nacional (CONAGUA 2013b). La demanda de agua continuará en aumento debido al crecimiento demográfico, se estima que para 2040 se agregarán más de 250 mil habitantes (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014c), que representarán un incremento en la demanda de agua de 27 Mm³ anuales. Reformular las políticas sobre la dotación y gestión de este recurso resulta esencial.

Asimismo, la demanda del sector industrial contribuirá a dicha presión ejercida en el recurso, puesto que la ciudad de Aguascalientes ocupa el primer lugar a nivel nacional en crecimiento industrial con 35 nuevas empresas instaladas y 32 proyectos de ampliación (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2015), a lo cual se suma la demanda existente del sector agrícola y pecuario.

3.1.2. El acuífero como un medio conveniente para el almacenaje y la recuperación de agua

Debido a las características hidrogeológicas, el subsuelo urbano tiene una permeabilidad mediana (IMPLAN 2013a), tienen un factor de infiltración profunda de 12% (COTAS 2006) y se distinguen tres medios principales que favorecen la infiltración (CONAGUA 2015a): [1] Medio poroso con permeabilidad primaria, permeabilidad secundaria e intergranular de fracturas, donde la mayoría de los pozos perforados en el valle están emplazados. [2] Medio fracturado con permeabilidad secundaria con una velocidad mucho mayor que el medio poroso. [3] Medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, donde el agua fluye de los bloques de la matriz porosa a las fracturas. Su velocidad es menor que en el medio fracturado. Cabe mencionar que existen condiciones para el confinamiento parcial en las zonas donde predominan los paquetes arcillosos.

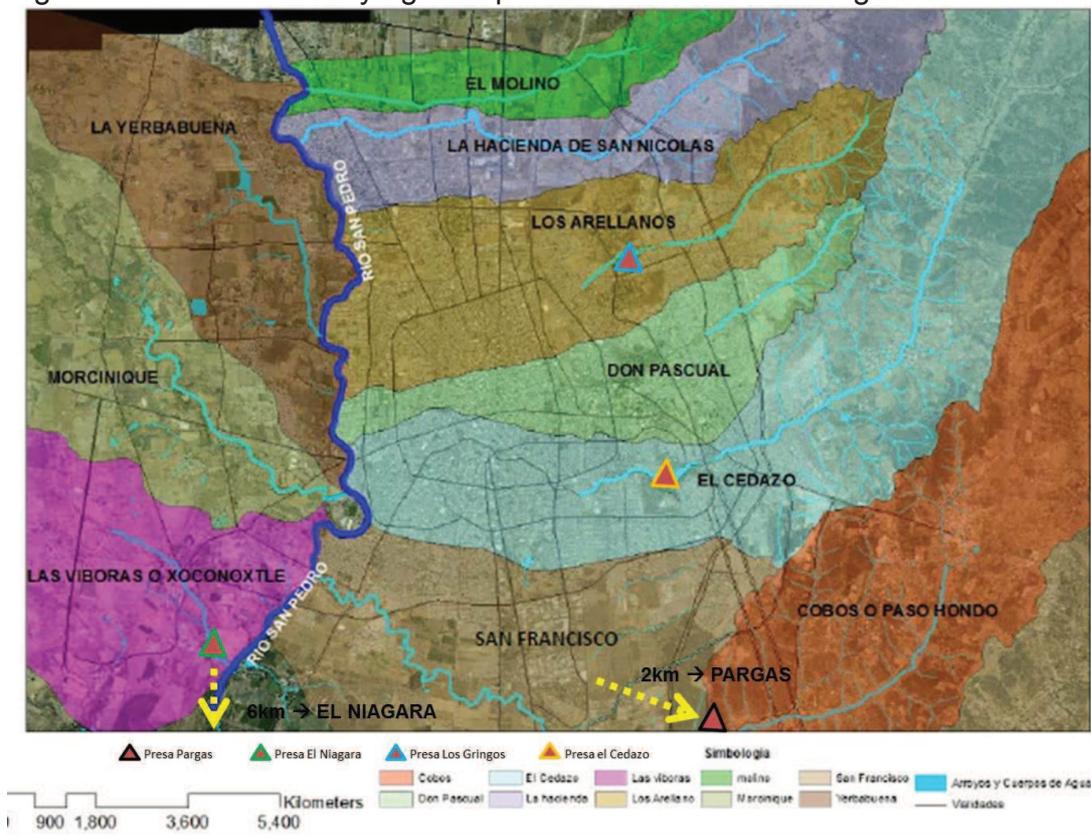
3.1.3. Disponibilidad de fuentes de agua adecuadas para la recarga del acuífero

Existen cuatro fuentes principales de agua para realizar la recarga artificial del acuífero, sin embargo en esta propuesta no se ha tomado en consideración el agua potable debido a la importancia que tiene para satisfacer la demanda de abastecimiento urbano, recordando también el déficit del acuífero.

➤ El agua superficial

El drenaje natural en el área urbana está conformado por diez microcuencas que confluyen en 10 arroyos, 4 de ellos afluentes importantes; El Molino, La Hacienda, Los Arellanos y El Cedazo (los dos últimos entubados). La principal corriente superficial del estado es el río San Pedro (río perenne) que atraviesa la ciudad en sentido norte-sur; juntos, el río y los arroyos, abarcan una extensión a nivel municipal de 331.9 km², aunados a los cuerpos de agua alcanzan una capacidad total de almacenamiento de 446,330 Mm³ (disponibles 308,581 Mm³) De los once embalses que existen en el municipio, tres se encuentran dentro de la mancha urbana, junto con el río san pedro representas los cuerpos de agua más importantes del municipio. (SEMADESU 2013)

Figura 3.1 Microcuencas y agua superficial de la ciudad de Aguascalientes



Fuente: SEMADESU (2013)

➤ Escorrentía de tormenta

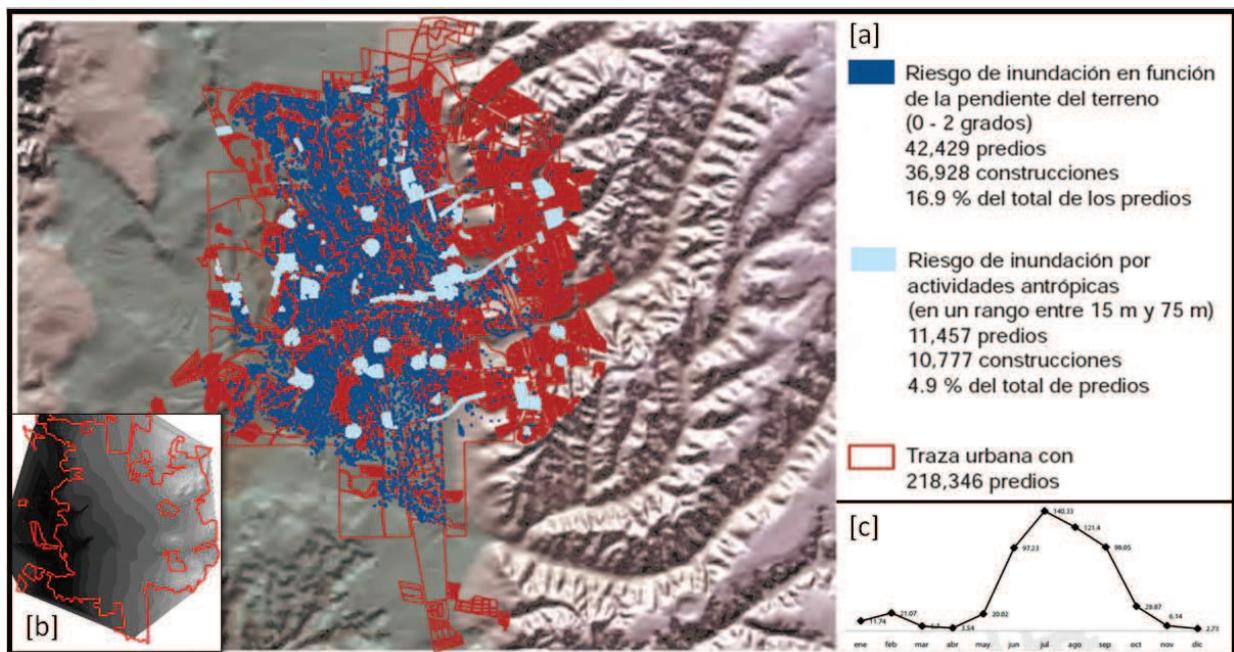
Si bien Aguascalientes no es un estado con alta vulnerabilidad ante las inundaciones dada su ubicación geográfica y la baja precipitación de la zona, las lluvias torrenciales principalmente durante los meses de junio a septiembre, sumadas a las pendientes pronunciadas oriente-poniente y a las superficies impermeables, ocasionan la sobresaturación de los sistemas de drenaje y el incremento del caudal de los ríos y vialidades. Esta situación provoca inundaciones en las zonas más bajas de la ciudad: en la zona poniente principalmente (SEMADESU 2013; SEGUOT 2014b; IMPLAN 2007).

La precipitación anual es de 509mm, la mayor actividad pluvial se registra entre los meses de julio y agosto con precipitaciones entre 158mm y 166mm (Guzman et al. 2011). Recientemente, en agosto de 2014, el nivel del agua alcanzó más de 30cm con corrientes tan fuertes que arrastraron 20 vehículos (Bañuelos 2014). Un ejemplo de soluciones previstas por la Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado (CCAPAMA) a través del programa “Acciones por tu colonia” es la construcción de un colector pluvial y red de alcantarillado (en una colonia) cuya inversión se calcula en 9 millones 200 mil pesos mexicanos; otras acciones preventivas realizadas son las tareas de mantenimiento y desazolve de caimanés (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014a).

La escorrentía de tormenta es la principal fuente de agua de las técnicas de recarga, el poniente de la ciudad es una zona con gran potencial para conducción, retención y filtración del agua de lluvia en las zonas bajas. Además las sierras y lomeríos del oriente

están formados por rocas fracturadas ampliamente expuestas y capturan la precipitación pluvial aportando una recarga estimada de 140 Mm³/año (CONAGUA 2015a), dicha infiltración puede ser incrementada por medio dediques o gaviones como en el caso presentado de la delegación Iztapalapa en el Valle de México.

Figura 3.2 Mapa de riesgos por inundación en la ciudad



Fuente: [a] IMPLAN (2007) en el fondo, imagen topográfica del terreno coloreada mediante el análisis topográfico a partir del modelo digital de elevación del terreno. Los datos de elevación se dividen en 25 niveles ecualizados, asignándoles un color distinto a cada nivel. Los colores oscuros señalan bajas elevaciones y los claros altas elevaciones. [b] Elaboración propia, datos de elevación divididos a 30 niveles naturales. [c] Servicio Meteorológico Nacional (2010) en SEGUOT (2014) precipitación promedio mensual estatal.

➤ Agua reciclada

Aguascalientes ha demostrado tener un gran potencial para el uso de aguas tratadas, ocupa el primer lugar a nivel nacional en saneamiento de aguas residuales con el 88.9% a nivel estatal y 98.5% en el municipio de Aguascalientes (IMPLAN 2013b). En el

estado existen 117 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con diferentes procesos; 23 de proceso de lodos activados (935 l/s), 13 de tipo fosa séptica (10 l/s), 3 de tipo humedal (3.4 l/s), 68 de tipo laguna de estabilización (164 l/s), únicamente la PTAR Aguascalientes (ubicada dentro del área urbana) utiliza un proceso dual con un caudal tratado de aproximadamente 1919 l/s (CONAGUA 2008).

El valle de Aguascalientes tiene gran potencial a nivel estatal para implementar proyectos de reúso de aguas residuales. Destaca, por ejemplo, el megaproyecto de la PTAR Aguascalientes pues dos terceras partes (42hm³/año) del agua tratada podrían reutilizarse. Dicho proyecto de integración intersectorial propuesto por la CONAGUA pretende reutilizar el agua tratada en el sector industrial para el riego de forrajes y en la recarga artificial (CONAGUA 2008). Dentro del área urbana se ubican 20 PTARs casi en su totalidad de lodos activados, en conjunto tienen una capacidad instalada de 3400 l/s y un caudal tratado de casi 1700 l/s (CONAGUA 2011).

En la actualidad la disposición final de las aguas residuales (tratadas y no tratadas) del estado son cuerpos receptores como ríos y arroyos (91.3 %), presas y tanques (3.7%) y otros (2.4%) (CONAGUA 2010b citado en (SEGUOT 2014b). Como ya se ha mencionado en el apartado 2.2 una de las ventajas de la aplicación de modelos de bajo impacto (SUDS, GI, SWUD) como éste es la disminución del volumen de agua pluvial en el sistema de drenaje lo que disminuye la sobrecarga de las plantas tratadoras de aguas residuales y por tanto la energía eléctrica que representa el 60% del costo total de la operación anual. De este modo se generan ahorros económicos en el costo del metro cubico tratado.

3.1.4. Espacios suficientes disponibles para capturar y tratar el agua

Como se enunció en el capítulo II las técnicas de recarga artificial y los modelos que favorecen la infiltración utilizan una gran variedad de áreas verdes en diferentes escalas, desde el jardín trasero de una casa hasta toda una red de canales, embalses y humedales. Las actividades que se desarrollan mediante estas distintas técnicas requieren de un entorno urbano para llevarse a cabo. En este documento se proponen las áreas verdes como potenciales sitios, dependiendo su escala y características puede integrarse una técnica distinta de recarga o infiltración.

En la ciudad de Aguascalientes las áreas verdes ocupan una superficie de casi 2800 ha (21% de la mancha urbana). Aquí estamos incluyendo los espacios públicos y privados. Las áreas verdes públicas de mayor dimensión son los parques urbanos Héroes Mexicanos (90 ha), México (80 ha), El Cedazo (50 ha) y Línea Verde (60 ha), los tres primeros con un cuerpo de agua en su perímetro. Dentro de los espacios privados destacan los campos de golf Campestre (60 ha), Pulgas Pandas (25 ha), Santa Mónica (20 ha) y la zona arbolada de la Universidad Autónoma de Aguascalientes con 30 ha (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b).

En estas áreas de gran extensión pueden aplicarse todos los métodos de recarga artificial, pues tienen la extensión suficiente para incluir campos de infiltración o campos inundables, humedales y balsas. Aquellos donde existen cuerpos de agua pueden realizarse sistemas de canales que incluyen técnicas como diques, escarificación del lecho e inundaciones controladas. En los parques cercanos a plantas de tratamiento pueden instalarse pozos profundos que necesitan agua de mejor calidad.

Los centros de barrio, jardines vecinales y camellones suman casi 200 ha que pueden ser aprovechados para la aplicación de técnicas de menor escala como trincheras de infiltración, zanjas y canales.

Las áreas naturales como La Pona y zonas ribereñas contribuyen con 250 ha, las técnicas particulares para estas zonas son las llanuras aluviales y cinturones de vegetación ribereña. No obstante, estas técnicas ya se llevan a cabo en la ciudad; en primer lugar, las llanuras aluviales están delimitadas normativamente¹³ por el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) y el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME). En segundo lugar, los cinturones de vegetación existen de manera natural para el caso del río San Pedro y en tercer lugar en el resto de los arroyos ya hay proyectos de aforestación y limpieza mediante el programa “revive tu arroyo” (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b; SEMADESU 2013),

En este documento se considera a los lotes baldíos como áreas verdes aun si no son necesariamente espacios con cobertura vegetal, permiten la infiltración del agua al subsuelo. Sumados abarcan un total de 1900 ha (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b). Los lotes vacantes son sinónimo de problemas de salud y seguridad en las ciudades pues son relacionados con el crimen, la atracción de fauna nociva y mala imagen urbana, factores que reducen la plusvalía de los predios y de la zona (Garvin et al. 2013). Al ser espacios abiertos no construidos puede pensarse en técnicas de control regional dependiendo de la superficie. El uso de estos predios para

¹³ NAMO: en cauces naturales indica la cota a partir de la cual empieza el desbordamiento y sirve para tomar acciones respecto a protección civil y otras medidas pertinentes. NAME: es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición. Terminología CONAGUA (2015)

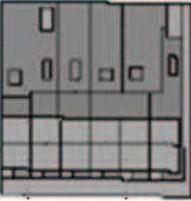
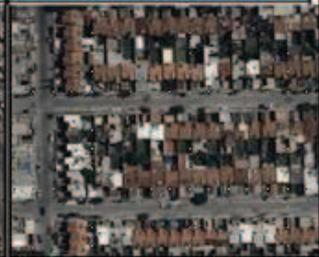
aplicar métodos de recarga puede aprovechar los beneficios de las áreas verdes y contribuir positivamente en los vecindarios.

Otros espacios disponibles para la infiltración que pueden incluirse son las vialidades propicias para la adaptación de técnicas de infiltración (SUDS, GI y WSUD) como la construcción de zanjas, canales y trincheras que incluyan vegetación con propiedades de fitoremediación y bioretención. La estructura vial de la ciudad se conforma principalmente por 101km de vialidades primarias y 90km de vialidades secundarias de 23m a 42m de ancho; estas vialidades transportan un mayor volumen de agua pluvial (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b), la vialidades con problemas de inundación podrían ser prioritarias para la instauración de estas técnicas.

Dependiendo de sus dimensiones, los jardines particulares o patios (incluyendo los jardines colectivos de propiedades en régimen de condominio) pueden tener potencial para albergar técnicas de infiltración *in situ* como los jardines de lluvia y techos verdes. En la ciudad capital existen ocho tipos de fraccionamientos con diferentes tamaños de lote mínimo y porcentaje de área construida (cuadro 5), esto no afecta la implantación de las técnicas pero se a la tasa de infiltración ya varía en función de la superficie y la técnica a emplear. En un estudio realizado en Alemania se evaluó el potencial de diferentes tipos de desarrollos habitacionales para coleccionar agua pluvial, para determinarlo tomaba en consideración cuatro variables principales: [1] el porcentaje de área permeable, [2] el porcentaje de área impermeable no construida, [3] la estructura construida y [4] el área libre (Becker et al. 2006). La estimación también puede incluir otros factores como la topografía, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y diferentes tipologías de vivienda con la finalidad de ser más exacto. Esta evaluación puede

extrapolarse a la ciudad de Aguascalientes (figura 10), para determinar los desarrollos habitacionales con mayor potencial para aprovechar el agua pluvial, incluso podría aplicarse para lotes baldíos.

Figura 3.3 Extrapolación de la evaluación de desconexión de drenaje pluvial

Building/structure type	Old buildings, dense development	Linear building	Rows of terrace houses
Ground plan sketch			
Type	Enclosed courtyard, courtyard, careful remediation	Linear building	Terrace houses
Estimation	Suitable subject to certain conditions	Very suitable	Suitable
Ciudad de Aguascalientes			

Fuente: Modificado de Becker et al. (2006) con imágenes satelitales del Google Earth 2014 Imagen inferior izquierda zona centro, imagen inferior media region sureste, imagen inferior derecha zona sur.

Cuadro 3.1 Espacios disponibles para capturar y tratar en la ciudad de Aguascalientes

Áreas verdes	Superficie ha	% de la ciudad
Parques urbano	280	2%
Campos de golf	135	1%
Centros de barrio, jardines vecinales y camellones	200	2%
Áreas naturales	250	2%
Otros	35	0%
Lotes baldíos	1900	14%

2800 21%

Vialidades	Longitud	Ancho
------------	----------	-------

Vialidades primarias	101km	23m - 42m
Vialidades secundarias	90km	

Tipos de fraccionamientos	Ubicación	Superficie m2	% Área verde
---------------------------	-----------	---------------	--------------

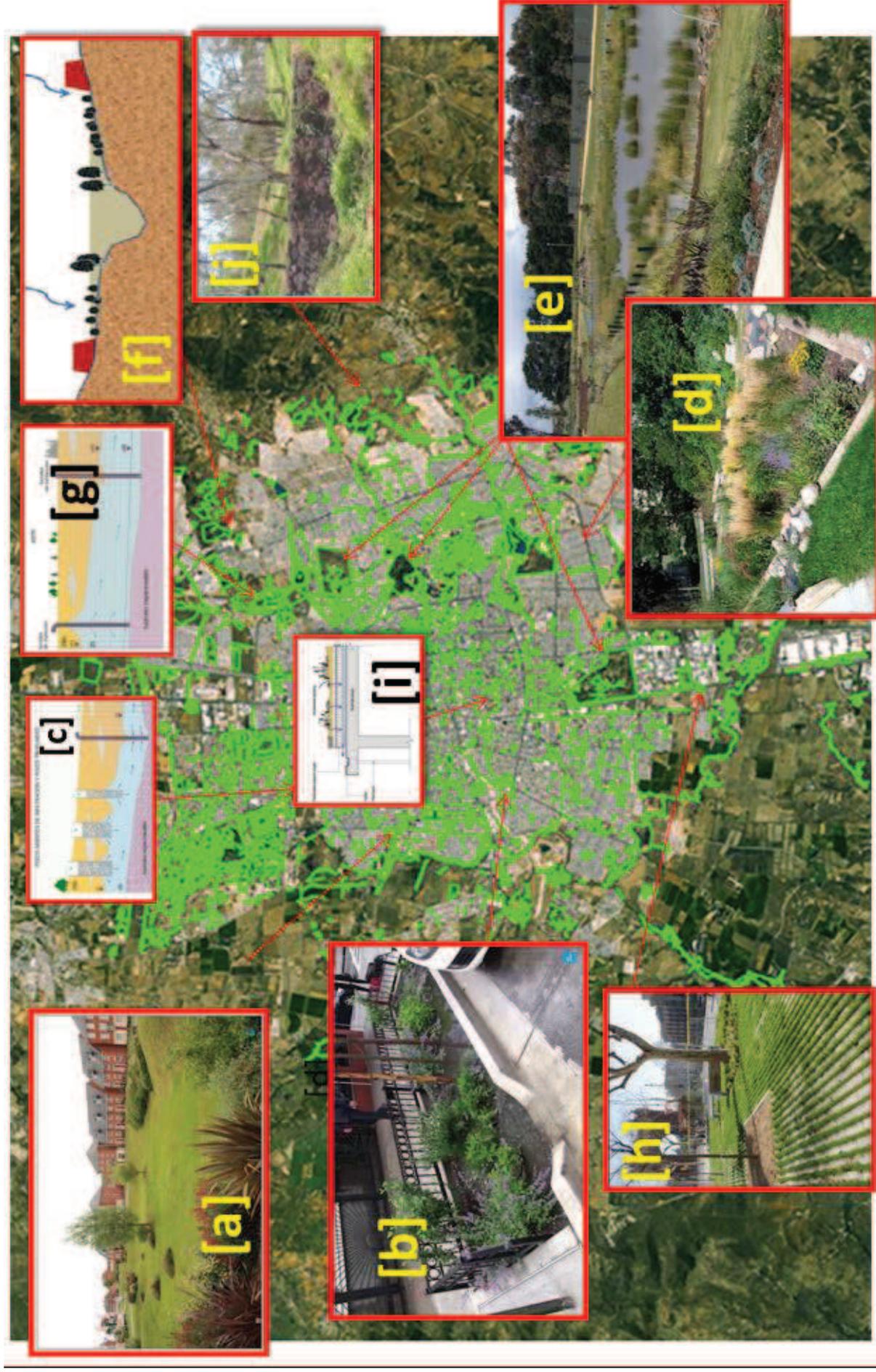
Campestre	Noroeste	1000	50%
residencial	Noroeste, y suroeste	450	20%
medio	Poniente, norte, suroeste y Sur	200	25%
Popular	Toda la ciudad	90	-
Interés social	Oriente	90	-
Condominio	Toda la ciudad	90 - 450	-
Barrios	Centro	-	-
Mixto	Norte y sureste	-	-

Fuente: elaboración propia basado en H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes (2014b) y en la Sección tercera fraccionamientos habitacionales urbanos del Código urbano para el estado de Aguascalientes.

A continuación se muestra una propuesta conceptual (figura 11):

- ❖ [a] Retención del flujo regional en campo de golf
- ❖ [b] Cunetas bioretención en vialidades primarias en zonas bajas
- ❖ [c] Pozo abierto en la Universidad Autónoma
- ❖ [d] Jardín de lluvia para vivienda tipo medio lote tipo de 150m a 200m
- ❖ [e] Humedales en los tres parques aprovechando otros cuerpos de agua
- ❖ [f] Vegetación ribereña en el arroyo San Nicolás
- ❖ [g] Pozo profundo cerca de la PTAR para evitar costos de transportación
- ❖ [h] Pavimento poroso estacionamiento de la plaza
- ❖ [i] Techos verdes en el centro debido a que tiene menor superficie permeable se provechan los techos.
- ❖ [j] Dique de retención en cerros, ej. D. Iztapalapa

Figura 3.4 Ejemplo de técnicas de infiltración en áreas verdes dentro de la ciudad de Aguascalientes



3.1.5 Capacidad de diseño, construcción y operación para el proyecto de recarga

Las tres capacidades dependen de la escala y alcances del proyecto, además de los actores involucrados; a mayor escala se rige por el Estado y sus divisiones administrativas federales, estatales, regionales, municipales y locales, quienes se encargarían de la gestión del proyecto (diseño, financiamiento, construcción y operación) a través de distintas dependencias. Asimismo el Estado influye sobre la gestión en el sector privado mediante el marco legal; por ejemplo, las normas de disposición y tratamiento de aguas residuales o el código urbano para desarrolladores inmobiliarios. Dicho esto, se podrían establecer reformas o proporcionar incentivos para favorecer la infiltración artificial y la cosecha de agua de lluvia en la ciudad. Por un parte las reformas legales tendrían efecto solo en las nuevas construcciones, ya que en el art.14 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) se establece la ley no es retroactiva. Por otra parte de los instrumentos económicos pueden usarse para incentivar a los actores en cuestión por medio de precios elevados (IGRAC & Acacia Institute 2007); por ejemplo incrementar el costo por el servicio de drenaje y alcantarillado fomentaría la transición del sistema convencional de drenaje por técnicas de infiltración.

Aguascalientes ha demostrado un gran esfuerzo en la aplicación de programas y proyectos a través de distintas dependencias sobre el tema hídrico, como veremos en el apartado 3.2 posteriormente. La implicación y correlación entre distintas dependencias y secretarías de diferentes órdenes de gobierno puede mejorar la capacidad para implementar el propuesta de recarga en su diferentes escalas como un proyecto interdisciplinario. Así, cada dependencia podría desarrollar y gestionar

proyectos afines a su sector correspondiente para responder a dicho proyecto de mayor escala.

Cuadro 3.2 Vinculación de dependencias gubernamentales

Nivel	Agua	Suelo	Ambiente	Sociedad
Estatal	Instituto del Agua	Secretaría de Gestión Urbanística y Ordenamiento Territorial Coordinación Estatal de Planeación y Proyectos	Secretaría de Medio Ambiente del Estado	Secretaría del Bienestar y el Desarrollo Social
Municipal y local	Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes	Instituto Municipal de Planeación de Aguascalientes Secretaría de Obras Públicas Secretaría de Servicios Públicos Secretaría de Desarrollo Urbano	Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable	Secretaría de Desarrollo Social
Ejemplo de Sub-proyectos	Concientización de la problemática Promoción de la cultura del agua	Modificación de vialidades Adecuación de parques y jardines	Zonificación de riesgos y contaminación Estudios de biodiversidad	Fomento de participación social Huertos urbanos

Fuente: elaboración propia

Otro punto clave a favor es la organización legalmente constituida y operativa COTAS que suministra información vital sobre las aguas subterráneas del acuífero, además de brindar soporte técnico y personal capacitado (CONAGUA 2008).

3.2. Políticas de soporte

El éxito y alcance de la propuesta reside en el apoyo del marco de planeación y los diferentes programas a los que pueda contribuir e interconectarse. Asimismo la existencia de planes y programas internacionales afines puede favorecer técnica y económicamente la aplicación de un diseño de esta temática.

En el marco nacional de planeación, la agenda azul del PSMARN establece cuatro estrategias para alcanzar el manejo integral y sustentable de los recursos hídricos, dos de ellas favorecen la propuesta: la primera tiene como objetivo propiciar el equilibrio de las cuencas y acuíferos sobreexplotados, mientras que la segunda se refiere a la promoción de la recarga de acuíferos (SEMARNAT 2007). A esto se suma el marco normativo nacional en materia de recarga artificial de acuíferos, cuya existencia facilita y asegura la correcta aplicación de proyectos de esta índole. Este marco normativo puede ser reconocido a nivel internacional y se conforma por 14 normas (anexo 8), de las cuales destacan la NOM-014-CONAGUA-2003 que contiene los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, la NOM-015-CONAGUA-2007 sobre la infiltración artificial de agua a los acuíferos mediante aguas pluviales o escurrimiento superficial y la NOM-127-SSA-1994 que beneficia la aplicación de la propuesta planteada, pues es más laxa en cuanto a la calidad del agua para infiltración superficial “siempre que se demuestre la degradación en el suelo de aquellos componentes que exceden los límites de potabilidad” (INAGUA 2012).

Desde una perspectiva regional Aguascalientes tiene ya una ventaja al contar con un COTAS, que ha generado los siguientes instrumentos para la gestión de las aguas subterráneas: [1] Plan integrador de manejo de agua sostenible del acuífero interestatal Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación y [2] Planeación participativa de los usuarios clave.

A nivel estatal el Programa PREMIA de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de la naciones unidas junto con la CONAGUA promueven la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos, ejemplos de ello fue el documento “Diagnóstico y

Potencial de Reúso de Aguas Residuales Tratadas en el Valle de Aguascalientes” y la Planeación participativa sobre la gestión hídrica de intercambio de agua de primer uso por agua residual tratada (CONAGUA 2008). Más importante aún es la existencia del estudio de la recarga artificial del acuífero Valle de Aguascalientes generado por el INAGUA en años recientes que pretende dar inicio a un proyecto de recarga mediante pozos profundos en el presente año (INAGUA 2012).

A nivel municipal el Programa de rehabilitación y rescate de microcuencas “revive tu arroyo”, del municipio de Aguascalientes 2011-2013, fue un proyecto de participación social 1613 participantes que llevaron a cabo el saneamiento, la rehabilitación y la reforestación de los Arroyos urbanos (SEMADESU 2013), esto expone la conciencia ambiental y voluntad social para participar en proyectos de esta temática.

A nivel local la ciudad cuenta con el PDUA 2013-2040 que contempla diversos programas parciales que pueden fungir como apoyo: [1] Proyecto “Cinturón Verde Interurbano” articulado por la Línea Verde al oriente, arroyo San Francisco al sur, río San Pedro al poniente y el arroyo El Molino al norte. [2] Proyectos para el aprovechamiento integral de las aguas pluviales. [3] Proyecto “Línea Morada”, para la reutilización de aguas tratadas (riego de áreas verdes). [4] Programa de control con las aguas residuales, para evitar la contaminación y azolve de los cuerpos receptores. [5] Proyecto “Corredores Verdes”, aprovechamiento de zonas de restricción. [6] Proyecto de aprovechamiento de lotes baldíos, para la instauración de nuevas centralidades (centros de barrio o vecinales) para la dotación de equipamiento. [7] Paquete de incentivos que incluyen cambio para la obligatoriedad de las áreas de donación y [8] el diseño participativo de la infraestructura, que integre los núcleos de equipamiento

propuestos como plazas receptoras de agua pluvial (H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes 2014b). El IMPLAN sustenta un programa de actualización y diagnóstico de las áreas verdes dentro del ámbito urbano de la ciudad de Aguascalientes. Además de realizar el inventario propone sitios viables como áreas verdes.

El sector privado de menor escala (ej. los jardines, empresas e instituciones educativas) puede actuar de manera autónoma ya sea por medio de la autoconstrucción o contratación de servicios. Aunque programas gubernamentales pueden promover y financiar ciertas técnicas como el caso del Departamento de Agua en la ciudad de Filadelfia (PWD por sus siglas en inglés) quien puso en marcha dos programas “*Rain check*” y “*Green Home Project*” que ponen a disposición pública en su sitio de internet información básica y manuales para adaptar los jardines de los ciudadanos con diversas técnicas de infraestructura verde (pequeño humedal, jardín de lluvia, pavimentos porosos, techos verdes, pozos someros) a fin de apoyar en la gestión del agua pluvial y favorecer la infiltración al subsuelo. De igual modo proporciona apoyo en especie por ejemplo proporciona de manera gratuita barriles para coleccionar el agua de lluvia (PWD 2015).

3.3. Desafíos para la integración de la propuesta

3.3.1. Desafíos en la política de planeación

Si bien en la ciudad de Aguascalientes se han implementado medidas correctivas para mejorar el balance del acuífero (pequeños humedales instalados en escuelas,

colectores pluviales, reúso de agua tratada y próximamente pozos de infiltración), el enfoque integral y sustentable en la planeación y el diseño de estos proyectos es inexistente, ni el enfoque ecosistémico y ni el sensible al ciclo hídrico han sido incluidos en la racionalidad planeadora del Estado.

La principal barrera para llevar a cabo un modelo integral es la falta de conocimiento y comprensión por parte de las autoridades correspondientes sobre la gran diversidad de técnicas de infiltración que son menospreciadas y se subestiman sus beneficios (Andoh & Kennehth 2002). La inversión inicial, resultados no inmediatos y mejores beneficios a terceros pueden desincentivar su aplicación. Además estas técnicas se perciben solo como una opción sustentable de drenaje y no como una norma, por consiguiente permiten a las compañías de agua-alcantarillado y desarrolladores inmobiliarios rechazar la adopción de los modelos (White & Howe 2005; UNEP 2014).

Este panorama se repite en todo el mundo, la transición de paradigmas trae retos que varían de región en región, los planeadores y ejecutores de diferentes disciplinas deben adaptar los modelos a cada sitio particular tomando en cuenta la función para la que será requerido (almacenamiento, descontaminación, recarga, mejora del ambiente), la ubicación (urbana consolidada, industrial, vías de comunicación, etc.), la geolocalización (geomorfología, hidrología, entorno social, clima, etc.) y el marco legal (DINA-MAR 2010). En el peor de los casos se recae en una posición política negativa o viejo paradigma de “para que invertir en la recarga artificial, si el agua subterránea va a extraerse nuevamente” (Palma et al. 2014). No es visto como una prioridad, ni se toma conciencia de toda la gama de beneficios que aporta tanto en la superficie como para la

integridad del acuífero. A ello se suman los cambios de gobierno, pues cada uno destina el presupuesto asignado en función de sus ejes estratégicos de acción.

3.3.2 Desafíos sociales

La gran mayoría de los habitantes de la ciudad desconocen por completo la problemática de sobreexplotación del acuífero y el déficit hídrico que experimenta la ciudad. El ser conscientes del riesgo sobre la seguridad hídrica que enfrentan en escenarios futuros puede cambiar considerablemente la forma en que usan el agua y, por tanto, otorgar mayor importancia a la gestión hídrica. La aplicación de nuevas propuestas de gestión hídrica necesita la aceptación social por lo que las propuestas deben ser informadas de manera adecuada al público a fin de evitar su rechazo. Por ejemplo, un estudio en Australia mostro que los ciudadanos se sienten por lo general más cómodos reutilizando agua de lluvia que agua tratada, otros aspectos intervinientes para tal aceptación son la conciencia ambiental, la educación, la confianza en las técnicas, el costo y aspectos psicológicos (Mankad et al. 2013). Cabe notar que la percepción y participación comunitaria es de extrema importancia para la implantación, permanencia y mantenimiento de los proyectos (Schofield 2012; Carmon & Shamir 2010). Asimismo, el promover la instauración de espacios verdes puede ocasionar fenómenos paradójicos como la gentrificación ambiental, que implica impactos tanto positivos como negativos a los ciudadanos. Proyectos y movimientos ambientalistas que son sensibles a aspectos ecológicos y sociales, ayudan contradictoriamente a los desarrolladores urbanos (inmobiliarias) neoliberales que se benefician del incremento de la plusvalía del suelo y las propiedades debido al ajardinamiento y mejora estética del paisaje urbano (Checker 2011); el conflicto primordial de este fenómeno de

reestructuración urbana es precisamente el desplazamiento de ciudadanos de bajos ingresos (grupos vulnerables) a zonas económicamente más accesibles, mientras que individuos con mayor capacidad adquisitiva ocupan dichos espacios (Bryson 2013).

La falta de investigaciones sobre el agua subterránea conforma otra limitante, en especial sobre los flujos de recarga pues presentan incertidumbres a escalas regionales limitando la instauración de proyectos de esta magnitud. Por el contrario son fiables cuando son estudios locales o puntuales (Department of Environment Climate Change and Water 2010; de Vries & Simmers 2002).

3.3.3. Consideraciones del entorno

La aplicación de técnicas de recarga artificial es utilizada para mejorar la calidad del agua subterránea y restaurar el balance hídrico. Sin embargo la falta de rigurosidad normativa y de precauciones necesarias puede poner en riesgo al acuífero, permitiendo su contaminación por agua superficial y residual (EPA 2015). A nivel estatal el 40% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento previo al Río San Pedro, Guzman et al. (2011) evaluaron la calidad del agua del río en las zonas cercanas a la PTAR de la ciudad de Aguascalientes, a pesar de la presencia de nutrientes (fosforo y nitrógeno) y tóxicos orgánicos la calidad fue considerada como aceptable y excelente¹⁴. Otra fuente contaminante del contexto son los contaminantes del río Chicalote que son arrastrados hasta el arroyo Niagara. La presa Niagara recibe en ocasiones aguas sin tratamiento alguno y la presa El Cedazo se contamina también por aguas arriba

¹⁴ La calidad del agua según el Índice de Calidad del Agua de Río (RWQI) significando: A) aceptable, la calidad del agua está usualmente protegida pero ocasionalmente es amenazada o dañada su condición algunas veces se aparta de los niveles naturales deseables; B). Buena, su condición rara vez se aparta de los niveles naturales deseables y C) excelente, la calidad del agua está protegida y su condición es muy cercana a los niveles naturales deseables (Guzman et al. 2011).

(SEMADESU 2013). El agua utilizada en las técnicas de recarga artificial, especialmente las de tipo directa como pozos profundos de inyección, debe ser de buena calidad, de ser menor la calidad del aguas, debe ser establecido el diseño de áreas verdes y/o dispositivos ajardinados que favorezcan la biorentención, biofiltración y fitoremediación para mejorar la calidad del agua a infiltrar (Romeiro et al. 2007; Davis et al. 2003; MPCA 2015). Las ciudades que presentan mayor aridez, si bien es cierto que es una restricción no debe ser usada como justificación para la falta de áreas verdes de infiltración, pues la diversidad de vegetación en climas áridos y semiáridos puede realizar igualmente fitoremediación de metales pesado e hidrocarburos (Shirdam et al. 2009; Mendez & Maier 2008; Cook et al. 2009). Otro punto a considerar la promoción y protección de la biodiversidad nativa; el uso de plantas no nativas e invasivas en la estética del paisaje urbano es de por si alarmante (Endlicher 2011), pues significa no solo la introducción de enfermedades (propias de las especies introducidas) sino que también proporciona hábitat y sustento para otras especies no nativas afectando los procesos ecológicos del entorno (SINHA 2010; Parker et al. 2014). De este modo resulta de extrema importancia tomar en cuenta y favorecer el empleo de especies endémicas y/o nativas que promuevan el equilibrio ecosistémico con la finalidad de proteger la biodiversidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante las últimas décadas el uso intensivo del agua subterránea en zonas áridas y semiáridas no ha sido racional; en México las consecuencias han determinado la

abundancia de acuíferos en veda así como políticas incipientes de planeación y gestión que toman en consideración las aguas subterráneas. Sin embargo, la falta de conocimiento y comprensión sobre las problemáticas de la sobreexplotación de las aguas subterráneas, así como de los métodos para solventarlas son los principales obstáculos para la recuperación y/o restauración de los acuíferos. La conciencia social sobre la gravedad del fenómeno así como su inclusión en las estrategias de mitigación son cruciales para superar el déficit. En la actualidad existen los recursos necesarios para aplicar medidas de mitigación ante la explotación intensiva; como ejemplo las organizaciones internacionales y países a la vanguardia brindan apoyos de distintos tipos; técnicos, documentales y económicos.

No obstante, tanto las técnicas de recarga artificial como las áreas verdes son infravaloradas y no se percibe todo su potencial dentro del entorno urbano subutilizado; lo anterior se observa por la ausencia de proyectos de forestación o por proyectos que proponen el incremento de áreas verdes austeras carentes de un diseño que pueda incrementar los beneficios ambientales y sociales. Otro ejemplo son los pozos abiertos del Valle de México pues, si bien favorecen la recarga artificial, generan otras problemáticas a la ciudadanía (aunque es el único ejemplo de recarga artificial en el país que se lleva a cabo en una zona urbana).

La propuesta que realizamos en la tesina pretende contribuir a los proyectos e impulsos gubernamentales para la gestión integral del acuífero. La aplicación de modelos de bajo costo en áreas verdes ha demostrado ser eficiente y aporta beneficios sinérgicos mayores a los esperados. Es un factor importante para alcanzar la meta del círculo virtuoso del agua en el que participan el gobierno, diversas industrias y distintas

organizaciones y actores de la sociedad. Cabe mencionar que para su implementación es recomendable que esta propuesta sea ampliada y profundizada mediante información primaria utilizando distintas estrategias metodológicas, principalmente, la investigación acción participativa.

La recarga de acuíferos no debe aplicarse de manera aislada sino apoyarse conjuntamente con otros modelos de tal forma que los beneficios se incrementen a menores costos. La ciudad de Aguascalientes tiene la necesidad y los elementos necesarios para promover el desarrollo de proyectos de infiltración de este tipo; los ciudadanos han demostrado interés y conciencia ambiental (no solo en materia de agua sino también respecto a la movilidad urbana, derechos animales, entre otros aspectos) la voluntad política, el marco normativo, la disponibilidad de agua (tratada y pluvial) y las áreas verdes donde llevar a cabo la recarga artificial.

Algunas recomendaciones que pueden favorecer la propuesta:

La promoción de la reducción del consumo y reúso del agua es la solución por excelencia frente a la explotación de los acuíferos. Pero más que campañas de concientización sobre el uso del agua (como es usual) resultaría de mayor utilidad el desarrollo de una plataforma en línea, puesto que la información está disponible en todo momento; manuales, videos y tutoriales sobre cómo implementar las técnicas de baja complejidad. Puede tomarse como ejemplo el sitio web, anteriormente mencionado del Departamento del Agua de Filadelfia (PWD) que, junto con incentivos económicos, puede resultar en una herramienta de mayor alcance, pues abarca viviendas, centros de estudio, oficinas, entre otros.

El diseño no debe menospreciarse ya que es una parte importante de la funcionalidad y la estética que contribuye a la apropiación de los usuarios. Se hace hincapié en el diseño de los jardines de infiltración bajo técnicas de bioretención y fitoremediación debido a la contaminación del entorno urbano y para mantener la salud del acuífero, debe incluirse también un análisis de la zonificación secundaria y focos de contaminación, para definir zonas de riesgos para implantación de las técnicas de infiltración. En lo posible el diseño debe favorecer la biodiversidad prefiriendo las especies nativas.

Frente al cambio climático se esperan mayores precipitaciones y sequías por lo cual la disponibilidad de agua debe ser un factor a considerar en la planeación urbana y en los planes económicos. Ya no es viable y no debe asumirse que tanto la cantidad como la calidad el agua subterránea estará disponible para nuevos proyectos (Ganster et al. 2002). Como bien remarcan (Sandström et al. 2006) la legislación es la fuerza motriz que determina la presencia de áreas verdes, en la periferia de la ciudad existen cerca de 6400ha de reserva para el crecimiento urbano por tanto la inclusión de modelos de bajo impacto y métodos de recarga en las políticas de planeación es de vital importancia en la construcción de futuros desarrollos, las inmobiliarias deben garantizar un desarrollo de bajo impacto que favorezca la infiltración.

REFERENCIAS

- Abbott, J., 2005. Sustainable urban drainage. *Horticulture Week*, pp.28–29. Available at: <http://ezproxy.usherbrooke.ca/login?url=http://search.proquest.com.ezproxy.usherbrooke.ca/docview/225447183?accountid=13835>.
- Andoh, R. & Kennehth, I., 2002. Sustainable Urban Drainage Systems: - A UK Perspective. En E. Strecke & H. Wayne, eds. *Global Solutions for Urban Drainage*. Portland, Oregon: American Society of Civil Engineers, pp. 1–16.
- Arreguín, F.I., 2011. El agua subterránea es vital para el desarrollo de México. En *Simposio: Las ciencias de la Tierra en el estudio del Agua Subterránea*. México: Sociedad Geológica Mexicana, A. C., p. 39. Available at: <http://www.sociedadgeologica.org.mx/simposiodelagua.html>.
- Bach, P.M., Mccarthy, D.T. & Deletic, A., 2015. Can we model the implementation of water sensitive urban design in evolving cities? *Water Science & Technology*, 71(1), p.149. Available at: <http://www.iwaponline.com/wst/07101/wst071010149.htm>.
- El Banco Mundial, 2009. *Poverty and Social Impact Analysis of Groundwater Over-exploitation in Mexico*,
- Bañuelos, C., 2014. Lluvia y granizo causan inundaciones en Aguascalientes. *La Jornada*. Available at: <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/08/08/lluvia-y-granizo-causan-inundaciones-en-aguascalientes-984.html>.
- Bayari, S. et al., 2006. Groundwater age: a vital information in protecting the groundwater dependent ecosystem. *Groundwater and ecosystems*, pp.33–46.
- Becker, M. et al., 2006. A stormwater management information system for the catchment area of the River Emscher. *Water Practice & Technology*, 1(1).
- Birky, J., 2009. *The modern community garden movement in the United States : its roots , its current condition and its prospects for the future*. University of South Florida. Available at: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/1860>.
- Björklund, A.G. et al., 2009. Demographic, economic and social drivers. , pp.29–40.
- Böhlke, J.K., 2002. Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal*, 10, pp.153–179.
- Boily, M.-É., 2012. *L'agriculture périurbaine et urbaine au Québec: état de situation et perspectives*, Québec.

- Bosch, A.P., 2001. Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. En A. Pulido Bosch, P. A. Pulido Leboeuf, & J. M. Calaforra Chordi, eds. *Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas*. España, pp. 115–132.
- Bryson, J., 2013. The Nature of Gentrification. *Geography Compass*, 8, pp.578–587.
- Caldera, A.R., 2006. Balance y expectativas de la gobernanza del agua en Aguascalientes. Una reflexión en torno a los quince años de participación privada en el servicio de agua potable y alcantarillado. *El Agua Potable en México: Historia Reciente, Actores, Procesos y Propuestas*, pp.1–20.
- Carabias, J. & Herrera, A., 1986. La ciudad y su ambiente. *Cuadernos Políticos*, pp.56–60.
- Carmon, N. & Shamir, U., 2010. Water-sensitive planning: Integrating water considerations into urban and regional planning. *Water and Environment Journal*, 24(3), pp.181–191.
- Carrillo, J., Cardona Benavides, A. & Hergt, T., 2005. Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México. En B. JIMÉNEZ & L. MARÍN, eds. *El agua en México vista desde la academia*. México, pp. 137–158.
- CBD, 2012. *Cities and Biodiversity Outlook*, Available at: <http://www.cbd.int/authorities/doc/cbo-1/cbd-cbo1-summary-en-f-web.pdf>.
- CEPLAP, 2011. *Programa Sectorial de Gestión Urbanística y Ordenamiento Territorial 2010 - 2016*, Aguascalientes. Available at: http://www.aguascalientes.gob.mx/transparencia/informacion/PROGRAMAS/Sector_Gestion.pdf.
- Chambel, A., 2006. Groundwater in semi-arid Mediterranean areas: Desertification, soil salinization and ecosystems. *Groundwater and Ecosystems*, 70, pp.47–58.
- Chandran, A. & Gowda, K., 2014. Water Sensitive Urban Design: Investigating Opportunities for Thiruvananthapuram. *Environmental Quality Management*, 49(4), pp.1–13.
- Chaussard, E. et al., 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, pp.94–106. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>.
- Chaussard, E. et al., 2013. Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, pp.150–161. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>.

- Chávez, R., 2013. LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN MEXICO. En *Jornadas Técnicas. Instituto de Ingeniería, UNAM*. Mexico, D.F., pp. 1–22.
- Checker, M., 2011. Wiped out by the “Greenwave”: Environmental gentrification and the paradoxical politics of urban sustainability. *City and Society*, 23(2), pp.210–229.
- Chilton, J. & Seiler, K., 2006. Groundwater occurrence and hydrogeological environments. En World Health Organization, ed. *Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources*. Londres, pp. 22–48.
- Chowdhury, U. et al., 2000. Groundwater arsenic contamination in Bangladesh and West Bengal, India. *Environmental Health Perspectives*, 108(5), pp.393–397.
- Comisión de Cuenca del Río Turbio, 2014. Implementación de Zonas de Amortiguamiento ante inundaciones en la Cuenca del Río Turbio como medida de adaptación al cambio climático. En Celaya, pp. 1–26.
- CONAGUA, 2010. Agenda del Agua 2030. *Organismos de Cuenca*, pp.1 – 28. Available at: http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA_ORGANISMOS_DE_CUENCAS/MATERIAL_ADICIONAL/PRESENTACIONES/PARTICIPANTES/MEXICO/Mexico_Cuencas_2.pdf.
- CONAGUA, 2013a. Atlas del Agua en México 2013. , pp.1–144. Available at: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-3-14baja.pdf>.
- CONAGUA, 2012. Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS). *Atlas Digital del Agua de México 2012, Sistema Nacional de Información del Agua*, pp.1–6. Available at: http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/41/index_svg.html [Accedido marzo 7, 2015].
- CONAGUA, 2013b. *Compendio Estadístico de Administración del Agua (CEAA), edición 2013*, Mexico, D.F. Available at: <http://201.116.60.96:8080/work/sites/ceaa/resources/LocalContent/204/9/CEAA2013.pdf>.
- CONAGUA, 2008. *Diagnóstico y Potencial de Reúso de Aguas Residuales Tratadas en el Valle de Aguascalientes*, Aguascalientes.
- CONAGUA, 2013c. *Estadísticas del Agua en México*, Mexico, D.F.
- CONAGUA, 2013d. *Gaceta de Administración del Agua, 2013*, Mexico, D.F.
- CONAGUA, 2015a. INFOMEX-Respuesta a la solicitud con número de folio: 1610100019215. , pp.1–11.

- CONAGUA, 2015b. INFOMEX-Respuesta a la solicitud con numero de folio: 1610100019215.
- CONAGUA, 2011. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación Diciembre de 2011*,
- Cook, L.L., Inouye, R.S. & McGonigle, T.P., 2009. Evaluation of four grasses for use in phytoremediation of Cs-contaminated arid land soil. *Plant and Soil*, 324(1), pp.169–184.
- Cortez, F.J., 2012. *Recarga artificial de acuíferos mediante pozos de infiltración*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- COTAS, 2006. *Escenarios del Agua 2015 y 2030 en el Acuífero Interestatal Ojocaliente – Aguascalientes - Encarnación : acciones para un desarrollo con sostenibilidad ambiental*,
- CPEUM, 2014. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Cuesta, M.V., 2010. Propiedades Hidráulicas De Los Acuíferos. *Curso de introducción a las aguas subterráneas*, p.36. Available at: <http://www.aguassub.com/aguassubpdf/TEMA 4-PROPIEDADES HIDRAULICAS DE LOS ACUIFEROS.pdf> [Accedido mayo 20, 2015].
- Datry, T., Malard, F. & Gibert, J., 2006. Effects of artificial stormwater infiltration on urban groundwater ecosystemsr, Urban Groundwater Management and Sustainability. En *Groundwater and ecosystems*. pp. 331–345. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-5175-1_27.
- Davis, A. et al., 2003. Water quality improvement through bioretention: lead, copper, and zinc remova. *Water Environment Research*, 75(1), pp.73–82.
- Delgado, J., 2002. Hacia una planificación urbana para la reducccón de riesgos ambientales. Vulnerabilidad urbana del área metropolitana de Caracas. *Revista urbana*, 7(30).
- Department of Environment Climate Change and Water, 2010. Investigating the links between streams and groundwater systems. , pp.1–2.
- Díaz Padilla, G. et al., 2011a. Mapeo Del Índice De Aridez Y Su Distribución Poblacional En México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVII, pp.267–275.
- Díaz Padilla, G. et al., 2011b. Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVII, pp.267–275.

- Dillon, P., 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13, pp.313–316.
- Dillon, P. et al., 2009. *Managed aquifer recharge : An Introduction*, National Water Commission. Available at: http://www.nwc.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/10442/Waterlines_MAR_completeREPLACE.pdf.
- DINA-MAR, 2010. *La Gestión De La Recarga Artificial De Acuíferos En El Marco Del Desarrollo Sostenible* GRAFINAT, ed., Madrid.
- EPA, 2012. Around the Water Cooler : Riparian Buffers. Available at: <http://blog.epa.gov/science/2012/09/around-the-water-cooler-riparian-buffers/> [Accedido marzo 18, 2015].
- EPA, 2015. Groundwater Impacts. *Water: Green Infrastructure*, 39(2), pp.2–3. Available at: http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/gi_gwimpacts.cfm [Accedido marzo 28, 2015].
- Espino, E., 2011. El PSHCVM y los programas de recarga artificial de acuíferos y reúso de agua. En *Jornadas Técnicas sobre la recarga de acuíferos y reúso de agua*. México, D.F., pp. 1–54.
- Falkenmark, M., Lundqvist, J. & Widstrand, C., 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural resources forum*, 13, pp.258–267.
- FAO, 2014. Incremento en la Competencia por el Agua. Available at: <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Mixed1/MS1water.htm> [Accedido marzo 22, 2015].
- FAO, 2000. Urban forestry issues in north america and their global linkages. , pp.1–12. Available at: <http://www.fao.org/docrep/meeting/X4999e.htm> [Accedido marzo 13, 2015].
- Fenwick, G., 2006. Groundwater fauna. Measure to manage: what to measure? En pp. 1–15. Available at: <http://www.deh.gov.au/soe/2006/emerging/fauna/index.html>.
- Fernández, E., 2004. *Recarga artificial de acuíferos en cuencas pluviales: aspectos cualitativos y medioambientales criterios técnicos derivados de la experiencia en la cubeta de Santiuste (SEGOVIA) Memoria*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.
- Francis, R. & Chadwick, M., 2013a. Ecosystem within urban regions: green space. En *Urban Ecosystems : Understanding the Human Environment*. New York: Routledge, pp. 73–89.

- Francis, R. & Chadwick, M., 2013b. Urban form, structure and dynamics. En *Urban Ecosystems : Understanding the Human Environment*. New York: Routledge, pp. 21–50.
- Ganster, P. et al., 2002. Tecate, Baja California: Realities and Challenges in a Mexican Border Community. , p.259. Available at: [https://books.google.com.mx/books?id=yxGbhJa5BycC&pg=PA245&lpg=PA245&dq=urban+green+spaces+and+groundwater+recharge&source=bl&ots=8lFeK4N_-3&sig=PC-qso08rLFepOCVKGrj8Xe3wqM&hl=es&sa=X&ei=I5T3VLrvCcS6ggSfpYTwDQ&ved=0CFEQ6AEwBg#v=onepage&q=urban green space](https://books.google.com.mx/books?id=yxGbhJa5BycC&pg=PA245&lpg=PA245&dq=urban+green+spaces+and+groundwater+recharge&source=bl&ots=8lFeK4N_-3&sig=PC-qso08rLFepOCVKGrj8Xe3wqM&hl=es&sa=X&ei=I5T3VLrvCcS6ggSfpYTwDQ&ved=0CFEQ6AEwBg#v=onepage&q=urban%20green%20space).
- Garduño, H. et al., 2006. *Recarga del Agua Subterránea con Aguas Residuales Urbanas evaluación y manejo de los riesgos y beneficios*,
- Garvin, E. et al., 2013. More than just an eyesore: Local insights and solutions on vacant land and urban health. *Journal of Urban Health*, 90(3), pp.412–426.
- Gobierno de Islington, 2012. *Promoting Sustainable Drainage Systems, Design Guidance for Islington*, Islington. Available at: http://www.islington.gov.uk/services/parks-environment/sustainability/sus_water/Pages/SUDS.aspx.
- Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2015. Inversión Extranjera y Apertura de Empresas. *Apoyo a empresas*. Available at: <http://www.aguascalientes.gob.mx/transparencia/economico/sedec/inversion.aspx> [Accedido marzo 24, 2015].
- Goddard, M. a., Dougill, A.J. & Benton, T.G., 2010. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(September), pp.90–98.
- González, F., 2012. *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación* Primera ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ed., México, D.F.
- Guitart, D., Pickering, C. & Byrne, J., 2012. Past results and future directions in urban community gardens research. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(4), pp.364–373. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.007>.
- Guzman, G. et al., 2011. Evaluación espacio – temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27, pp.1–12.
- H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes, 2014a. Gobierno municipal dotará a vecinos del oriente con nueva infraestructura hidrosanitaria. *Boletín No. 520*.

- Available at: <http://www.ags.gob.mx/cont.aspx?p=2901#.VRcoAPmG9JI> [Accedido marzo 27, 2015].
- H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes, 2014b. Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Aguascalientes 2013-2040. *Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes*, LXXVII.
- H. Ayuntamiento del municipio de Aguascalientes, 2014c. Programa de Desarrollo Urbano del Municipio de Aguascalientes 2013-2035. *Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes*, LXXVII.
- Hernández, A., 2013. Agua de lluvia-Recarga de acuíferos Iztapalapa. En *Segundas jornadas técnicas sobre la recarga artificial de acuíferos y reuso de agua*. México, D.F., pp. 1–47.
- Hernandez, V.H., 2010. *El banco de agua: un mecanismo de reasignación eficiente del agua*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Houdret, A., 2006. The social and political impact of groundwater overexploitation in Morocco New approaches to conflict and cooperation potential 1 . Water Scarcity as an issue of Environmental and Human Security. , pp.1–11.
- Howard, G. & Bartram, J., 2003. Domestic Water Quantity, Service Level and Health. *World Health Organization*, p.39. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/wsh0302/en/.
- Humphreys, B., 2006. *Groundwater fauna*, Canberra: Australian State of the Environment Committee. Available at: <http://www.deh.gov.au/soe/2006/emerging/fauna/index.html>.
- IAEA, 2003. Glosario hidrogeológico. *Glosario hidrogeológico*, (1980), pp.587–591. Available at: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO ISÓTOPOS/Parte final/4-Glosario hidrogeológico.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO_ISOTOPOS/Parte%20final/4-Glosario%20hidrogeológico.pdf) [Accedido mayo 23, 2015].
- IGME, 2010. Lo sistemas acuíferos transfronterizos en la americas. En Instituto Geológico y minero de España, ed. *Lo sistemas acuíferos transfronterizos en la americas*. Zaragoza, pp. 24–36. Available at: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf.
- IGRAC, 2014. Groundwater: The hidden resouce. *The hidden resouce Campaing*. Available at: <http://www.un-igrac.org/publications/330> [Accedido marzo 7, 2015].
- IGRAC, 2015. International Groundwater Resources Assessment Centre. Available at: <http://www.un-igrac.org/> [Accedido marzo 7, 2015].

- IGRAC, 2012. MAR-Global overview. *Global Inventory of Managed Aquifer Recharge*. Available at: <http://ggmn.e-id.nl/ggmn/GlobalOverview.html> [Accedido marzo 13, 2015].
- IGRAC & Acacia Institute, 2007. *Artificial Recharge of Groundwater in the World*,
- IMAE, 2015. Disponibilidad del Agua. *Sistema de indicadores ambientales del estado de aguascalientes*. Available at: http://www.aguascalientes.gob.mx/IMAE/Indicadores/disponibilidad_agua.ASPX [Accedido marzo 6, 2015].
- IMPLAN, 2013a. Ficha técnica del archivo edafológico 1:250,000 del municipio de Aguascalientes.
- IMPLAN, 2007. Programa de Desarrollo Urbano de la ciudad de Aguascalientes 2030 “la ciudad que queremos”. *Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes*, LXXI, pp.1–276.
- IMPLAN, 2013b. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del del Municipio de Aguascalientes. *Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial*. Available at: <http://www.implanags.gob.mx/index.php?pagina=PROGOET> [Accedido marzo 23, 2015].
- IMPLAN, 2013c. Regiones urbanas del municipio de Aguascalientes. *Sistema Municipal de Información Geográfica y Estadística de Aguascalientes*, (103). Available at: <http://www.smigeags.gob.mx/index.php?page=MAPS&idm=15#map> [Accedido abril 3, 2015].
- INAGUA, 2010. Aguas Subterráneas del estado (Acuíferos). *Aguas Subterráneas y Superficiales*. Available at: <http://www.aguascalientes.gob.mx/inagua/inagua/AguasSubterráneas.jpg> [Accedido abril 1, 2015].
- INAGUA, 2012. *Estudio de la recarga artificial del acuífero del Valle de Aguascalientes*, Aguascalientes.
- INEGI, 2013. “ *Estadísticas a Propósito Del Día Mundial De La Lucha Contra La Desertificación Y La Sequía* ”, Aguascalientes. Available at: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/sequia0.pdf>.
- INEGI, 2010. *Censo de Población y Vivienda 2010 . Cuestionario básico*,
- Israfilov, R., Israfilov, Y. & Ismailova, M., 2006. The impact of groundwater production and exploitation on ecosystem in Azerbaijan. En A. Baba, K. Howard, & O. Gunduz, eds. *Groundwater and ecosystems*. pp. 167–181.

- Javier, F. et al., 2011. Calidad del agua en el estado de Aguascalientes y sus efectos en la salud de la población. En *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca: UNAM, pp. 317–328.
- Kabisch, N., 2014. Local benefits and challenges of green space development and ecosystem service implementation in urban planning. *Land Use Policy*, 42, p.submitted. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.09.005>.
- Kowarik, I., 2011. Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution*, 159(8-9), pp.1974–1983. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.022>.
- Kruse, E. et al., 2013. Recharge assessment in an urban area: a case study of La Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 21(5), pp.1091–1100. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-013-0981-4>.
- Kuiper Compagnons, 2015. Official start of coastal protection project for safer Jakarta. *News*, pp.4–7. Available at: <http://www.kuiper.nl/en/news/official-start-of-coastal-protection-project-for-safer-jakarta/> [Accedido marzo 6, 2015].
- Lambán, L.J. & Manzano, M., 2012. Aspectos relevantes de los acuíferos y de las aguas subterráneas Los acuíferos y las aguas subterráneas en España. *Ambiente*. Available at: <http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/pdfs/versionpdf/Subterraneas.pdf>.
- De Lange, P., 2011. *Urban Agriculture in Amsterdam Understanding the recent trend in food production activities within the limits of a developed nation's capital*. Institute for Environmental Studies.
- Li, W., Saphores, J.M. & Gillespie, T.W., 2015. A comparison of the economic benefits of urban green spaces estimated with NDVI and with high-resolution land cover data. *Landscape and Urban Planning*, 133, pp.105–117.
- Mankad, A., Walton, A. & Alexander, K., 2013. Dimensions of public acceptance for stormwater and managed aquifer recharge. *Oz Water '13*, 89, pp.214–223. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.028>.
- Marañón-Pimentel, B., 1999. La gestión del agua subterránea en Guanajuato. La experiencia de los COTAS. *Estudios Agrarios*, 12, pp.153–173.
- Martínez, E.P. et al., 2006. Un recurso vital: retos y propuestas. *El faro*, V, p.16.
- Mendez, M.O. & Maier, R.M., 2008. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(1), pp.47–59.

- Miranda, L., 2006. Enfoque indirecto de valoración: el método de los precios hedónicos. Available at: http://es.slideshare.net/liliamiranda.a?utm_campaign=profiletracking&utm_medium=sssiste&utm_source=ssslideview.
- Montesillo, C. & Crespo, J., 2006. Cantidad de agua que consume al día cada persona en México. En *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*. Mexico, D.F., pp. 1–96.
- MPCA, 2015. Bioretention terminology. *Minnesota Stormwater Manual*, pp.1–9. Available at: http://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Bioretention_terminology [Accedido marzo 29, 2015].
- Murillo, J.M. et al., 2000. Recarga artificial en el abastecimiento de núcleos urbanos. *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de alicante*. Available at: <http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libro36/lib36.htm>.
- Niemelä, J. et al., 2010. Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: A Finland case study. *Biodiversity and Conservation*, 19(11), pp.3225–3243.
- ONU, 2008. *Agricultura, sequía, desertificación, tierra y desarrollo rural*, Available at: <http://www.un.org/esa/agenda21/natlinfo/countr/mexico/agriculture.pdf>.
- ONU-HABITAT, 2009. Agua y Saneamiento. Available at: http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_content&view=article&id=92&Itemid=2 [Accedido enero 27, 2015].
- Ordoñez, J., 2011. Aguas Subterráneas — Acuíferos. , p.44. Available at: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Aguas_Subterraneas.pdf.
- Ortega, A., 2009. Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, pp.143–161.
- Oswald, Ú. & Hernández, M. de L., 2005. *El valor del agua: Una visión Socioeconómica de un Conflicto Ambiental* Primera ed. Coltlax et al., eds., Mexico, df.
- Pacheco, J. et al., 2011. Soil Cracks related to land subsidence . The main geotechnical hazard affecting to constructions in Aguascalientes City , México . En Canadian Geotechnical Society & International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, eds. *Geo-Innovation Addressing Global Challenges*. Toronto, pp. 1–8. Available at: <http://www.stevhalliday.com/>.

- Palma, A. et al., 2014. Inventario de la Recarga Artificial en México. En *XXIII Congreso nacional de hidráulica*. Puerto Vallarta, Jalisco, pp. 1–6.
- Peñuela, L.A., Joel, A.J. & Rivera, C., 2012. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales : sur de la Mesa Central , México. *Geografía física*, 81, pp.18–32.
- Puri, S., 2006. Global change, its impact on functions of aquifer systems and their dependent ecosystems. *Groundwater and Ecosystems*, 70, pp.289–293. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-4738-X_23.
- PWD, 2015. Residents. *What's in it for you*, pp.2–3. Available at: <http://www.phillywatersheds.org/residents> [Accedido marzo 29, 2015].
- Rae Brown, J., 2012. *spaces for developing sociocultural capital: a case study of community gardens in an agrarian community*. North Dakota State University of Agriculture and Applied Science.
- Romeiro, S. et al., 2007. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. *Bragantia*, 66(2), pp.327–334.
- Sainz, J. & Becerra, M., 2003. Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica*, pp.1–9. Available at: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/conf_agua_mex.pdf.
- Sandström, U.G., Angelstam, P. & Khakee, A., 2006. Urban comprehensive planning - Identifying barriers for the maintenance of functional habitat networks. *Landscape and Urban Planning*, 75, pp.43–57.
- Schofield, D., 2012. *Community outreach for surface water management*, Londres.
- SEGUOT, 2014a. Programa Estatal de Desarrollo Urbano Aguascalientes 2013-2035. *Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes*, LXXVII.
- SEGUOT, 2014b. Programa Estatal de Ordenamiento Ecológico y Territorial de Aguascalientes 2013-2035. *Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes*, LXXVII.
- SEMADESU, 2013. *Programa de rehabilitación y rescate de microcuencas “REVIVE TU ARROYO ”*, Aguascalientes. Available at: <http://www.agscumple.gob.mx/phpSIME/evidencias/programa de rehabilitacion y rescate de microcuencas ajustado.pdf>.
- SEMARNAT, 2015. CAPÍTULO 6. AGUA. *Informe de la situación del medio ambiente en México*, pp.1–19. Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/06_agua/cap6_2.html [Accedido abril 1, 2015].

- SEMARNAT, 2007. *Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007-2012*, México, D.F.
- Serrano, J. & Núñez, E., 2002. El agua subterránea en México. , pp.1–32. Available at: http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA_HIDROGEOLOGIA/MATERIAL_ADICIONAL/PONENCIAS_HIDROGEOLOGIA/PARTICIPANTES/Mexico/Hidrogeologia_en_Mexico.pdf.
- Shah, T., 2005. Groundwater and human development: Challenges and opportunities in livelihoods and environment. *Water Science and Technology*, 51, pp.27–37.
- Shirdam, R. et al., 2009. Enhanced biodegradation of hydrocarbons in the rhizosphere of plant species in semi-arid regions. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, (March 2000), pp.1–5.
- Shrestha, R.R. et al., 2003. Groundwater arsenic contamination, its health impact and mitigation program in Nepal. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 38(1), pp.185–200.
- Smit, J., Nasr, J. & Ratta, A., 2001. Problems Related to Urban Agriculture. *Urban Agriculture: Food, Jobs and Sustainable Cities*, p.33.
- Smith, A., Rahman, M. & Lingas, E., 2000. *Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency*,
- Solomon, S. et al., 2007. “Changes in Surface Climate: Precipitation, Drought and Surface Hydrology” en IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp.3–4. Available at: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-3.html [Accedido febrero 28, 2015].
- Stein, H. et al., 2012. Stygoregions – a promising approach to a bioregional classification of groundwater systems. *Scientific Reports*, 2, pp.1–9. Available at: <http://www.nature.com/srep/2012/120919/srep00673/pdf/srep00673.pdf>.
- Stovin, V., 2003. Some international examples of SUDS retrofit. *Retrofit SUDS*. Available at: <http://www.retrofit-suds.group.shef.ac.uk/int.html> [Accedido marzo 17, 2015].
- Subramanian, N., 2006. Concreto Permeable – Un Material Ecológico Que Contribuye al Ahorro de los Recursos Hídricos Frente a la Escases de Agua. *The Indian Concrete Journal*, 82, pp.1–18.
- susDrain, 2012. Using SuDS. *Delivering SuDS*, pp.1–5. Available at: <http://www.susdrain.org/delivering-suds/> [Accedido marzo 18, 2015].

- The City of New York, 2015. Green Infrastructure. Available at: http://maps.nyc.gov/doitt/nycitymap/template?applicationName=GREEN_INFRA [Accedido marzo 19, 2015].
- The City of New York, 2011. *NYC green infrastructure plan 2011 update*, New York. Available at: www.nyc.gov/html/dep/html/stormwater/nyc_green_infrastructure_plan.shtml.
- The City of New York, 2014. *Post-construction monitoring green infrastructure*, New York. Available at: http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/cso_long_term_control_plan/post-construction-monitoring-report-gi-neighborhood-demonstration-areas.pdf.
- The NSW Office of Water, 2015. Groundwater. , pp.1–2. Available at: <http://www.water.nsw.gov.au/Water-Management/Ecology/Groundwater/default.aspx> [Accedido febrero 18, 2015].
- Tuinhof, A. et al., 2002. *Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica*, Washington DC. Available at: www.worldbank.org/gwmate.
- UNEP, 2014. *Green infrastructure guide for water management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects*,
- UNESCO, 2005. *Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*,
- UNESCO, 2012. *Gobernanza de las aguas subterráneas: Un marco global para acciones locales*. , pp.1–7.
- UNESCO, 2000. *II Curso Internacional de aspectos geológicos de protección ambiental*.
- UNESCO-WWAP, 2003. *Agua para Todos, Agua para la Vida*., Paris.
- UN-WATER, 2013. *Facts and figures An increasing demand A resource without borders. UN WATER World Water Day 2013, International Year of Water Cooperation*, p.3. Available at: <http://www.unwater.org/water-cooperation-2013/water-cooperation/facts-and-figures/en/> [Accedido febrero 13, 2015].
- UN-WATER, 2010. *Las ciudades afrontan las incertidumbres del agua. Water For Life Decade*, pp.2–5. Available at: http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/swm_cities_zaragoza_2010/pdf/02_water_uncertainties_spa.pdf.
- UN-WATER, 2014. *Un Objetivo Global para el Agua Post-2015: Síntesis de las Principales Conclusiones y Recomendaciones de ONU-Agua*,

UN-WATER, 2015. Water and Ecosystems. *World Water Development Report 2012*. Available at: <http://www.unwater.org/topics/water-and-ecosystems/en/>.

Valdivia, C., 2013. Sobreexplotación del agua subterránea en la ciudad de México: Perspectivas y política pública. , p.19. Available at: http://coloquioas.paot.mx/archivos/presentaciones/26_Carlos_Angel_Valdivia_Martinez.pdf.

De Vries, J. & Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology*, 10(1), pp.5–17.

Waltham, T., 2002. Sinking cities. *Geology Today*, 18, pp.95–100.

Ward, J. & Dillon, P., 2012. Principles to coordinate managed aquifer recharge with natural resource management policies in Australia. *Hydrogeology Journal*, 20(5), pp.943–956.

WB, 2015. GW-MATE Briefing Notes. *Briefing Notes Series*. Available at: <http://water.worldbank.org/node/83769> [Accedido marzo 7, 2015].

Wegerich, K., 2006. Groundwater institutions and management problems in the developing world. En J. Tellam, M. Rivett, & R. Israfilov, eds. *Urban Groundwater Management and Sustainability*. Springer, pp. 447–458.

Werner, A.D. et al., 2013. An Initial Inventory and Indexation of Groundwater Mega-Depletion Cases. *Water Resources Management*, 27, pp.507–533.

Wetlands International, 2015. Green Coast-the Tsunami Response. , pp.1–3. Available at: <http://www.wetlands.org/Whatwedo/Ouractions/tabid/2661/mod/601/articleType/ArticleView/articleId/10/Green-Coast--the-Tsunami-Response.aspx> [Accedido marzo 18, 2015].

White, I. & Howe, J., 2005. Unpacking the barriers to sustainable urban drainage use. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 7(1), pp.25–41.

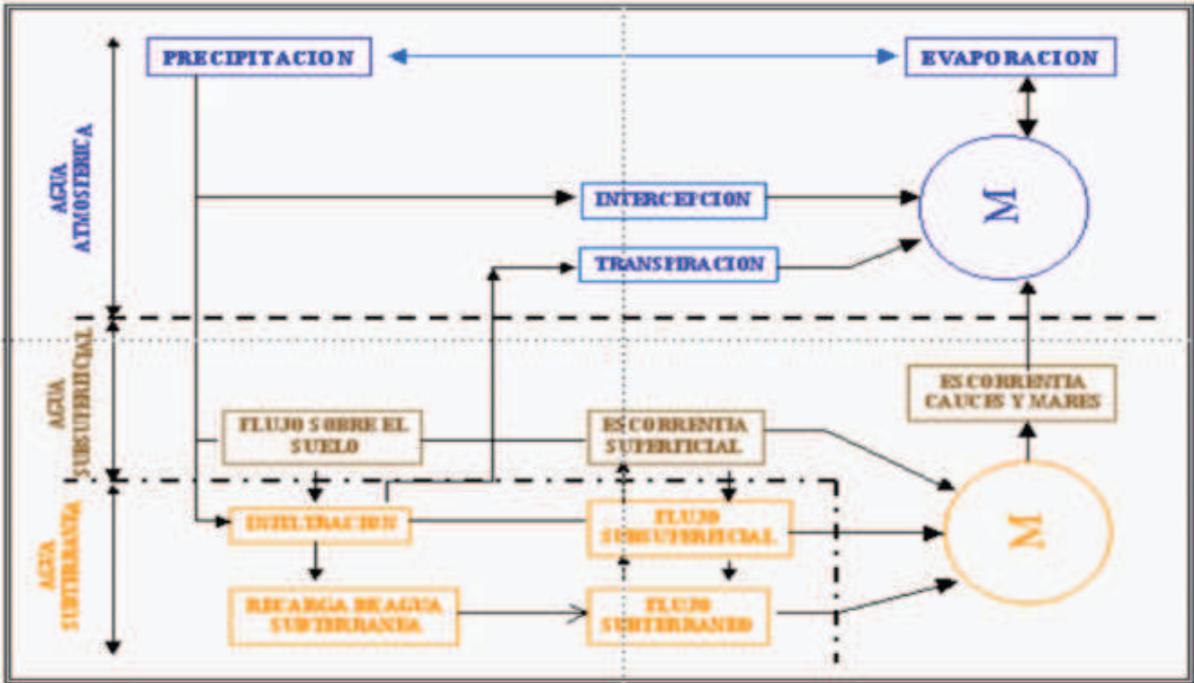
Wong, C.I. et al., 2012. Impact of urban development on physical and chemical hydrogeology. *Elements*, 8, pp.429–434. Available at: http://www.academia.edu/3249578/Impact_of_urban_development_on_hydrology_and_geochemistry.

Wong, T., 2002. Urban Stormwater Management and Water Sensitive Urban Design in Australia. *Urban Drainage 2002*, (978), p.14. Available at: <http://link.aip.org/link/?ASC/112/22/1&Agg=doi>.

- WWC, 2015. Forums. *Global Water Framework: Outcomes of the 4th, 5th and 6th World Water Forums*, (April 2013). Available at:
<http://www.worldwatercouncil.org/forum/daegu-gyeongbuk-2015/>.
- Yang, M. et al., 2011. Human Health Risk Assessment Model of Organic Pollution in Groundwater: Shijiazhuang Industrial Zone. *Geological Society of China*, 85(6), pp.1508–1517.
- Zandaryaa, S., 2010. *Water in Cities (short film)*, Paris, Francia: UNESCO. Available at:
<http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001909/190900e.pdf>.
- Zhang, B. et al., 2012. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 100, pp.65–71.
- Zhou, X. & Rana, M.M.P., 2012. Social benefits of urban green space: A conceptual framework of valuation and accessibility measurements. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 23(2), pp.173–189.

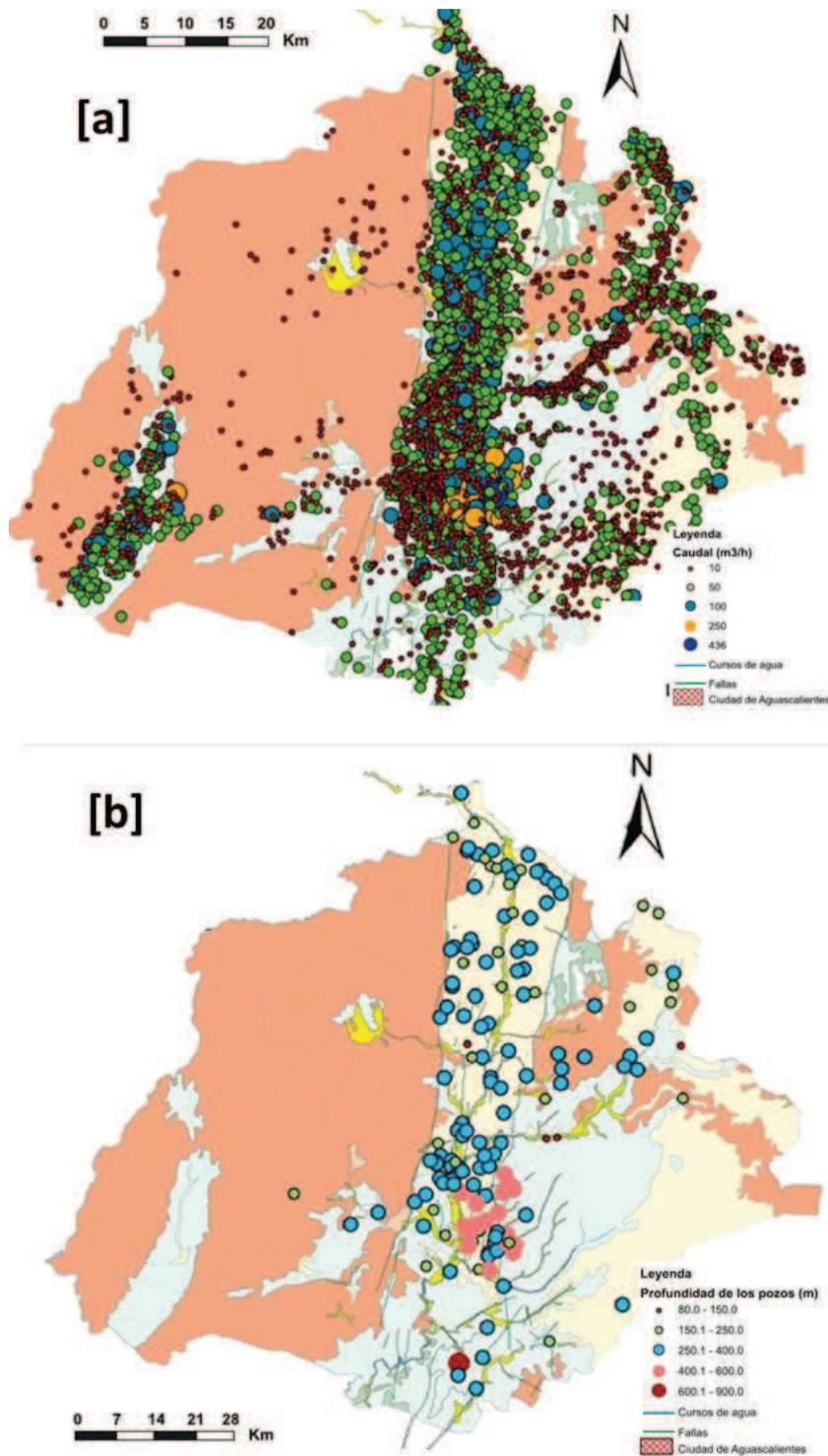
ANEXOS

Anexo 1 Sistema hidrológico



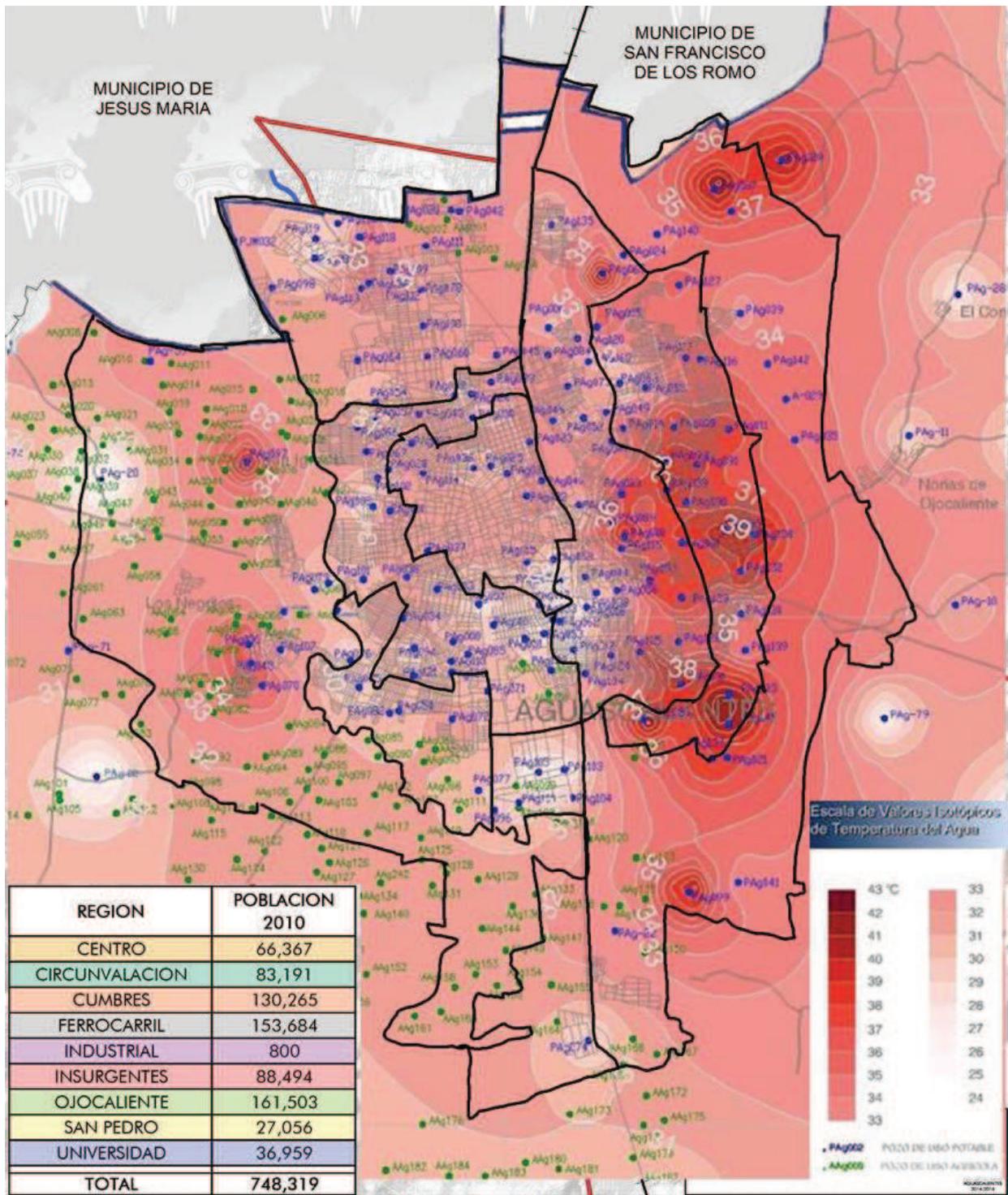
Fuente: Estrella, 1992 en Ordoñes (2011).

Anexo 3 Situación de los pozos de extracción del Valle de Aguascalientes



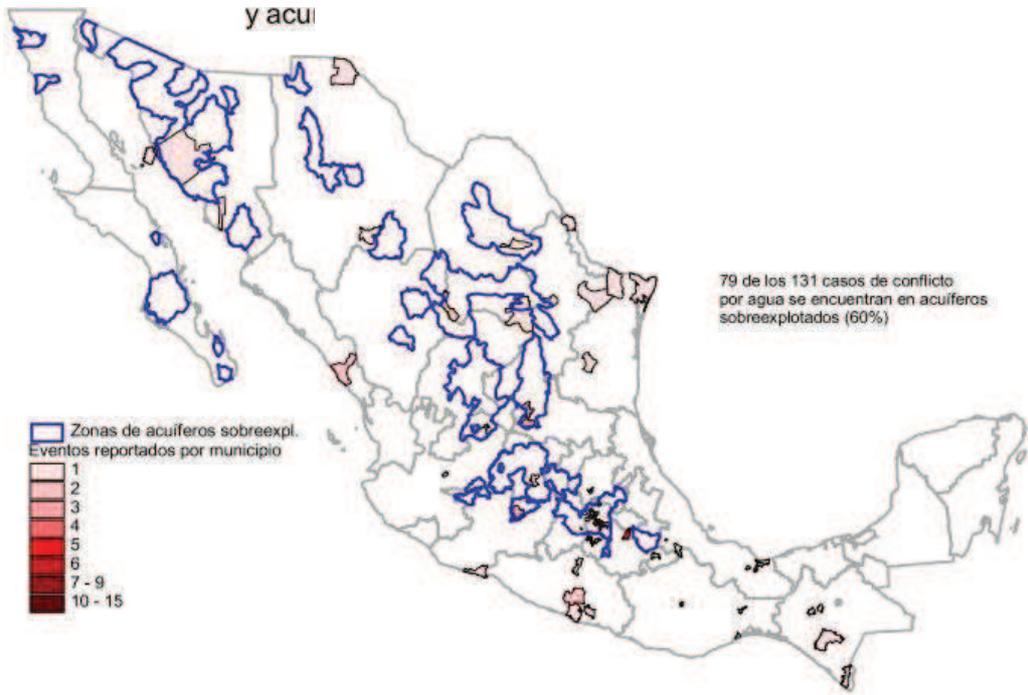
Fuente: modificados de (INAGUA 2012); [a] caudales de extracción, [b] profundidad de las perforaciones.

Anexo 4 Temperatura del agua extraída en las regiones urbanas



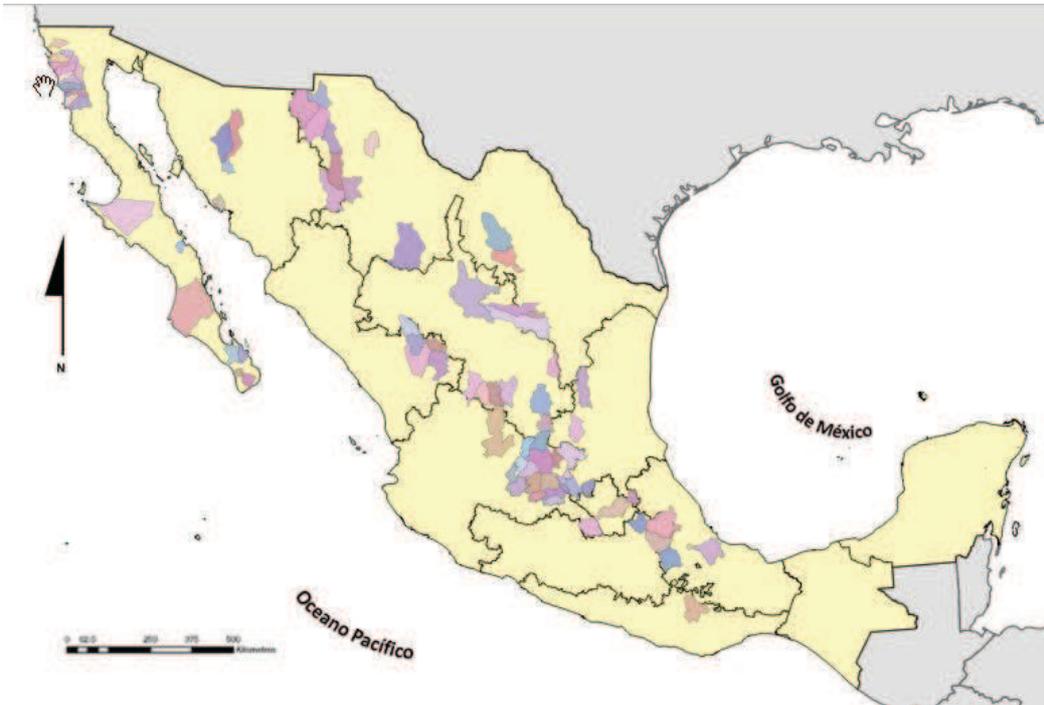
Fuente: modificado de Regiones urbanas de (IMPLAN 2013c); Temperatura del agua extraída y pozos (INAGUA 2012).

Anexo 5 Número de conflictos por agua en México y acuíferos sobreexplotados 1990-2002



Fuente: (Sainz & Becerra 2003)

Anexo 6 Presencia de Comités Técnicos de Agua Subterránea (COTAS)



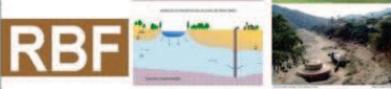
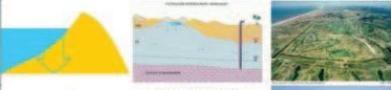
Fuente: (CONAGUA 2013c)

Anexo 7 Clasificación de técnicas MAR. Continua...

N	SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO	ICONO	FIGURA	FOTO	LEYENDA
1	DISPERSION	BALSAS DE INFILTRACION / HUMEDALES				Humedal artificial para la recarga del Sanchón, Coca, Segovia. Foto: DINA-MAR
2		CANALES Y ZANJAS DE INFILTRACION				Canal de recarga artificial de la Cubeta de Santuste, Segovia, Spain, operativa desde 2002. Foto: DINA-MAR.
3		CABALLONES/TECNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUIFERO				Caballones en el fondo de una baña de infiltración. California. Foto: D. Peyton
4		CAMPOS DE INFILTRACION (INUNDACION Y DIFUSION CONTROLADA)				Campo de infiltración de Omdel (Namibia). Foto: G. Tredoux.
5		RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO				Recarga artificial por retornos de riego. Extremadura, España.
6	CANALES	DIQUES DE RETENCION Y REPRESAS				Dique de recarga artificial en cabecera de cuencas, Alicante. Foto: DINA-MAR
7		DIQUES PERMEABLES				Dique permeable en Huesca, España. Foto: Tragsatec.
8		SERPENTEOS / LEVEES				Serpenteos en el río Santa Ana, Condado de Orange, California. Foto: A. Hutchinson.
9		ESCARIFICACION LECHO				Escarificación del lecho del río Besòs, Barcelona. Foto: J. Armenter.
10		DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRANEOS				Dique subsuperficial (embalse de arena) en Kytai, Kenia. Foto: Sander de Haas.
11	DIQUES PERFORADOS				Dique perforado. Lanjarón, Granada, España. Foto: Tragsatec.	
12	POZOS	QANATS (GALERIAS SUBTERRANEAS)				Qanat de Carbonero el Mayor. Segovia. Foto: E.F. Escatante.
13		POZOS ABIERTOS DE INFILTRACION				Pozo abierto de infiltración. Arizona, USA. Foto: DINA-MAR
14		POZOS PROFUNDOS Y MNISONDEOS				Pozo de recarga artificial. Cornellà, Barcelona. Foto: DINA-MAR
15		SONDEOS				Sondeo para MAR (ASR) en Adelaida. Foto: P. Dillon.
16		DOLINAS, COLAPSOS...				Colapso cárstico "El Hundimiento". Alicante, España. Foto: DINA-MAR
17		ASR				Dispositivo ASR en Scottsdale, Arizona. Foto: DINA-MAR
18		ASTR				Dispositivo ASTR en California.

Fuente: (DINA-MAR 2010)

Anexo 7 Clasificación de técnicas MAR,

19		BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RIOS (RBF)		Sistema RBF para MAR en Eritrea. Foto: A. Twinhof.
20	FILTRACIÓN	FILTRACIÓN INTERDUNAR		Filtración interdunar cerca de Amsterdam, Holanda. Foto: Allus.
21		RIEGO SUBTERRÁNEO		Riego subterráneo en Andalucía. Foto: Tragsa.
22	LLUVIA	CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO		Captación de lluvia en improductivo para MAR.
23		RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO		Recarga artificial desde el alcantarillado en España. Foto: Tragsa.
24	SUDS	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE		SUDS. Gomeznarro. Madrid. Foto: E.F. Escalante.

Fuente: (DINA-MAR 2010)

Anexo 8 Marco normativo para la recarga de acuíferos en México

Norma	Título
NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
ACLARACIÓN A NOM-001-SEMARNAT-1997	Aclaración / Fe de erratas
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público
NOM-004-SEMARNAT-2002	Protección ambiental-lodos y biosólidos-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos
NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general
NOM-011-CONAGUA-2000	Conservación del recurso agua- que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de la aguas nacionales
NOM-014-CONAGUA-2003	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada
NOM-015-CONAGUA-2007	Infiltración artificial de agua a los acuíferos - características y especificaciones de las obras y el agua
NOM-031-ECOL/1994	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicio y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano municipal
NOM-127-SSA-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización
MODIFICACIÓN A NOM-127-SSA-1995	Modificación

Fuente: INAGUA (2012).