

CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA PARA RECARGA DE MANTOS ACUÍFEROS; ESTUDIO DE CASO CIUDAD DE MÉXICO

María Victoria Sánchez Rodríguez

Introducción

La escasez del agua es un problema que atañe a toda la población en el ámbito mundial. Aunque el agua es un elemento que abunda en grandes cantidades en la tierra, no toda es de calidad potable, ni puede ser utilizada para satisfacer las demandas que se tienen de ella en los sectores que corresponden a la industria, agrícola o usos domésticos entre otros. De toda el agua que existe en el planeta, el 97.91% corresponde al agua de los mares y océanos y solo el 2.09% al agua dulce; se podría pensar que ese porcentaje es suficiente para abastecer a la población mundial si tomamos en cuenta que el 2.09% equivalen a 35.027 millones de kilómetros cúbicos ($M\ km^3$) de agua, pero no es así, el 68.59% del agua cruda del planeta pertenece al hielo polar, por lo que solo se tendrían disponibles 11.03 $M\ km^3$ aún así, este volumen de agua no está al alcance del hombre en su totalidad. Una pequeña porción 0,001 $M\ km^3$ corresponden a aguas biológicas, 10.546 $M\ km^3$ están distribuidas en los mantos acuíferos y la humedad y solamente 0.443 $M\ km^3$ se encuentran en la superficie de lagos, presas, humedales y nieve. Un 0.037% del agua cruda se encuentra como agua atmosférica. Sobre tierras continentales, 0.119 $M\ km^3$ de agua se precipitan en forma de lluvia o nieve de los cuales el 60.50% se evapora. Considerando que del agua disponible, la mayoría está distribuida en los mantos acuíferos, es de estos de donde se extraen grandes volúmenes para abastecer a las poblaciones y sus necesidades.

Esta crisis del agua, se refleja en México; muchos de los ríos del país han ido disminuyendo su caudal casi por completo o se encuentran contaminados. En las grandes ciudades del país, se extraen volúmenes de agua del subsuelo lo que repercute en una sobreexplotación de los acuíferos. Esto no representaría un grave problema si el agua que se extrae se repusiera de manera natural por medio de las precipitaciones y los escurrimientos derivados de las tormentas, pero este fenómeno de recarga se da en bosques y otras áreas permeables las cuales han ido desapareciendo en forma desmesurada por la creciente mancha urbana, por la tala clandestina que se hace en ellos, por los incendios cada vez más frecuentes que algunas veces son provocados por descuidos humanos, considerándose en la actualidad como punto importante los cambios climáticos que se han ido presentando. En la Ciudad de México las precipitaciones alcanzan un promedio anual de 700mm. La recarga del acuífero del Valle de México ocurre en su mayoría en las áreas boscosas del Distrito Federal, en las delegaciones Cuajimalpa, Milpa Alta, Magdalena Conteras, Tlalpan y Tláhuac, en las que se concentra una región ecológica de 71,000ha. El territorio del Distrito Federal cuenta en un 59.5% de su extensión con el suelo de conservación, el cual comprende más de 88,500 ha, incluida la región ecológica.

Cuenca del Valle de México

La cuenca del Valle de México está localizada al sur del altiplano central, en su parte más elevada, el área que abarca es de 9600 kilómetros cuadrados (Km^2). Estaba clasificada hasta la época prehispánica como una cuenca cerrada (endorreica); hasta el siglo XVII en que los conquistadores comenzaron obras de desagüe. Esta cuenca natural tardó 360 millones de años en formarse y al hombre le tomó solo 300 años el convertirla en un valle ecológicamente destruido.

El relieve que caracteriza esta cuenca es variado, abarca sierras, montañas y volcanes; que alcanzan grandes alturas; el Popocatepetl con una elevación de 5438 m. El Iztaccihuatl con 5286 m. son los volcanes más importantes del país; estos conjuntamente con el Ajusco que alcanza una altura de 4153 m. y toda la zona montañosa que rodea el Valle, han drenado a través del tiempo 48 ríos, que en su época llegaron a formar con sus descargas cuatro áreas lacustres; la primera integrada por cinco lagos: Chalco, Xochimilco, Texcoco, San Cristóbal – Xaltocán y Zumpango, que formaban la más importante área lacustre denominada Valle de México; abarcando una extensión de 1100 Km²; se ha conservado muy poco de esta zona, solo existen algunos canales y chinampas en Xochimilco y lagos artificiales en Zumpango y Texcoco; sobreviven las otras tres áreas lacustres aunque son muy pequeñas que son las lagunas de Tochac, Apan y Tecomulco, La primera vierte sobre la laguna de Apan que tiene un área de 5.5 Km², mientras que la de Tecomulco abarca 20 Km², estos tres cuerpos de agua aportan sus aguas al río Papalote, quien a su vez descarga en el río Pachuca que va a abastecer el lago de Zumpango. En la actualidad una gran parte se encuentran entubados.

Esta cuenca está conformada por 24 subcuencas que alimentan al acuífero del Valle de México; las cuales se encuentran distribuidas de la siguiente manera: 39,000ha corresponden a bosques, 33,800 ha a zonas agrícolas, más de 1,300 ha de chinampas y cuerpos de agua, 11,400 ha de pastizales y matorrales y 4,300 ha de asentamientos humanos. En la zona del Ajusco, la sierra de Guadalupe y la sierra Chichinautzin, se produce la mayor recarga del acuífero del Valle de México. Estos son pequeños acuíferos semiconfinados y con un área de recarga de 1825 Km², de la que se extraen 925 M km³ al año. En el Valle de México, aproximadamente del 72 al 78% de la precipitación total se pierde en la atmósfera mediante procesos de evapotranspiración, y solo del 13 al 20% recarga el acuífero

En la Cuenca del Valle de México las precipitaciones alcanzan un promedio anual de 700mm. Que se considera dentro de las más elevadas del mundo. La recarga del acuífero de este Valle ocurre en su mayoría en las áreas boscosas del Distrito Federal, en las delegaciones Cuajimalpa, Milpa Alta, Magdalena Conteras, Tlalpan y Tláhuac, en las que se concentra una región ecológica de 71,000ha. El territorio del Distrito Federal cuenta en un 59.5% de su extensión con suelo de conservación, el cual comprende más de 88,500 ha, incluida la región ecológica. En esta ciudad las tormentas generalmente son muy copiosas y de corta duración, llegándose a precipitar hasta 70mm de lluvia en una sola tormenta. En los ríos y arroyos del Valle de México corren 1300 M m³ del total del agua de las precipitaciones y solo un 10% es almacenado en presas.

En esta cuenca se alberga la zona metropolitana de la Ciudad de México, con sus 18.5 millones de habitantes y un crecimiento acelerado que demanda cada vez más mayores servicios, dentro de los cuales el suministro de agua para consumo humano es esencial, se requiere un suministro de este elemento de 22.7 millones de litros para satisfacer esta demanda.

Aunque el consumo por persona varía dependiendo de varios factores entre los que se cuentan: clima de la región, nivel socio económico y costumbres; disponibilidad de agua; acceso a ella, actividad económica a la que se dedica la población; y el factor que puede considerarse de relevante importancia: la cultura del agua que posea la persona.

En términos generales los consumos por habitante se establecen en la forma siguiente:

Dotación promedio en el medio urbano:

- 250 lts/hab/día en el Distrito Federal
- 176 lts/hab/día en Tijuana, Baja California.
- 180 lts/hab/día en Monterrey, Nuevo León.
- 220 lts/hab/día en Mexicali, Baja California
- 225 lts/hab/día en Naucalpán, Estado de México.
- 116 lts/hab/día en León, Guanajuato.

En apariencia el Distrito Federal consume una cantidad mayor en volúmenes de agua, la realidad es que debido al desperdicio que hacen algunos habitantes de zonas privilegiadas de Distrito Federal; y a las fugas que se tienen de diferente tipo y origen, hay delegaciones como la de Ixtapalapa que reciben solo una dotación de 50 lts/hab./día, teniéndose como promedio 150 lts/hab./día.

La situación no varía mucho en el medio rural en donde la dotación promedio es de 150 lts/hab./día teniéndose como consumo real un promedio de 100 lts/hab./ día

En la actualidad se tiene un balance negativo entre la demanda y la disponibilidad, existe un déficit equivalente a $8 \text{ m}^3/\text{seg.}$ para satisfacer las necesidades básicas de la población de esta cuenca, cuyas demandas crecen en $1.72 \text{ m}^3/\text{seg.}$ al año. La aportación de agua subterránea es del orden de 57 %, mientras que el 43 % restante proviene de fuentes de aguas superficiales de otras cuencas externas.

La Comisión Nacional del Agua hizo una división en el año de 1996, llevando a cabo una división de trece Regiones Administrativas; para dar una solución a la problemática de disponibilidad y aprovechamiento del agua, en esa regionalización se observan datos interesantes de la situación que guarda cada región con respecto a estos parámetros.

En la siguiente tabla se muestran datos de las extracciones hechas en cada región administrativa, para satisfacer diversos usos; así como por su origen y disponibilidad

EXTRACCIONES DE AGUA PARA USOS CONSUNTIVOS (1999)

Región administrativa	Agrícola	Público	Industrial*	Bruta total
	hm ³			
I Península de Baja California	3 294	283	12	3 589
II Noroeste	6 956	377	54	7 387
III Pacífico Norte	9 486	612	102	10 200
IV Balsas	7 891	725	454	9 070
V Pacífico Sur	1 669	301	40	2 010
VI Río Bravo	9 131	1 134	166	10 431
VII Cuencas Centrales del Norte	3 925	309	88	4 322
VIII Lerma – Santiago – Pacífico	11 840	1 776	592	14 208
IX Golfo Norte	3 903	402	458	4 763
X Golfo Centro	2 135	811	1 110	4 056
XI Frontera Sur	1 317	403	324	2 044
XII Península de Yucatán	663	559	65	1 287
XIII Valle de México	2 594	2 225	216	5 035
Nacional	64 804	9 917	3 681	78 402

* Incluye termoeléctricas, excepto las de Petacalco y Dos Bocas
 $1 \text{ hm}^3 = 1 \text{ millón de m}^3$

DISPONIBILIDAD Y EXTRACCIÓN DE ACUERDO AL ORIGEN						
REGIÓN	DISPONIBILIDAD Km ³		EXTRACCIÓN Km ³		BALANCE	
	Superficial	Subterránea	Superficial	Subterránea	Superficial	Subterránea
I. Península de Baja California	2.600	1.364	1.729	1.872	+	-
II. Noroeste	5.210	2.759	4.319	2.818	+	-
III. Pacífico Norte	21.000	1.331	9.628	0.983	+	+
IV. Pacífico Centro	39.540	8.150	8.024	3.516	+	+
V. Pacífico Sur	36.812	1.645	1.389	0.305	+	+
VI. Frontera Norte	6.738	3.501	2.950	4.342	+	-
VII. Nazas – Aguanaval	2.067	1.666	1.361	1.900	+	-
VIII. Lerma – Santiago	14.019	5.293	4.807	4.667	+	+
IX. Golfo Norte	22.860	1.950	3.909	1.272	+	+
X. Golfo Centro	98.063	2.335	2.362	0.840	+	+
XI. Golfo Sur	153.004	6.220	0.692	0.675	+	+
XII. Península	3.250	31.054	-----	1.004	+	+
XIII. Valle de México	2.195+2.200*	1.025	2.547	2.447	-	-

- Importados de la Cuenca del Lerma.

FUENTE: CNA (1997) Diagnóstico de las Regiones I. Comisión Nacional del Agua. Subdirección de Programación. México.
Paz. G. (1999) Panorama de agua en México en El Desarrollo de las Presas en México. Asociación Mexicana de Hidráulica. IMTA. México. P 11.

En las tablas se observa que en las regiones II, III, IV, VI, VII y VIII en donde hay un mayor desarrollo hidroagrícola y las IV, VIII, IX y X donde existe mayor actividad industrial es en donde se tienen las mayores extracciones; mientras que en las regiones XIII, VIII, VI y IV se tienen las extracciones mayores para usos domésticos. Cabe hacer notar como la Cuenca del valle de México tiene un balance negativo tanto de aguas subterráneas como de aguas superficiales lo que esta llevando a que se presente un estrés hídrico.

Historia Hidráulica De La Cuenca Del Valle De México

Fue en el siglo XVII, cuando se iniciaron los trabajos en el Tajo de Nochistongo y en el de Tequisquiác, con lo que se desecarían los lagos. Para abastecer de agua a la nueva ciudad se recurrió a utilizar fuentes alternativas como las de Azcapotzalco y más tarde usaron el agua proveniente de los manantiales de Santa María Nativitas y Xochimilco. Fue en los inicios del siglo XX cuando se comenzaron a extraer grandes volúmenes de agua del subsuelo para satisfacer las demandas de la creciente población, a pesar de estarse presentando los primeros indicios de hundimiento de la ciudad, principalmente en toda la zona construida sobre lo que anteriormente fue lago, trayendo como consecuencia la ruptura continua de las tuberías de desagüe, trayendo como consecuencia que en temporadas de lluvias, persisten las grandes inundaciones. Un recurso para aliviar las inundaciones fue la construcción y operación progresiva de plantas de bombeo que desalojan las aguas del drenaje, por otro lado, los antiguos ríos como el de Churubusco, la Piedad, Becerra, etc. fueron entubados y se convirtieron en colectores además del Gran Canal del Desagüe, construido durante el imperio de Maximiliano e inaugurado en 1900 por el presidente Porfirio Díaz.

Para dar solución al desalojo de aguas residuales de la ciudad, en 1956 se inició el llamado Drenaje Profundo. Fue en este año también, cuando se terminó el segundo túnel de Tequisquiac, que ayudaría al primero a desfogar las aguas residuales, pluviales y fluviales del Valle de México.

En 1953, se dio a conocer un plan general el cual resolvería los problemas del hundimiento, las inundaciones y el abastecimiento de agua potable para la ciudad. En este plan se contemplaba la restricción del crecimiento de la ciudad, prohibía la instalación de nuevas tomas de agua a excepción de las casas que no la tuvieran, siempre y cuando estuvieran ubicadas dentro de la zona permitida para urbanizar, preveía reducir la extracción de agua del subsuelo y la explotación de otras fuentes dentro y fuera del Valle de México. Este plan no fue llevado a cabo del todo y se construyeron las grandes obras de drenaje profundo y el túnel de Tequisquiac. En este año se comenzó con la construcción de algunos pozos de absorción en distintos puntos de la ciudad para recargar los mantos subterráneos, los cuales funcionaron durante un período comprendido entre 1956 y 1975; posteriormente fueron clausurados por la contaminación de las fuentes.

Para continuar abasteciendo de agua a la ciudad, en 1976 empezaron los trabajos del megaproyecto para traer agua desde la cuenca del Cutzamala, para tal efecto, el agua tiene que ser bombeada a 2700m de altura; esto es incomprensible si se repara en que el Valle de México era una cuenca natural. La sobreexplotación del acuífero trajo consecuencias graves problemas que se han ido manifestando como las grandes grietas que presentan las casas y edificios en particular en el oriente de la ciudad; así como en el Valle de Lerma, donde la escasez de agua ha redundado en cosechas magras, además de la degradación de la calidad del agua subterránea. La Ciudad de México requiere preservar su suelo de conservación, evitando que la mancha urbana continúe invadiéndola.

Las necesidades del México moderno han provocado la desecación casi por completo de todos los antiguos lechos del lago. Por otro lado para abastecer de agua a la cada vez mas grande metrópoli, se bombean mayores volúmenes de agua del subsuelo. Se calcula que en el año 2020 la población del Valle de México se elevara hasta alcanzar los 26 millones. En la ciudad de México actualmente se consumen $35 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, lo que en promedio sería 360 litros por persona al día. La Ciudad de México obtiene el agua que requiere para sus actividades de tres fuentes principales: el 71% se extrae de los mantos acuíferos; el 26.5% de las cuencas de los ríos Lerma y Cutzamala y el 2.5% restante de las fuentes superficiales que aún subsisten en la cuenca del Valle de México, como el río Magdalena. De los mantos acuíferos se extraen $45 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que solo $25 \text{ m}^3/\text{s}$ se reponen naturalmente por medio de la infiltración, esto indica que el acuífero esta siendo sobre explotado, ya que se extraen $20 \text{ m}^3/\text{s}$ más que el agua que se recupera. La problemática existente es que ya es insuficiente los volúmenes de agua que se derivan a la ciudad de México del sistema Cutzamala y se esta demandando mayor cantidad, incluso se esta buscando traer agua desde puntos más lejanos; se tienen además sobreexplotados los mantos acuíferos a lo que se le suma que no es posible recargarlos debido a la gran carpeta asfáltica que hay en la urbe, que no permite que el agua pluvial se infiltre evitando o dificultando la recarga de estos.

La precipitación es un elemento importante para que ocurra la infiltración y como esta agua no se infiltra por la carpeta asfáltica se drena hacia el sistema de drenaje combinado; que a su vez presenta otro grave problema ya que su capacidad disminuye al azolverse por exceso de basura o sedimentos provocando severas inundaciones. También hay problemas de hundimientos a causa de la falta de infiltración y la falta de recarga de los acuíferos.

En la ciudad de México se presentan hundimientos de 4 cm./año, De 1948 a 1951; el hundimiento llega a ser de 40 a 45 cm./año; lo que alarma a población y autoridades, que están tomando las medidas pertinentes. El suelo de la ciudad está formado por una capa arcillosa; al extraer el agua del subsuelo, las arcillas y sedimentos orgánicos que forman esta capa, se contraen por la pérdida de humedad provocando una disminución en el volumen del suelo y que su nivel baje.

En algunos sitios se han llegado a registrar hundimientos que varían entre los 3 y los 10 m. En la capa de arcilla se han reportado grietas de hasta 18 m, estas grietas propician que el acuífero se contamine. La falta de estudios geohidrológicos, geofísicos, y geológicos en la realización de nuevas construcciones, ocasiona que la captación de agua pluvial sea menor y no se le de la importancia que amerita, ya que al ocupar lo que antes eran áreas verdes con nuevos desarrollos habitacionales, consorcios comerciales, etc., la infiltración del agua de lluvia al subsuelo se reduce por el incremento de las zonas pavimentadas y su desalojo a través de drenajes, lo que genera problemas de gran magnitud en obras recientes; pues la sobreexplotación del manto acuífero modifica de manera considerable la estructura del subsuelo, porque esto propicia la aparición de nuevas grietas en el subsuelo que pueden provocar cualquier sismo de magnitud que varíe de mediana a mayor (5 grados en la escala de Richter) ocasionen una gran cantidad de daños a los edificios. Se parte de estos problemas para darnos cuenta de la importancia que tiene la infiltración, no solo para el abastecimiento del agua; sino para la preservación del ciclo hidrológico.

La sobreexplotación del acuífero del Valle de México y de otras fuentes de captación de agua potable puede aminorarse si se encuentra la manera de inyectar el agua proveniente de la lluvia al subsuelo y compensar la sobre explotación del acuífero con una adecuada recarga.

La sobreexplotación del acuífero del Valle de México y de otras fuentes de captación de agua potable puede aminorarse si se encuentra la manera de inyectar el agua proveniente de la lluvia al subsuelo y compensar la sobre explotación del acuífero con una adecuada recarga.

Propuesta Para Captar El Agua De Lluvia

Desde años atrás se ha considerado captar el agua de lluvia, pero no ha sido de forma muy relevante. Los informes manejan que desde hace más de tres siglos se han utilizado sistemas para captar el agua de lluvia; en la antigüedad se usaba la recolección de agua de lluvia proveniente de techos y pisos, el agua que se lograba captar en estas áreas era almacenada en cisternas de diferentes tipos, para después utilizarla en algunas actividades.

En el año 300 a.c. existían sistemas de captación llamados: *choltus*, que tenían como función recolectar el agua de lluvia de los patios, esta agua se conducía con canales para llegar después a una especie de depósitos que se construían con piedras y así almacenarla, para su posterior uso.

También en México, en la Península de Yucatán; se utilizaban sistemas de captación de agua; en la época precolombina se fueron depósitos artificiales llamados: *aguadas*, los que se empleaban, el agua que se captaba en éstos depósitos se destinaba principalmente para irrigar cultivos en áreas pequeñas.

En la actualidad se están realizando algunas acciones para poder aprovechar el agua de lluvia; en algunos países del mundo se están llevando a cabo algunos proyectos para captar el agua de lluvia, como ejemplo se puede mencionar que en Europa se ha implementado un sistema de drenaje especialmente para captar el agua de lluvia y poder aprovecharla y hacer un rehusó de este recurso; separando inteligentemente el agua residual del agua de lluvia, sin que sea necesario darle un tratamiento para su rehusó, o por lo menos no sería tan costoso y esa agua se podría destinar para diversos fines. En Japón se han incorporado unas instalaciones de infiltración para la preservación del ciclo hidrológico urbano, lo cual reduce la escorrentía directa del temporal, acelerando las infiltraciones y al mismo tiempo aumentando la recarga freática, que a su vez mejorará el nivel de la corriente en los ríos. En el año del 2005 se plantearon algunos proyectos, en Xochimilco, que se localiza al sur de la ciudad; se están construyendo tres pozos de absorción y 17 estructuras de captación, estos pozos de absorción; además, evitan la saturación del drenaje e impide inundaciones mayores.

Las características de estos pozos de absorción son: su capacidad de almacenamiento de 35 mil litros, evita los encharcamientos en las vialidades, aprovechamiento del agua para que se infiltre en el subsuelo, recargando a los acuíferos, poniéndolos en equilibrio. Los pozos de absorción se construyen haciendo tres perforaciones entre 30 y 50 metros de profundidad. Otro sistema de captación es que en los jardines y áreas verdes se instalen canalillos que puedan captar los volúmenes de agua precipitada para poder usada para el riego de las mismas áreas.

Cuando no se cuenta con grandes extensiones de terreno para almacenar el agua de las precipitaciones y el acuífero se encuentra a cierta profundidad los pozos y sondeos son los sistemas de recarga artificial de acuíferos utilizados con mayor éxito por su practicidad ya que no implican utilizar grandes y complicadas tecnologías para su realización y siempre es posible optar por técnicas constructivas sencillas y de igual eficiencia. Los pozos de infiltración han dado excelentes resultados para recargar acuíferos además de dar una solución viable a los problemas de inundaciones; otra vertiente son los pozos de absorción que se utilizan con magnitudes mucho mayores, y que además cumplen con otra función que es la de evitar la intrusión salina.

En pequeñas aldeas situadas en los valles, el problema toma otra vertiente, para evitar los problemas de inundaciones en estos sitios se disponen de zanjas de infiltración colocadas en las partes más altas de estas poblaciones, las zanjas son de construcción sencilla, solo se excavan a lo largo del sentido transversal a donde corre el caudal originado por la lluvia, este se infiltra al subsuelo evitando así que las aldeas de la partes bajas se inunden. En algunas ciudades se construyen zanjas que tienen distintas dimensiones y son colocadas en avenidas y calles principales donde el problema de inundaciones es mayor.

En la ciudad de México se ha intentado recargar el acuífero del Valle de México mediante la inyección de aguas residuales al subsuelo, para esto se construyeron algunos pozos de absorción en distintos puntos de la Ciudad, pero estos pozos fueron clausurados al comprobar que se podría contaminar el acuífero. Una manera ideal de recargar el acuífero sería con la propia agua de lluvia, pero debido a la constante urbanización esta es ya casi imposible.

El agua de las precipitaciones se puede inyectar al subsuelo mediante pozos de infiltración dispuestos dentro de los lugares donde no se puede dar la recarga del acuífero de manera natural. En el Distrito Federal, los hundimientos han provocado daños al sistema de drenaje y alcantarillado, esto propicia que en temporada de lluvias las calles se inunden y se pierda un gran volumen de agua por la contaminación.

La Ciudad de México necesita captar el mayor volumen de agua de las precipitaciones e inyectarlo al subsuelo para recargar su acuífero; esto se puede lograr implementando un sistema de pozos de infiltración que permitan inyectar el agua de la lluvia antes de que esta genere inundaciones y se pierda ya sea por evaporación o por correr hacia el drenaje y se contamine.

Los pozos de infiltración permiten captar el agua de los escurrimientos provocados por las lluvias en lugares donde las áreas permeables ya no existen, además de que se almacena el agua en el subsuelo; la ventaja de almacenarla así radica en que el costo por recarga del acuífero es cuantiosamente menor que el de vasos de almacenamiento a cielo abierto, funciona como un sistema natural de distribución con lo que se elimina la necesidad de canales y tuberías superficiales.

El objetivo principal de este proyecto es realizar la propuesta de una sustitución de coladeras pluviales por pozos de infiltración, en algunas zonas del Distrito Federal; con esta medida se pretende recargar el acuífero del Valle de México y así aprovechar al máximo las precipitaciones; para lo cual es necesario determinar las zonas donde sería factible una sustitución en base a las características geográficas, hidrológicas y ambientales. Con la realización de este proyecto se pretende alcanzar las siguientes metas para poder llevar a cabo una adecuada recarga del acuífero del Valle de México:

- Infiltrar a tiempo las aguas prístinas.- el agua pluvial de las primeras precipitaciones será captada por los pozos de infiltración.
- Restaurar la sobreexplotación del acuífero del Valle de México.- al compensar la sobreexplotación se asegura la sustentabilidad del agua del acuífero del Valle de México en un mediano y largo plazo.
- Conservar aguas generadas por los escurrimientos y tormentas.- Al infiltrarse el agua pluvial al subsuelo, se controlarían de alguna manera las inundaciones provocadas por la presencia de gastos extraordinarios en diversas zonas de la capital.
- Evitar la contaminación del agua debido al arrastre de materiales como aceites, desechos inorgánicos, etcétera.- el agua pluvial se infiltrará al subsuelo y evitará en la medida de lo posible que escurra por las calles, contaminándose y escurriendo hacia el drenaje.

- Disolución de contaminantes.- los pozos de infiltración estarán conformados por un filtro de gravas y arenas el cual le proporcionará a las aguas pluviales un primer tratamiento de depuración antes de ser inyectado al subsuelo.
- Aprovechar la capacidad de la zona no saturada para remover contaminantes.- al irse infiltrando el agua al subsuelo, esta se depura de las partículas contaminantes que pudiera contener
- Almacenar el agua pluvial en el acuífero.- el agua pluvial captada por los pozos de infiltración queda almacenada en el acuífero del Valle de México y este a su vez funciona como una red de distribución.
- Definir un criterio básico en cuanto a normatividad.- observando los resultados de inyectar el agua pluvial al subsuelo se debe gestionar acerca de la necesidad de implementar estos pozos en cuanto a materia ambiental

La propuesta surge de la necesidad de recargar el acuífero del Valle de México esta idea esta basada en la teoría de la infiltración, la cual se originó desde los tiempos de la antigua Roma, donde los antiguos pensadores romanos observaron que las precipitaciones en forma de nieve y agua eran suficientes para abastecer los manantiales subterráneos.

Hoy en día se tiene a la teoría de la infiltración como la única y firme universalmente aceptada desde el siglo XVI. Esta teoría fue comprobada por medios experimentales por Pierce Pierrault (1608-1680) y Deme Mariotte (1620-1684); ellos midieron la precipitación en la cuenca del río Sena durante un período comprendido entre 1668 a 1670. En sus estudios se percataron de que casi toda la totalidad de la precipitación abastecía los depósitos y fuentes subterráneas.

La infiltración se lleva a cabo por la acción combinada de las fuerzas que actúan es la de atracción molecular. La primera de las fuerzas que actúan es la de atracción molecular, si la humedad del suelo es mínima y una gota de agua de lluvia cae sobre su superficie, las fuerza moleculares contenidas en el suelo atraen a la gota provocando que esta se absorba rápidamente; durante este proceso el peso del agua no es de mucha importancia. Después de esto, en la superficie del suelo adquiere cada vez es mayor la atracción gravitatoria.

Una parte considerable de las precipitaciones que caen sobre tierras continentales, y los sobrantes y excedentes de las aguas superficiales, penetra a través de la capa vegetal, pasando por las partículas de tierra, arena, grava, grietas en formaciones rocosas hasta llegar a una zona de suelo saturado o no, dando origen a corrientes o napas que forman un acuífero. La velocidad con la que el agua se infiltra a través del subsuelo esta regida por los materiales de los cuales esta conformado este; los suelos con una permeabilidad alta, permiten una velocidad mayor, en cambio un suelo arcilloso o una formación rocosa, crea una fricción con lo que el movimiento del agua se hace más lento o incluso llega a frenarse. Podemos decir que la infiltración depende de las características físicas de la roca, que puede estar fracturada o fisurada; esto facilita que se formen canales de comunicación para el agua.

En el subsuelo se distinguen dos zonas por las que el agua se infiltra, la zona de aireación o vadosa y la zona saturada, el manto freático o nivel hidrostático es la superficie que separa ambas zonas. Al irse infiltrando el agua en el subsuelo primeramente pasa por una zona de aireación, la cual puede estar parcialmente saturada.

El agua continúa atravesando el suelo hasta alcanzar el manto freático; el nivel del manto freático varía de acuerdo con la estación del año y los volúmenes de precipitación. Si el manto freático está localizado a una profundidad muy próxima a la superficie se forman áreas pantanosas o encharcadas. La profundidad del manto freático varía de acuerdo a la zona en la que se encuentra; si se trata de una región donde las lluvias sean predominantes, el manto freático se puede localizar a pocos centímetros de la superficie; en cambio, en los desiertos se localizan a gran profundidad. Los acuíferos que se encuentran limitados por las capas de suelo o rocas calizas que debido a sus propiedades no permiten el libre flujo del agua se les conoce como acuíferos confinados o artesianos; para poder continuar su trayectoria a través de ellos, el agua forma grutas con sus respectivas estalactitas y estalagmitas o salen al exterior en forma de manantial o de géiser. Los acuíferos no confinados son conocidos como freáticos y estos a su vez alimentan a los pozos artesianos.

El movimiento del agua subterránea es lento y se realiza de un acuífero a otro y de las áreas superficiales donde el agua penetra al subsuelo conocidas como las zonas de recarga hacia las zonas donde el agua emerge nuevamente a la superficie, llamadas zonas de descarga. El movimiento de agua subterránea varía desde pocos centímetros hasta varios metros al día y está supeditado por el tipo y la forma de los sedimentos que conforman las capas del subsuelo, pero por lo general el agua de los acuíferos se mueve de manera muy lenta. Otro factor que determina el movimiento del agua subterránea es la topografía de la tierra, ya que las capas de la roca permeable tienden a seguir la forma de la superficie a menos de que se encuentre alguna barrera. El agua subterránea siempre se moverá hacia la parte más baja. El agua subterránea es de vital importancia para la sociedad por lo que es necesario protegerla de la contaminación y prever que no se le de un uso excesivo.

La recarga artificial de acuíferos es una técnica hidrogeológica que consiste en infiltrar agua en un acuífero para así conseguir una mejora en la calidad y obtener una mayor disponibilidad de los recursos hídricos almacenando agua en el subsuelo; pudiendo intervenir directa o indirectamente en el ciclo hídrico natural. El objetivo primordial de esta técnica de regulación y almacenamiento de agua es asegurar una gestión racional del potencial hidráulico de cualquier cuenca hidrológica o sistema de explotación. De forma natural los acuíferos deberían recargarse mediante escurrimientos generados por las precipitaciones a través de áreas permeables como bosques, tierras de cultivo, etc. Como estas zonas permeables son cada vez menores, se recurre a la recarga artificial para poder ingresar agua en el subsuelo y mantener los niveles freáticos en la manera en que esto sea económicamente factible.

La recarga artificial de los acuíferos tiene las siguientes aplicaciones:

- Almacenar en el subsuelo los escurrimientos superficiales no regulados
- Reducir el descenso piezométrico

- Apoyar los sistemas de aguas superficiales y subterráneas en la manera en que se requiera
- Mantener el equilibrio hídrico en zonas ecológicas y zonas de conservación
- Reducir los costos de transportación, almacenamiento o bombeo de agua subterránea
- Actuar en la solución y remediación de los hundimientos provocados por la sobreexplotación de algunos acuíferos
- Aminorar problemas de intrusión salina en acuíferos costeros
- Aprovechar las propiedades de filtración del suelo y de la zona no saturada para tratar aguas potables y residuales.
- Disminuir el contenido excesivo de nitratos, cloruros u otros compuestos químicos mediante disolución en las aguas de determinados acuíferos

La recarga artificial se realiza en acuíferos libres y con niveles de agua de profundidad intermedia o no muy alejada de la superficie. Los acuíferos propicios para la recarga son los que están constituidos por materiales granulares como por ejemplo depósitos aluviales y las areniscas; también puede ser de materiales consolidados como las dolomías fracturadas y las calizas. En acuíferos confinados, de materiales granulares relativamente cementados o consolidados con ligera fisuración se presentan colmatación por los sólidos en suspensión que contiene el agua con que se recargan los acuíferos.

Los fenómenos de colmatación que se presentan en la recarga artificial, son un factor determinante que debe ser tomado en cuenta a la hora de diseñar un pozo; la manera en como estos problemas repercuten en la tasa de infiltración es sumamente importante y por lo tanto se debe planear sistemas de limpieza y descolmatación de los sistemas de recarga; en algunos casos se pueden planear tanques donde los sólidos se puedan asentar antes de que el agua pase a los dispositivos de recarga; otra solución es adaptar dispositivos que inyecten chorros de agua a presión en contra flujo de los dispositivos de recarga para lavar los filtros. Cuando es imposible evitar la colmatación, después de cierto caudal filtrado las instalaciones deben ser abandonadas por no poder regenerar la capacidad de infiltración. La degeneración de la capacidad inicial de infiltración indica la necesidad de estimar la vida útil de los sistemas en base a esto realizar los estudios pertinentes de facilidad económica y conocer su rentabilidad.

Las técnicas empleadas para recarga artificial de acuíferos pueden ser complicados sistemas de pozos de absorción de dimensiones desde 2 a 4 metros de diámetro y con profundidades que alcancen hasta los 20 metros con una vida útil hasta de 20 años; aunque un método sencillo de recarga a base de pequeños pozos de infiltración de aguas pluviales resulta óptimo para realizar la recarga, se pueden construir en los sitios más diversos y sus costos son relativamente mas bajos que los pozos más grandes, además de que su mantenimiento es más sencillo. Para que se pueda llevar a cabo la recarga artificial de acuíferos es necesario que el suelo donde se pretende realizar sea permeable, para el diseño del sistema se debe determinar la tasa de infiltración del suelo y constatar que la zona no saturada entre la superficie del terreno y el acuífero no se encuentre

contaminada y que su permeabilidad sea adecuada. El acuífero debe permitir que no ocurra un ascenso excesivo del nivel piezométrico. La calidad del agua puede ser evaluada para impedir la colmatación en el fondo del dispositivo de infiltración. Una condicionante absolutamente necesaria para la recarga artificial de acuíferos cualquiera que sea el sistema empleado es utilizar aguas excedentes, nos se puede disponer de aguas destinadas al riego o al abastecimiento de consumidores por lo tanto las aguas que se emplean para este fin son las siguientes:

- Agua de cursos pluviales o escurrimientos generados por tormentas
- Agua residual domestica previamente tratada para evitar la contaminación
- Agua captada de manantiales o ríos que atraviesan la superficie del acuífero

Para introducir agua en un acuífero los procedimientos son tan variados como múltiples y se clasifican en función de cómo se realice la recarga, esta puede ser infiltración a través de la superficie o bien, por introducción directa del agua al acuífero mediante una perforación que lo atraviese. Los medios a través de la superficie se localizan en el interior de los cauces se utilizan balsas, canales y campos de inundación. Los métodos de introducción directa se conocen con el nombre de sistemas de recarga en profundidad, en general se emplean en suelos formadas por una alternancia de capas permeables e impermeables; los dispositivos empleados en este tipo de recargas consisten en sondeos o pozos profundos a través de los que se inyecta agua en el acuífero. También se utilizan sistemas conformados por pozos someros que capten el agua de alguna fuente y la introduzcan la subsuelo. En suelos calcáreos se puede aprovechar las formaciones como enzimas dolinas para infiltrar el agua directamente.

Conclusiones

El acuífero del valle de México sufre una severa sobreexplotación debida a que no se recarga en su totalidad de manera natural con el agua de lluvia; estas deberían infiltrarse a través de zonas permeables pero en la CD. De México cada vez estas son menores, a demás la zona urbana de la ciudad, el agua de la lluvia es interceptada por el drenaje, pese a esto la ciudad se enfrenta a graves inundaciones de temporadas de lluvias. Una consecuencia palpable de la sobreexplotación del acuífero es el hundimiento de la ciudad y la aparición de grietas en la estructura del subsuelo.

El acuífero se puede recargar de manera artificial mediante un sistema de pozos de infiltración. Estos son de dimensiones relativamente pequeños, si se pueden construir en unidades habitacionales, fraccionamientos, centros comerciales, fábricas, calles, obras públicas, parques, clubes deportivos y consorcios turísticos entre otros. La idea principal de sustituir poco a poco las coladeras pluviales por los pozos, para que en lugar de la lluvia pluvial se pierda en el drenaje esta recargue el acuífero del valle de México y se compense la sobreexplotación, por otro lado el agua se inyecte, al pasar por el filtro del pozo se recupera de los contaminantes adquiridos en la atmósfera y al haber caído a la superficie de la ciudad. Esta solución resultaría económicamente factible ya que no se requieren costosas y complicadas técnicas para su construcción por tratarse de pozos pequeños, el problema de colmatación puede resolverse utilizando tapas de concreto con un aditivo especial que permita el paso del agua mas no el de las partículas sólidas. Además cuando su capacidad de filtración se merme, se puede cambiar el filtro sin necesidad de clausurar el pozo. Las inundaciones se disminuirían en la medida en que se

implementen los pozos, estos no presentan problemas por cambios en la pendiente del terreno como ha sucedido en el drenaje. El agua que se inyecta al subsuelo tendrá una mejor calidad por tratarse de agua de lluvia la cual se incrementara al irse filtrando cada vez más en el subsuelo. Con esto se puede solucionar de manera sencilla un problema generado por muchos años a causa de la mala planificación de la ciudad.

El agua de lluvia puede ser usada para la recarga de los acuíferos, usarla en el sector agrícola y consumo de hombre; el agua de lluvia tiene la ventaja de no tener tantos contaminantes, y si así fuese, antes de utilizarla se puede tratar y desinfectar, considerando las diferentes actividades para las cuales va a ser utilizada.

En la actualidad no se tiene conciencia de que si se aprovecharan los volúmenes de agua, se podrían utilizar para las diferentes actividades y consumos; principalmente en zonas con escasez de agua o en zonas áridas, que aunque es muy poca la precipitación esta agua pluvial serviría en el abasto de agua que en muchos lugares se carece de este servicio básico. Y los diferentes sistemas de captación se deben aplicar y mejorar para administrar y eficientar recurso.

Observaciones

Parte de la problemática que se esta suscitando debido a la disminución de la disponibilidad del agua se debe a que se ha tenido una política errónea de parte del gobierno para preservar este recurso; la mala gestión y el despilfarro que se ha hecho de este recurso, son un mal que ha comprometido el porvenir de las reservas hídricas.

Las necesidades de agua han aumentado progresivamente sin control alguno, los volúmenes de agua consumidos por lo países industrializados son enormes; la población mundial demanda satisfacción de sus necesidades primarias como lo es el uso de agua potable y la alimentación, por lo que el aprovechamiento de este recurso para fines agrícolas y usos domésticos demanda día a día, disponer de mayores volúmenes de agua.

Se debe pues pugnar porque se apliquen medidas correctivas en todos los sectores ya que de otra forma se cumplirán las amenazas que ubican a México como un país con déficit en la disponibilidad de agua; y que se le de un uso racional a este recurso habilitando programas que inicien la cultura de un uso eficiente de este recurso, de otra manera cualquier proyecto tenderá al fracaso.

Puntos importantes para abatir la disminución de la disponibilidad de agua que se tiene son los de llevar a cabo extensivos programas de conservación, rehabilitación, mantenimiento y modernización a la infraestructura hidráulica existente; crear nueva tecnología que permita eficientar el uso del agua, hacer una recuperación del agua de lluvia.; apoyando todo lo anterior en un programa educativo exhaustivo que sensibilice a la población sobre la obligación que recae en cada uno de nosotros y que es la de cuidar el agua.

Bibliografía

Castelán, Enrique (2000), *Análisis y Perspectiva del Recurso Hidráulico en México*
CIMMA IPN

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, PNH 2001-2006

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, (2005), *Estadísticas del Agua en México*

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, (2005), *Compendio Básico del Agua en México*

Jacobo, M. Antonio (2004) "La gestión del Agua en México" UAM Ixtapalapa

Legorreta, Jorge (2006), "El Agua y la Ciudad de México", UAM Azcapotzalco

Sánchez, Feliciano; (1998), *Investigación Hoy*, Instituto Politécnico Nacional