

Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: **la cuenca del Valle de México**

Eugenio Gómez-Reyes



Glass of water balancing on middle of seesaw. Gty.imf

Se presenta una metodología para obtener las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas superficiales, donde la elección y aplicación de los algoritmos para determinar los volúmenes de agua que no cuentan con aforos dependen del tipo de información estadística y geográfica disponible. Muchos de los datos requeridos para este propósito se encuentran recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el resto está diseminado en diferentes formatos de las instancias operadoras y de gestión de los recursos hídricos. La base conceptual del balance hídrico es el principio de conservación de masa que involucra los volúmenes de agua, por unidad de tiempo, que ingresan y egresan de la cuenca, así como de la diferencia entre los volúmenes internos consumidos y los reintegrados. Esta metodología se aplicó en la cuenca del Valle de México y los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *i. e.*, el balance hídrico promedio anual calculado aquí se diferencia en 12% máximo respecto al reportado por la CONAGUA.

Palabras clave: manejo del agua, Valle de México, balance hídrico.

Recibido: 3 de diciembre de 2012

Aceptado: 29 de julio de 2013

1. Introducción

El abastecimiento, la calidad y el desalojo del agua en los centros urbanos de los países en desarrollo constituyen grandes retos por resolver. A lo largo de la historia, la escasez del vital líquido y las inundaciones han causado pérdidas en la sociedad mermando la calidad de vida de los ciudadanos. Los daños se han reducido cada vez más mediante la construcción de obras hidráulicas para el almacenamiento y control de las avenidas y, sobre todo, aplicando esquemas eficientes para el manejo del recurso hídrico.

Durante el siglo XX, el manejo del agua en la República Mexicana registró una clara evolución (CONAGUA, 2011). La política hídrica en el país inició con el enfoque de incrementar la oferta de agua para los diversos usos mediante la construc-

A methodology is presented for water balance components in surface watersheds, where the choice and application of algorithms to calculate volumes of water that have no hydrometric monitoring, depend upon the type of statistical and geographical information available. Much of the information required for this purpose is collected by the National Institute of Statistics and Geography (INEGI, for its acronym in Spanish), the rest is scattered in different formats of the operator and management offices of water resources. The conceptual basis of the water balance is the principle of conservation of mass involving ingress and egress flows through the basin, and those withdrawal and overturned water volumes resulted from internal processes in human-impacted basins. This method was applied in the Valley of Mexico basin and results were similar to those reported by the National Water Commission of Mexico (CONAGUA, for its acronym in Spanish), *i. e.*, the average annual water balance calculated here was 12% maximum accurate to CONAGUA's estimate.

Key words: water management, The Basin of Mexico, water balance.

ción de infraestructura (presas, acueductos, pozos, potabilizadoras, redes de abastecimiento y alcantarillado). En la década de los 80, esta política fue progresivamente sustituida por otra cuyos esfuerzos se enfocaron al control de la demanda con la institucionalidad del manejo del recurso hídrico, *v. gr.*, se promulgó la *Ley de Aguas Nacionales*, se fundó la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y se creó el Registro Público de Derechos de Aguas (REPD), entre otros. Aunque en gran medida estas políticas proporcionaron una respuesta a los requerimientos hídricos de México, lamentablemente también heredaron problemas graves, como una creciente sobreexplotación de acuíferos, contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, pobre calidad en los servicios de agua potable y gran vulnerabilidad a las inundaciones en diversas poblaciones del país. Ante esta realidad, la política hídrica mexicana está adoptando la sustentabilidad como su enfoque central, donde se favorece

la inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales, la sustitución de fuentes convencionales de suministro y la modernización tecnológica de los sistemas de riego agrícola, así como el desarrollo de normas sobre el caudal ecológico y los estudios sobre el impacto y la adaptación al cambio climático.

En este contexto, los gestores del agua (gobiernos: federal, estatales y municipales) están desarrollando y tienen planeadas varias estrategias para satisfacer la demanda del vital líquido y mejorar la calidad del agua potable, así como dar tratamiento, reuso y destino final a las aguas residuales y pluviales. Cada una de las estrategias tiene su propia relevancia y su costo asociado para abatir la problemática del recurso hídrico en México. La decisión en la aplicación de la táctica más adecuada para su manejo resulta relevante, ya que implica una gran inversión de esfuerzos institucionales y de recursos económicos que se manifiestan en la mejora o repercusión de la calidad de vida y del medioambiente. Por ello, se hace importante contar con instrumentos de cálculo y análisis que permitan evaluar las diversas estrategias para el manejo del recurso en las ciudades. El balance hídrico constituye una herramienta básica para estimar la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas y sus componentes permiten evaluar los elementos relevantes que rigen el sistema hidráulico de la cuenca. El análisis del balance hidráulico explica el comportamiento de las magnitudes fundamentales de la cuenca, como: disponibilidad natural del agua, explotación de acuíferos, déficit de transvase y fugas en las redes de distribución, entre otras variables.

El cálculo del balance hídrico consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de la cuenca, así como aquéllos de consumo y retorno que ocurren en su interior, para obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el que se cuantifican los flujos. Este cálculo incorpora una considerable cantidad de información estadística y geográfica de la cuenca en estudio, *v. gr.*, elevación de la superficie; alturas de precipitación; tempera-

tura; tasas de evaporación; tipo, uso y cobertura vegetal del suelo; traza urbana; densidad de población; abastecimiento de agua potable; caudales para los diversos usos del agua; uso consuntivo; tratamiento y reuso; así como la eficiencia en los sistemas de distribución y tratamiento. Además, algunas de las componentes del balance hídrico no se miden, sino que se estiman, *v. gr.*, las asociadas a los procesos hidrológicos (lluvia, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración), aumentado así el nivel de incertidumbre en el cálculo de la disponibilidad del agua, ya que existen varios algoritmos para la estimación de estos volúmenes de agua. En este sentido, es imprescindible contar con metodologías que estandaricen la obtención de las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas, pues la elección y aplicación de los algoritmos para determinar los volúmenes de agua están sujetas al tipo de datos disponible.

El caso de la cuenca del Valle de México, donde se circunscribe uno de los centros urbanos más poblados del planeta, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), presenta una amenaza latente de inundación, la existencia de un déficit absoluto del recurso, la sobreexplotación de su acuífero, el escaso tratamiento de las aguas residuales y los diversos obstáculos de tipo financiero y de disponibilidad natural del recurso que enfrenta el aumento de la importación de agua de otras cuencas (Montero-Contreras *et al.*, 2009; Perló-Cohen y González-Reynoso, 2009; Gómez-Reyes, 2009; Romero-Lankao y Günther, 2011). En esta cuenca, sin duda, el balance hídrico constituye un instrumento muy valioso para el mejor manejo del vital líquido.

Aquí se presenta una metodología para determinar los valores de las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas no aforadas que dependen del tipo de información estadística y geográfica disponible, la cual se aplica al caso de la cuenca del Valle de México. En el apartado 2 se describe el trabajo de recopilación de datos; luego, en el 3, se procede con la evaluación de las compo-

nentes del manejo del agua en la cuenca del Valle de México. Para finalizar, en el 4 se determina la incertidumbre involucrada en la información y se describen los cálculos aplicados.

2. Información estadística y geográfica

Para generar la base de datos que permitirá el cálculo del balance hídrico es necesario, primero, recopilar la información disponible en la cuenca de interés; luego, se deberá procesar y georreferenciar para contar con datos confiables y de utilidad. Mucha de la información requerida para la obtención de las componentes del balance hídrico se encuentra en archivos digitales y conjuntos de datos vectoriales del INEGI,¹ el resto de la información está diseminada en diferentes formatos de las instancias operadoras y de gestión de los recursos hídricos; las hay en archivos digitales e impresos, datos vectoriales y cartas impresas, publicaciones en revistas especializadas y en informes técnicos, tablas capturadas o manuscritas.

Asimismo, se cuenta con bases de datos internacionales, disponibles vía Internet, para algunos de los parámetros que permiten calcular las componentes del balance hídrico, por ejemplo, el GTOPO30,² cuya información es de carácter global y su resolución espacial es de, aproximadamente, 1 km (30 segundos de arco), o como la Base de Datos Hidrogeológica de la cuenca de México (BMHDB, por sus siglas en inglés) que se estructura con información oficial de las mismas fuentes consultadas aquí para la cuenca del Valle de México (Carrera-Hernández y Gaskin, 2008). A continuación, se especifica el tipo y características de la información requerida para evaluar las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas superficiales, así como la fuente de adquisición de los datos correspondientes.

1 <http://www.inegi.org.mx/>; última consulta en febrero del 2013.

2 <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>; última consulta en mayo del 2013.

2.1 Cartas topográficas digitales escala 1:50 000

La información básica, como: localización geográfica (latitud y longitud) de la cuenca en estudio, curvas de nivel, corrientes superficiales naturales (perennes e intermitentes), manantiales, límites municipales, vías terrestres, poblaciones, etc., se obtienen del conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50 000.³ Con esto se elabora un plano base, el cual se utiliza para obtener el relieve y los principales rasgos fisiográficos de toda la cuenca. Adicionalmente, los *parteaguas* de las cuencas y subcuencas tributarias se pueden conseguir a partir del conjunto de datos vectoriales de las cartas hidrológicas de aguas superficiales escala 1:250 000.⁴ Otra opción para obtener información topográfica, vía Internet, es la base de datos Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)⁵ escala 1:1 000 000, que provee más detalles topográficos que su antecesora GTOPO30, ya que la resolución espacial es de 15 segundos de arco y, en algunos casos, hasta de 7.5 (aproximadamente de 400 a 200 m).

2.2 Cartas edafológicas y uso del suelo digitales escala 1:250 000

La información tanto del tipo de suelo (*v. gr.*, suelo hidrológico: permeables, medianamente permeables y casi impermeables) como de la cobertura vegetal y el uso de suelo (*v. gr.*, bosques, zonas agrícolas) se obtiene del conjunto de datos vectoriales de las cartas edafológicas y uso del suelo y de vegetación, respectivamente, escalas 1:250 000.⁶ Esta información se utiliza para el cálculo del escurrimiento medio anual a través de métodos indirectos en cuencas sin aforo; también, se emplea para calcular la evapotranspiración.

3 Disponible en el sitio del INEGI en Internet (www.inegi.org.mx).

4 Disponible en el sitio del INEGI en Internet.

5 <https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>; última consulta en mayo del 2013.

6 Editadas por el INEGI y disponibles en su sitio en Internet.

2.3 Información climatológica

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha calculado las normales climatológicas,⁷ *i. e.*, 30 años (1971 al 2000). De esta base es posible extraer datos medios y extremos mensuales de precipitación, temperatura y evaporación de 3 758 estaciones climatológicas en todo el país. Éstos permiten calcular los volúmenes de agua de intercambio atmósfera-cuenca (*i. e.*, precipitación pluvial y evapotranspiración) y se obtiene del SMN mediante solicitud. Existe, también, información de estaciones meteorológicas internacionales de donde se pueden conseguir datos de temperatura diaria; sin embargo, son muy pocas las estaciones de este tipo en México, lo cual no permite realizar análisis espacial a nivel de cuenca hidrológica.

2.4 Información hidrométrica

Consiste de gastos medios diarios registrados en estaciones hidrométricas ubicadas en las cuencas del país. Ésta se obtiene del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA),⁸ el cual contiene datos de presas y de gastos medios diarios de mediciones en 2 070 estaciones hidrométricas de 1921 (inicio de mediciones) a diciembre del 2006. La información hidrométrica permite calcular los volúmenes de escurrimiento aguas arriba de un punto de control, *i. e.*, aguas arriba de la estación de aforo.

2.5 Coeficiente de escurrimiento

Es la relación entre el escurrimiento superficial y la precipitación, expresados en altura de agua (WMO/UNESCO, 1992). La distribución espacial de los coeficientes de escurrimiento se obtienen a partir del conjunto de datos vectoriales de las cartas hidrológicas de aguas superficiales 1:250 000. Los valores de los coeficientes de escurrimiento (C)

son el porcentaje del agua superficial que drena. De acuerdo con su variación espacial en las cuencas, los valores de C se agrupan en rangos que representan las condiciones del escurrimiento: [0 a 5%], [5 a 10%], [10 a 20%], [20 a 30%] y [30 a 100%]. Esta información permite evaluar los volúmenes de escurrimiento en la cuenca en estudio que no cuentan con estaciones de aforo.

2.6 Información de los principales cuerpos de agua superficiales

Se requieren datos de curvas de cota vs. área y cota vs. volumen, así como del funcionamiento diario de los principales cuerpos de agua, como: lagos, lagunas, vasos de regulación y presas. Éstos se encuentran disponibles en las instancias de operación del agua y son útiles para conocer las capacidades y volúmenes de almacenamiento en los cuerpos de agua superficiales. Las bases de datos internacionales con información hidrológica —como el HYDRO1k,⁹ que incluye, además de topografía, cuerpos de agua y *parteaguas* de cuencas— se derivan de la topografía provista del GTOPO30, por lo que su resolución espacial (1 km) es útil para realizar balances hídricos a nivel de países y continentes.

2.7 Información de acuíferos existentes en la zona de estudio

La mínima que se requiere comprende límites oficiales (georreferenciados), área del acuífero, evolución de los niveles piezométricos, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento del acuífero. De no contar con ella, se requiere tener datos geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, el censo de fuentes de abastecimiento subterránea, los volúmenes de extracción de bombeo y los de recarga de pozos de absorción, la carga hidráulica y los cortes litológicos de los pozos de extracción. La disponibilidad de esta información puede proceder de diversas fuentes, desde cartas hidrológicas de aguas subterráneas escala 1:1 000 000

7 <http://smn.cna.gob.mx/>; última consulta en febrero del 2013.

8 Disponible en <http://atoyatl.imta.mx/webpatzcuaro/bandas/>; última consulta en febrero del 2013.

9 <https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K/>; última consulta en mayo del 2013.

del INEGI, hasta informes de consumo de energía eléctrica por bombeo en pozos de colonias.

En el caso de la cuenca del Valle de México existe la base de datos hidrogeológicos BMHDB, la cual cuenta con información espacial y local del sistema acuífero y está disponible mediante solicitud a sus autores (Carrera-Hernández y Gaskin, 2008). La información espacial de la BMHDB (*v. gr.*, unidades de suelo, geología, topografía) está almacenada en mapas. Por otra parte, los datos locales se encuentran contenidos en tablas, como: los niveles piezométricos de los pozos medidos por la CONAGUA y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), volúmenes de extracción de bombeo inscritos en el REPDA, cortes litológicos de los pozos de extracción, así como pruebas de bombeo y parámetros de calidad del agua. También, contiene registros climatológicos (precipitación, temperatura y evaporación) y de escurrimiento. Esta información es utilizada para determinar las características de los flujos de los sistemas de agua subterránea, incluyendo la recarga y la explotación del acuífero.

2.8 Volumen anual de extracción de agua, superficial y subterránea

Una componente fundamental del manejo de agua es su volumen anual de extracción de los aprovechamientos superficiales y subterráneos. La información que corresponde al subsuelo incluye las descargas naturales comprometidas del acuífero a través de los manantiales y los caudales de los pozos de extracción en la cuenca de estudio, mientras que la de aguas superficiales incluye los caudales de cauces o ríos, manantiales y lagos. De forma adicional, se requiere anexar información del número de registro del volumen de extracción para identificar cada una de las concesiones de agua, las coordenadas geográficas para la localización espacial de cada uno de los aprovechamientos, el nombre de la cuenca a la que pertenece cada aprovechamiento, la fuente superficial o subterránea de la que provienen los volúmenes de extracción y el destino del agua concesionada por usos tipificados (*v. gr.*, público, agrícola o industrial).

Los volúmenes de aguas nacionales concesionados a los usuarios se inscriben en el REPDA,¹⁰ recopilado por la CONAGUA, el cual contiene el volumen anual de extracción de agua, tanto de aprovechamientos superficiales como subterráneos, agrupados en 12 temas de usos consuntivos: público urbano, agrícola, agroindustrial, doméstico, acuicultura, servicios, industrial, pecuario, múltiples, generación de energía eléctrica, comercio y otros usos. También, incluye información del número de registro, identificación, nombre y domicilio del titular de la concesión; las coordenadas geográficas (latitud y longitud); la región hidrológica; la cuenca y subcuenca tributaria; el acuífero, la entidad federativa y el municipio al que pertenece el aprovechamiento; así como las características de la obra de extracción (profundidad, diámetro, medidor y su fecha de verificación, tipo de bomba y motor).

2.9 Volúmenes de importación y exportación

Son volúmenes de caudales provenientes o inducidos de las diferentes fuentes o destinos del agua. La información de éstos se obtiene del BANDAS o, en su caso, de las instancias de operación de los sistemas de acueductos y/o de los de drenaje, con la cual es posible calcular los volúmenes de transvase que se conducen hacia el interior o exterior de la cuenca en estudio.

2.10 Cobertura urbana

Como punto de partida, en la zona urbana se utiliza la traza de la división política de los municipios y delegaciones que forman la cuenca en estudio. Esta información se extrae del conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50 000 del INEGI. Por otro lado, también es necesario obtener los datos de población y su tasa de crecimiento a nivel municipal; para ello, se usa la información

¹⁰ Disponible en <http://sigaims.conagua.gob.mx/Website/Localizador/viewer.htm>; última consulta en febrero del 2013.

proveniente del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de área geoestadística básica (AGEB).¹¹ Con ella se calcula y proyecta el volumen de demanda doméstica en la cuenca.

2.11 Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR)

Se requiere información sobre las PTAR municipales e industriales que operan en los municipios que forman la cuenca en estudio. La mínima requerida comprende ubicación (georreferenciada), capacidad instalada y de operación de la planta, informe diario de los volúmenes de tratamiento de agua residual cruda y volúmenes generados de agua residual tratada, zona cubierta por los colectores del drenaje que abastecen la planta, así como volúmenes de destino del agua tratada. Estos datos están disponibles, por lo general, en las instancias de

operación de las PTAR de los municipios. En el caso del Distrito Federal, se cuenta con la base de datos del Inventario de Descargas de Aguas Residuales (IDAR), que contabiliza en forma directa y detallada las descargas de contaminantes vertidas al drenaje por aguas residuales de origen industrial, comercial y de servicios. Esta información se utiliza para contabilizar los volúmenes de tratamiento de aguas residuales y los volúmenes de reuso de agua tratada. El IDAR se obtiene del SACM mediante solicitud.

3. Evaluaciones de las componentes del balance hídrico

La base conceptual para realizar un balance hídrico en cuencas hidrográficas superficiales es el principio de conservación de masa; éste involucra los volúmenes de agua por unidad de tiempo, que ingresan y egresan de la cuenca, así como la diferencia entre los volúmenes internos consumidos y los reintegrados (ver cuadro 1). La suma

¹¹ Disponible en el sitio del INEGI en Internet.

Cuadro 1

Componentes del balance hídrico en la cuenca del Valle de México

Ingresos		Egresos	
Q_{lluvia}	Precipitación	Q_{ET}	Evapotranspiración
$Q_{manantial}$	Manantiales	$Q_{infiltra}$	Infiltración
Q_{pozo}	Pozos	$Q_{desalojo}$	Desalojo
$Q_{externo}$	Lerma-Cutzamala	Consumos	
Reingresos		Q_{uso}	Uso consuntivo
$Q_{retorno}$	Agua residual (AR)	Q_{fugas}	Pérdidas
$Q_{tratada}$	AR tratada	Q_{PTAR}	AR usada por las PTAR
$Q_{superficial}$	Aprovechamiento superficial	Q_{reuso}	Reuso del AR tratada
		$Q_{cuerpos}$	Llenado de cuerpos de agua

de estas componentes resulta en la variación del volumen de agua respecto al tiempo que presenta la cuenca, *i. e.*, el almacenamiento de agua ($Q_{almacen}$). La metodología para obtener estas componentes del balance hídrico y su aplicación en la cuenca del Valle de México se describen en los apartados subsiguientes.

Cabe señalar que toda la información tabular y/o digital obtenida de las diversas fuentes de datos se verificó por control de su calidad, aplicando técnicas de *chequeo* por contradicción, como lo describe Gandin (1988). Al mismo tiempo, se cotejó toda la información por posibles errores, como la variación de datos por cambio de las fuentes (revisado en cada base de datos) y numéricos por computadora (corregido y verificado mediante la impresión del mapa), así como por los posibles defectos del análisis topológico (algoritmos asociados a aplicaciones) y de clasificación y generalización (métodos de clasificación e interpolación desde punto a áreas), errores de precisión de contenido (atributos adheridos a los puntos, líneas y áreas) y por errores de precisión posicional para el caso de los datos no digitales; todos ellos se corrigieron antes de iniciarse el cálculo de las componentes del balance hídrico. De esta manera, se contó con datos confiables para obtener los resultados de los volúmenes de agua.

3.1 Delimitación de cuencas

En la evaluación de las componentes de balance hídrico, la información espacial es de suma importancia, pues los valores de los parámetros hidrológicos son, por lo general, estimados como promedios ponderados de áreas delimitadas según las características fisiográficas de la cuenca. Los datos fisiográficos de la cuenca, principalmente la demarcación del *parteaguas*, se vuelven entonces un factor relevante en la estimación del balance hídrico. Por tradición, los *parteaguas* son trazados a partir de planos de curvas de nivel; sin embargo, en las últimas décadas, la delimitación de las cuencas está siendo

obtenida a partir de modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) (Jenson and Domingue, 1988; Mark, 1984; Band, 1986; Martz and Garbrecht, 1992). La demarcación del *parteaguas* de las cuencas a partir de un DEM es más rápida, menos subjetiva y más precisa que las técnicas manuales normalmente aplicadas a mapas topográficos.

Las técnicas de delimitación de cuencas con el DEM consisten en determinar, de forma automática, la dirección de flujo de los escurrimientos, identificar la acumulación del flujo y delinear el *parteaguas* de cada cuenca asociada a los cauces (Band, 1986). Para ello, se empieza por generar la matriz de direcciones de flujo usando la información contenida en el DEM, como lo describen Jenson and Domingue (1988). El DEM se creó con celdas de 30 x 30 metros de resolución, mediante un algoritmo de interpolación cúbica biarmónica (Sandwell, 1987) que utiliza los datos de elevación del terreno contenidos en las cartas topográficas digitales. Luego, se procesaron las elevaciones del DEM para eliminar las depresiones topográficas de pequeña escala (menores que el tamaño de la celda de resolución del DEM) que están rodeadas por celdas con elevaciones más altas, para lo cual se aplicó el algoritmo de Marks *et al.* (1984). Por último, se procedió a la obtención de la matriz de dirección de flujo, que determina la dirección a la cual el agua fluye fuera de la celda, como lo describen O'Callaghan and Mark (1984).

Con la información de la matriz de flujo se determinó, en cada celda, el número de celdas que alimentan el flujo hacia la celda en cuestión, *i. e.*, la matriz de acumulación de flujo. Ahora bien, aquellas cuyo número de acumulación de flujo es cero (*i. e.*, las que no reciben aportaciones de flujo de otras) son porción del *parteaguas*, de manera que la línea que une las celdas con cero acumulación de flujo corresponde al trazo del *parteaguas* de la cuenca. En el caso de la delimitación de las cuencas tributarias, el procedimiento para trazar

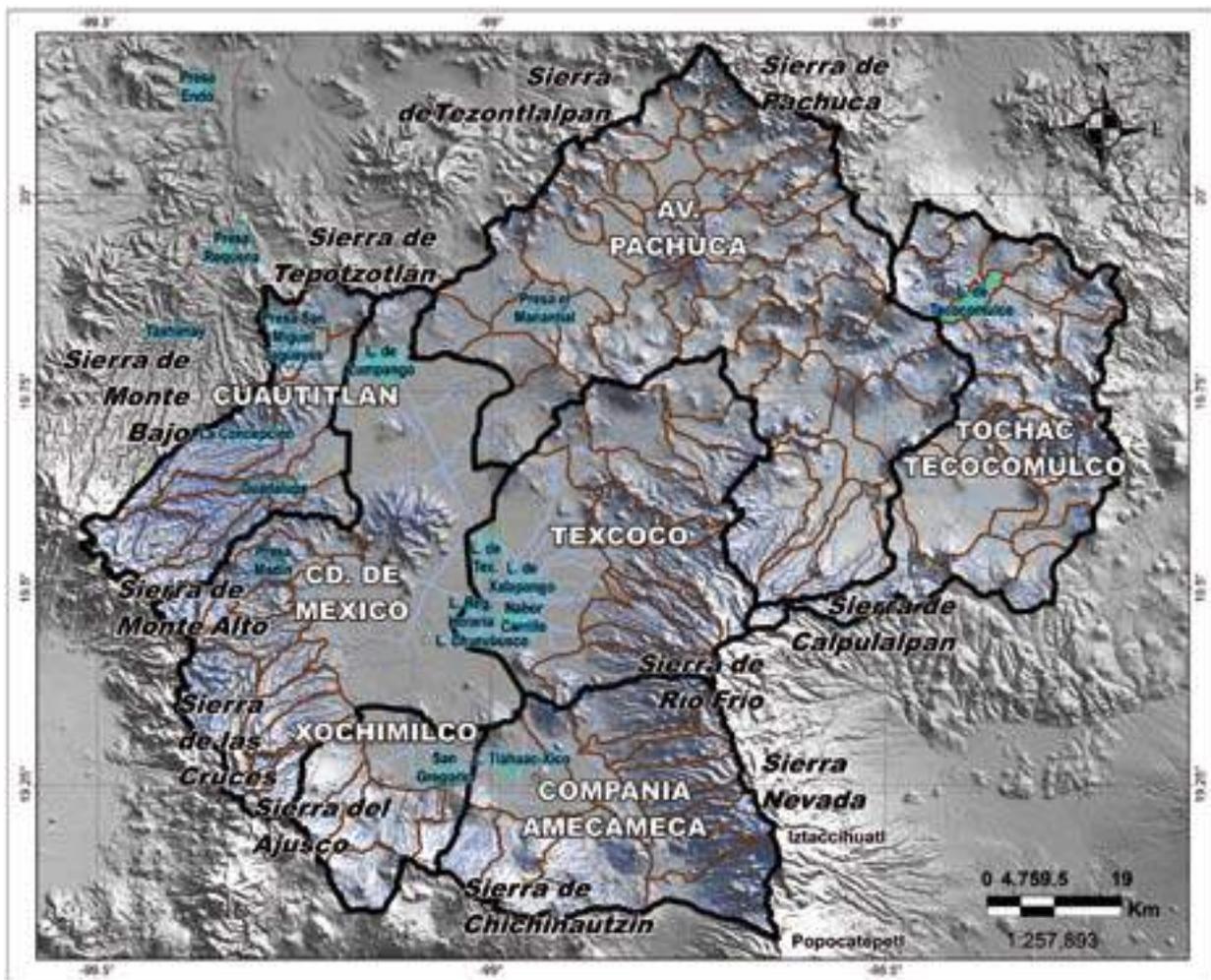
el *parteaguas* correspondiente es el mismo que para la cuenca. La figura 1 muestra la delimitación de los de la cuenca y subcuencas tributarias del Valle de México, obtenidos con esta metodología de los DEM.

3.2 Cálculo de los volúmenes de precipitación

La estimación de Q_{lluvia} que capta la cuenca generalmente se realiza como un promedio espacial ponderado con las áreas de los polígonos de

Thiessen o con ponderación de las áreas de las isoyetas (Aparicio-Mijares, 2007); para calcular estas últimas, se utilizan los algoritmos de interpolación, como los *splines* (Sandwell, 1987) o los *Kriging* (Chiles y Delfiner, 1999). En el proceso de interpolación se genera información de la altura de precipitación (*hpc*) en el centro de cada sector espacial de área de resolución (*Areac*) que se designa para el cálculo de los volúmenes de agua en la cuenca, *v. gr.*, 100 ha equivale, aproximadamente, a 0.010° latitud x 0.010° longitud, de manera que el producto $hpc * Areac$ determina el volumen de precipitación en cada sector espacial de resolución, del mismo

Figura 1
Delimitación y morfología de la cuenca del Valle de México, indicando los cuerpos de agua superficiales; el nombre de las subcuencas tributarias están escritas en color blanco



modo que la suma de este producto de todos los sectores que forman la cuenca define el volumen de precipitación pluvial en la cuenca, i.e.:

$$Q_{lluvia} = \sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Area_c_i \quad (1)$$

donde N es el número total de sectores i de la cuenca.

Obsérvese que al dividir la ecuación 1 entre el área total de la cuenca (A_{cuenca}) se obtiene el valor promedio de la precipitación pluvial de la cuenca (\overline{hp}) ponderado por área:

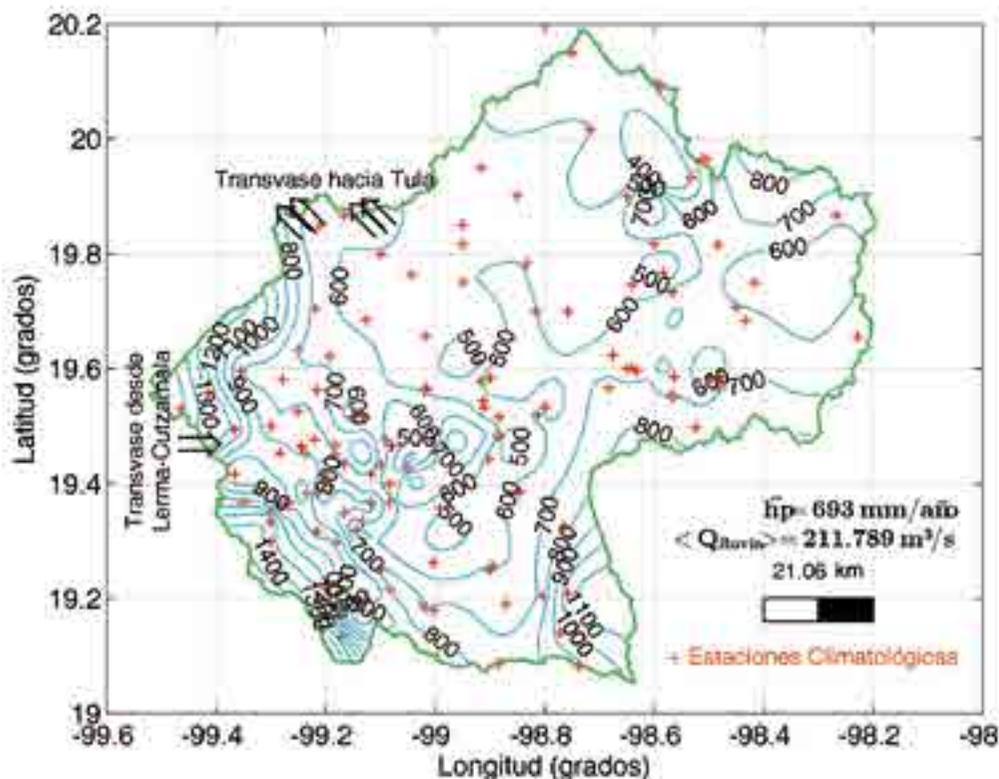
$$\overline{hp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Area_c_i}{A_{cuenca}} \quad (2)$$

Del mismo modo, se pueden obtener volúmenes de precipitación pluvial y láminas promedio de precipitación en cada delimitación de la cuenca y subcuencas tributarias de distintos tamaños e, incluso, para fines de administración del recurso hídrico en las entidades federativas y en los municipios.

En el caso de la cuenca del Valle de México se calculó Q_{lluvia} con base en las isoyetas generadas con el algoritmo de interpolación cúbica biarmónica (Sandwell, 1987), que utiliza datos de precipitación pluvial media anual registrados en las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca. El valor del volumen obtenido representa entonces un volumen de precipitación promedio anual de la cuenca ($\langle Q_{lluvia} \rangle$) expresado en términos de láminas (mm/año) (ver figura 2).

Figura 2

Isoyetas medias anuales (mm/año) de la cuenca del Valle de México; se indica la localización de la entrada y salidas de los transvases



3.3 Cálculo de los volúmenes de evapotranspiración

Numerosos algoritmos para determinar QET son utilizados, v. gr., Tanque Evaporímetro, Thornthwaite, Jensen-Heise, Blaney-Cridle, Turc, Penman (González-Sosa et al., 2010). Cada algoritmo calcula cierto tipo de evapotranspiración; están los que obtienen la potencial (ETP, es decir, la que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas), los que estiman la real (ETR, la que se produce bajo condiciones reales de humedad del suelo y de cobertura vegetal) y los que evalúan la de referencia (ET_o, el poder evaporante de la atmósfera).

La definición de los tipos de evapotranspiración es importante, en particular para los ingenieros agrónomos; para la Ingeniería Hidrológica, al evaluarla dentro de un balance general de cuenca se pueden igualar algunas definiciones, como: $ETP = ET_o$ (Sánchez-San Román, 2006); asimismo, lo que interesa es contabilizar la ETR; en este caso, es posible aplicar el algoritmo de Turc, que relaciona la precipitación (hp en mm/año) y la temperatura media anual del aire (T en °C) de cada estación climatológica para obtener la ETR en mm/año (Remenieras, 1971):

$$ETR = \frac{hp}{\sqrt{0.9 + \frac{hp}{L}}} \quad (3)$$

donde $L = 300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$.

Ahora bien, con la aplicación de la ecuación 3 en cada estación climatológica de la cuenca en estudio, se procede a evaluar Q_{ET} de manera análoga al método de las isoyetas para el cálculo Q_{lluvia} (apartado 3.2), i. e., interpolación de los valores de ET en el centro de cada sector espacial de resolución de la cuenca (ET_c), producto $ET_c \cdot Area_c$ en cada uno de estos sectores y suma de estos productos de todos los sectores que forman la cuenca. Asimismo, al dividir Q_{ET} entre el área total de la cuenca se ob-

tiene el valor promedio de la evapotranspiración de la cuenca (\overline{ET}) ponderado por área.

En el caso de la cuenca del Valle de México, el volumen de evapotranspiración promedio anual de la cuenca ($\langle Q_{ET} \rangle$), expresado en términos de láminas (mm/año) y estimado con el algoritmo de Turc, se presenta en la figura 3.

3.4 Cálculo de los volúmenes de escurrimiento

Los volúmenes de escurrimiento ($Q_{escurrimiento}$) caracterizan al potencial de los recursos hídricos superficiales de una cuenca. Para estimarlos cuando no se cuenta con aforos, se pueden aplicar algoritmos como el Método Racional (Chow, 1964), Número de Curva (USDA, 1985), Hidrograma Unitario Triangular (USBR, 1977), Hidrograma Unitario Instantáneo (Springall, 1969) y el Hidrograma Unitario Sintético (Gray, 1961). En particular, el Método Racional considera que del total de precipitación pluvial que cae sobre la cuenca, sólo contribuye al escurrimiento la parte de lluvia disponible una vez que se ha alcanzado la saturación de la superficie del suelo por infiltración (i. e., la lluvia en exceso); por lo que asume que el escurrimiento medio (Q) en un área (A) de drenaje es proporcional a la cantidad de precipitación media (I) que cae sobre el área en una unidad de tiempo:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (4)$$

donde:

Q = gasto del escurrimiento en *cfs*.

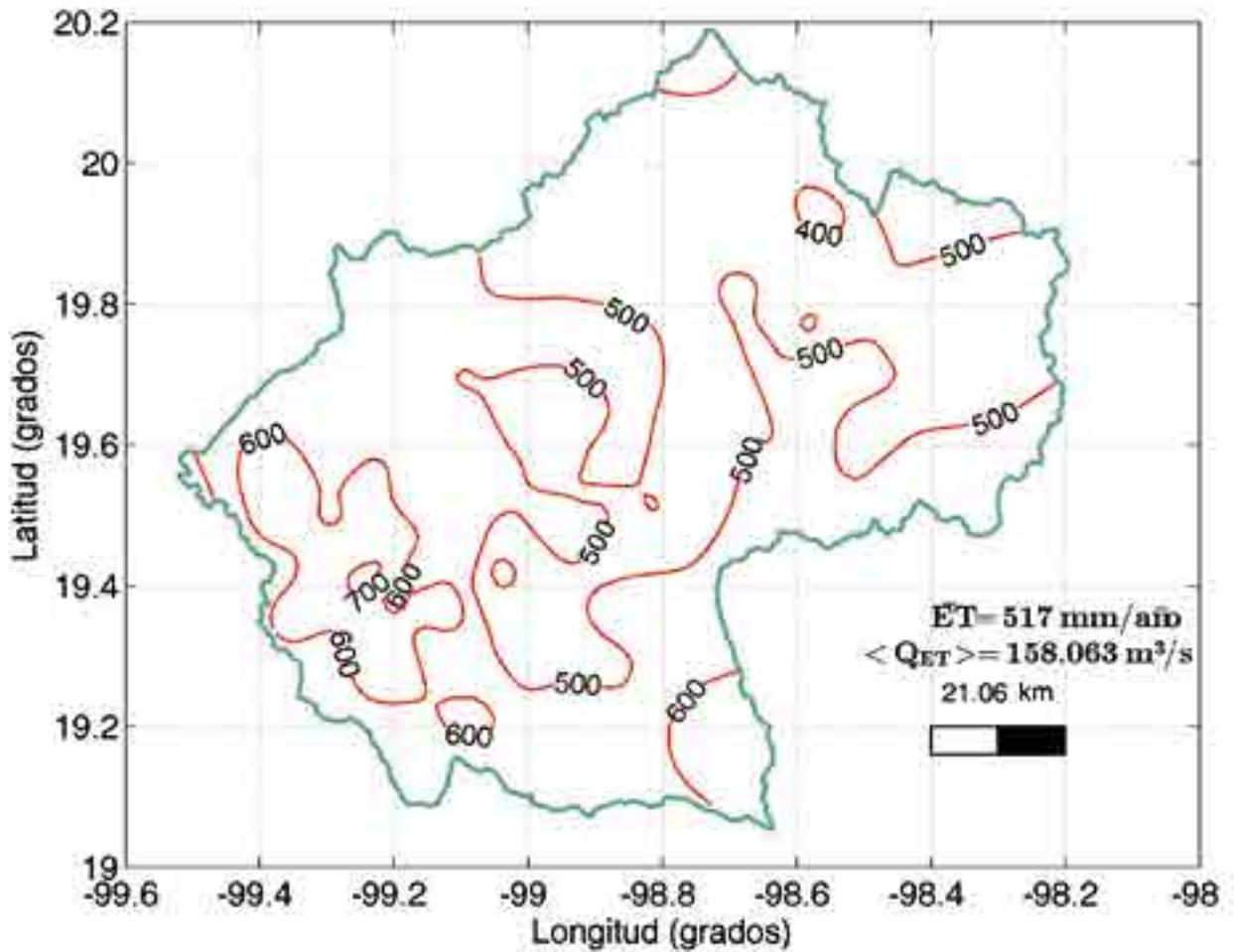
I = intensidad de lluvia (*inch/hr*).

A = área de la cuenca en acres.

C = coeficiente de escurrimiento (adimensional), estimado en función del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca.

Figura 3

Evapotranspiración media anual (mm/año) de la cuenca del Valle de México



La aplicación de la ecuación 4 en cada sector espacial de la cuenca donde se obtiene la solución numérica (v. gr., cada 100 hectáreas) permite estimar el volumen de escurrimiento sectorial (Q_c), de manera tal que $Q_{escurre}$ se determina con la suma de Q_c sobre todos los N sectores de la cuenca, i. e.:

$$Q_{escurre} = \sum_{i=1}^{i=N} Q_{c_i} \tag{5}$$

Obsérvese que en la ecuación 5 se tiene que considerar la correspondiente conversión de unidades para expresar $Q_{escurre}$ en m^3/s ; asimismo, al dividir esta ecuación entre el área total de la cuenca se obtiene el valor promedio ponderado por área de la lámina acumulada de escurrimiento en la cuenca.

El cálculo de $Q_{escurre}$ para la cuenca del Valle de México, empleando el Método Racional, requirió

del valor promedio de los rangos de C mostrados en la figura 4. En la zona urbana de la cuenca se aplicó un valor de C (27.5%) que corresponde al rango característico de áreas conurbadas (25 a 40%) (Chow, 1964). De esta manera se obtuvo un volumen de escurrimiento medio anual en la cuenca de 25.395 m³/s, equivalente a una lámina de 83 mm/año.

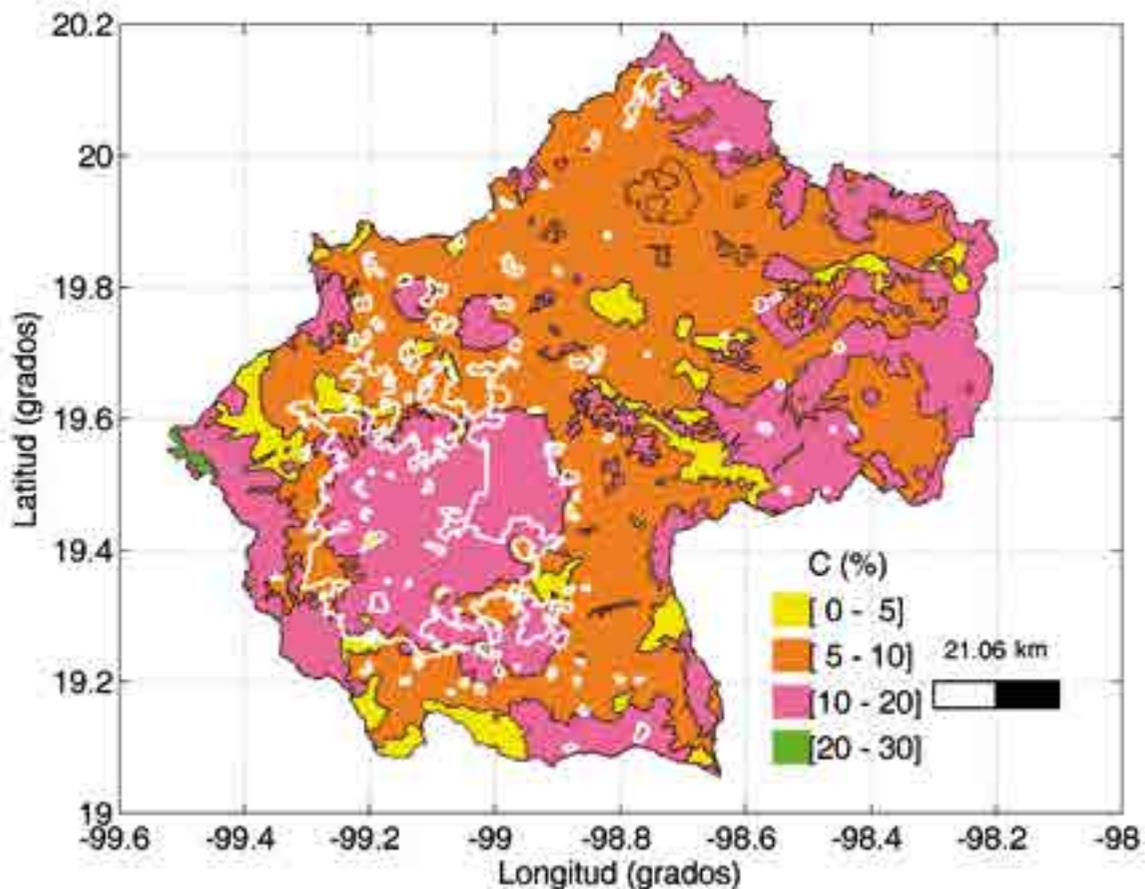
3.5 Cálculo de los volúmenes de infiltración

Diferentes algoritmos son usados para determinar $Q_{infiltra}$ que se introducen en el subsuelo, *v. gr.*, Balance Hidrológico (Lerner *et al.*, 1990), Número

de Curva (USDA, 1985) e índices de Infiltración (Pilgrim y Cordery, 1992). Los valores de $Q_{infiltra}$ obtenidos con cada algoritmo difieren en un amplio rango, por lo que se considera que ningún método caracteriza de forma adecuada la infiltración (Sophocleous, 1995). A pesar de las incertidumbres existentes en el cálculo, se hace necesario contar con una estimación de $Q_{infiltra}$ porque nos revela el potencial de recarga al acuífero, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración (Carrera-Hernández y Gaskin, 2008).

En particular, el algoritmo Balance Hidrológico considera que de los volúmenes de lluvia que caen sobre la cuenca, una parte retorna a la atmósfera vía

Figura 4
Coefficientes de escurrimiento en la cuenca del Valle de México, mostrando la configuración de la zona urbana en contorno blanco



evaporación directa o transpiración de la vegetación, otra escurre por la superficie y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al acuífero, además de que estas magnitudes deben cumplir la ecuación del balance hidrológico (Pladeyra *et al.*, 2006):

$$Q_{lluvia} = Q_{ET} + Q_{escurre} + Q_{infiltra} \quad (6)$$

La aplicación de la ecuación 6 en cada sector espacial de resolución permite estimar el volumen de infiltración sectorial, ya que se cuenta con la estimación de los demás volúmenes de agua en todos los sectores de la cuenca, de manera tal que $Q_{infiltra}$ se determina al sumar estos volúmenes de infiltración sectoriales en toda la cuenca; asimismo, al dividir $Q_{infiltra}$ entre el área total de la cuenca se obtiene el valor promedio de la lámina acumulada

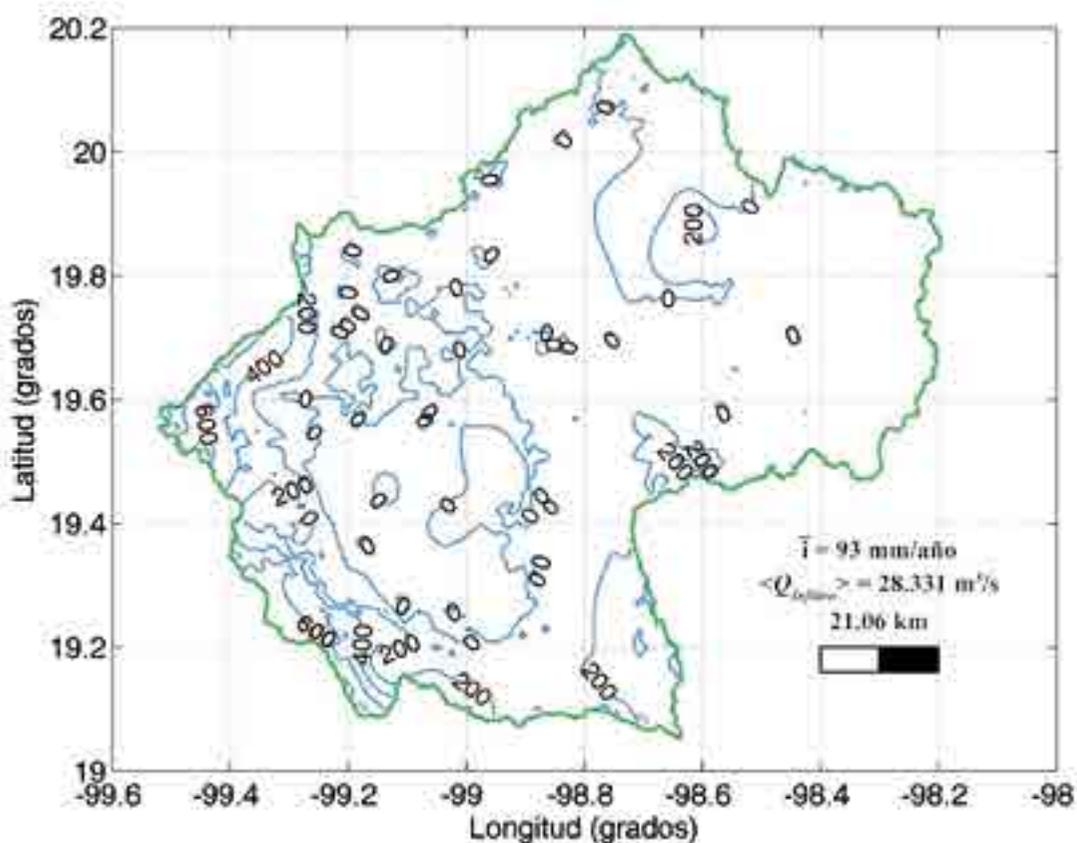
de infiltración en la cuenca ponderado por área.

Es importante anotar que la aplicación del algoritmo del Balance Hidrológico para obtener $Q_{infiltra}$ sólo es aplicable para cuando $Q_{lluvia} \gg Q_{ET}$, i. e., cuando la intensidad de la lluvia excede las tasas de evapotranspiración, lo cual sucede por lo general en regiones húmedas y en eventos de tormentas; sin embargo, en regiones áridas y semiáridas se sugiere obtener $Q_{infiltra}$ en periodos cortos y aplicando un balance de agua en el suelo, empezando en los meses de lluvia, como se describe en Remenieras (1971).

En el caso de la cuenca del Valle de México, el volumen de infiltración promedio anual ($\langle Q_{infiltra} \rangle$) expresado en términos de láminas \bar{i} (mm/año) y

Figura 5

Infiltración media anual (mm/año) de la cuenca del Valle de México



estimado con el algoritmo Balance Hidrológico se presenta en la figura 5.

3.6 Volúmenes de aprovechamientos de aguas superficiales y subterráneas

Para poder determinar los volúmenes de estos aprovechamientos de manera directa, se requieren las estadísticas de volúmenes de agua por sectores de usuarios (*v. gr.*, público, agrícola e industrial) que están disponibles en el REPGA. Para fines prácticos, los 12 temas de usos consuntivos que agrupa el Registro, aquí se tipifican en los siguientes tres agregados:

- Uso Público, para abastecimiento Doméstico y Público Urbano.
- Uso Agrícola, el cual incluye, además, el Pecuario, Acuicultura, Múltiples Usos y Otros Usos.
- Uso Industrial; bajo esta modalidad se incluye la Industria Autoabastecida, Agroindustrial, Servicios, Comercio y Generación de Energía Eléctrica para plantas generadoras de electricidad que no son hidroeléctricas; el uso del agua de estas plantas se considera no consuntivo y la misma agua que se turbinata se contabiliza como parte del uso consuntivo al que sea destinada.

Los aprovechamientos superficiales se refieren al consumo de agua para diversos usos, de los volúmenes de agua disponibles en los cuerpos de agua superficiales, como: lagos, lagunas y vasos de regulación. Los Q_{cuerpos} constituyen parte de las fuentes de abastecimiento de agua de la cuenca

Cuadro 2

Uso asignado a los caudales de los aprovechamientos de aguas superficiales en el Valle de México

Usuario	Volumen anual (hm ³)
Público	41.31
Agrícola	130.21
Industrial	32.48

del Valle de México, de los cuales se aprovechan 6.469 m³/s según las concesiones del REPGA (ver cuadro 2).

Por otra parte, en los volúmenes de aprovechamiento de agua subterránea de la cuenca del Valle de México concurre un complejo sistema de operación de 2 781 pozos, entre ellos, los inscritos en el REPGA, el sistema del Plan de Acción Inmediata (PAI) y los operados por el SACM. La figura 6 muestra la ubicación de los pozos REPGA sobre los acuíferos del Valle de México, clasificados según el uso agregado de la concesión del agua. Como se observa, los de extracción para uso público están distribuidos en todo el Valle de México, mientras que los de uso agrícola se encuentran concentrados sobre la zona rural y los de uso industrial se ubican, en su mayoría, en ZMCM.

La extracción anual de agua de todos los pozos en los acuíferos de la cuenca del Valle de México, se estimó en 57.920 m³/s (ver cuadro 3). La mayor cantidad de agua se extrae del acuífero ZMCM que subyace a la ciudad de México, le siguen los de Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y Chalco-Amecameca, donde se tiene la mayor concentración de pozos de extracción (ver figura 6). Estos cuatro acuíferos están sometidos a sobreexplotación, ya que los volúmenes de extracción superan los de recarga. Por otra parte, los acuíferos del oriente de la cuenca del Valle de México (Apan, Soltepec y Tecocomulco) cuentan con volúmenes de agua disponibles para su aprovechamiento.

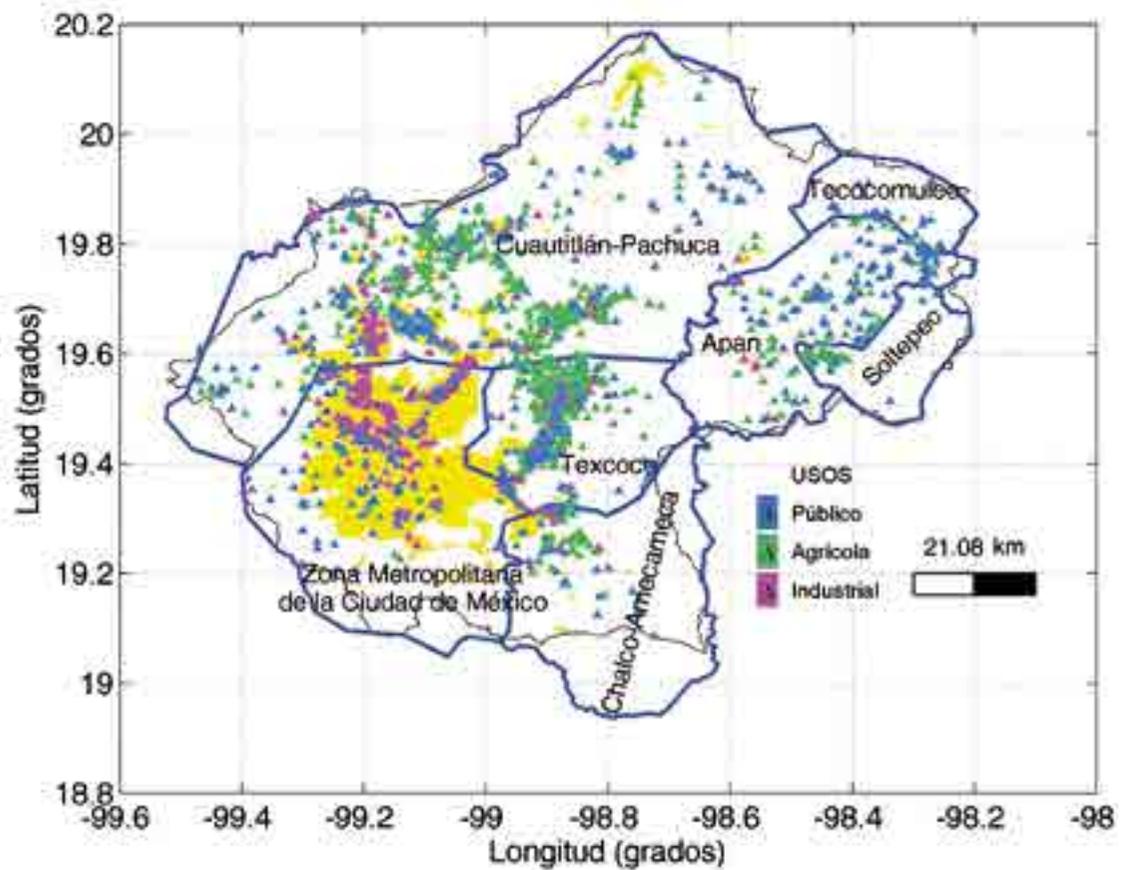
La información del aprovechamiento de agua subterránea también incluye las descargas naturales del acuífero a través de 18 manantiales y el gasto base del río Magdalena, que proveen un flujo promedio anual calculado en 2.449 metros cúbicos por segundo.

3.7 Volúmenes de transvases

Los transvases se refieren a aquellos volúmenes de agua externos que se importan y exportan de las cuencas vecinas; por lo general, se cuenta con

Figura 6

Ubicación de los pozos REPDA sobre los acuíferos de la cuenca del Valle de México, clasificados según el uso agregado de la concesión del agua; se muestra en amarillo la extensión de la ZMCM y de la ciudad de Pachuca



Cuadro 3

Condición estimada de los acuíferos (promedio anual) del Valle de México

Núm.	Acuífero	Extracción (m ³ /s)	Recarga (m ³ /s)	Condición
1	Chalco-Amecameca	2.559	1.620	Sobreexplotado
2	ZMCM	33.962	10.473	Sobreexplotado
3	Texcoco	5.529	3.289	Sobreexplotado
4	Apan	0.228	3.199	Disponibilidad de agua
5	Soltepec	0.479	1.896	Disponibilidad de agua
6	Tecocomulco	0.024	0.568	Disponibilidad de agua
7	Cuautitlán-Pachuca	15.139	7.286	Sobreexplotado
	Total	57.920	28.331	Sobreexplotado

registros de aforos de los volúmenes de transvase. En el caso de la cuenca del Valle de México, los volúmenes de importación corresponden a aquellos procedentes de los sistemas de abasto del Cutzamala y Alto Lerma. El registro de entrega del sistema Cutzamala a la cuenca del Valle de México (Distrito Federal y estado de México) muestra que, para el periodo 1997-2008, la importación promedio de agua en la cuenca del Valle de México fue de 15.162 m³/s (ver figura 7); el registro correspondiente del sistema Lerma presenta que el suministro respectivo de importación a la cuenca (Distrito Federal) fue de 4.231 metros cúbicos por segundo.

También, se cuenta con los gastos de exportación de la cuenca del Valle de México hacia la de Tula a través del sistema de drenaje de desalojo del agua. El sistema de drenaje de la cuenca del Valle de México es del tipo combinado (aguas residuales y pluviales) y tiene cuatro estaciones hidrométricas estratégicamente ubicadas que registran los volúmenes de salida de agua de la cuenca: Conejos, Emisor Requena, Túnel Viejo de Tequixquiac y Túnel Nuevo de Tequixquiac. La figura 8 muestra el comportamiento de los volúmenes anuales de exportación a la cuenca de Tula para el intervalo de información simultánea 1989-

Figura 7

Caudales históricos suministrados por el sistema Lerma-Cutzamala a la cuenca del Valle de México

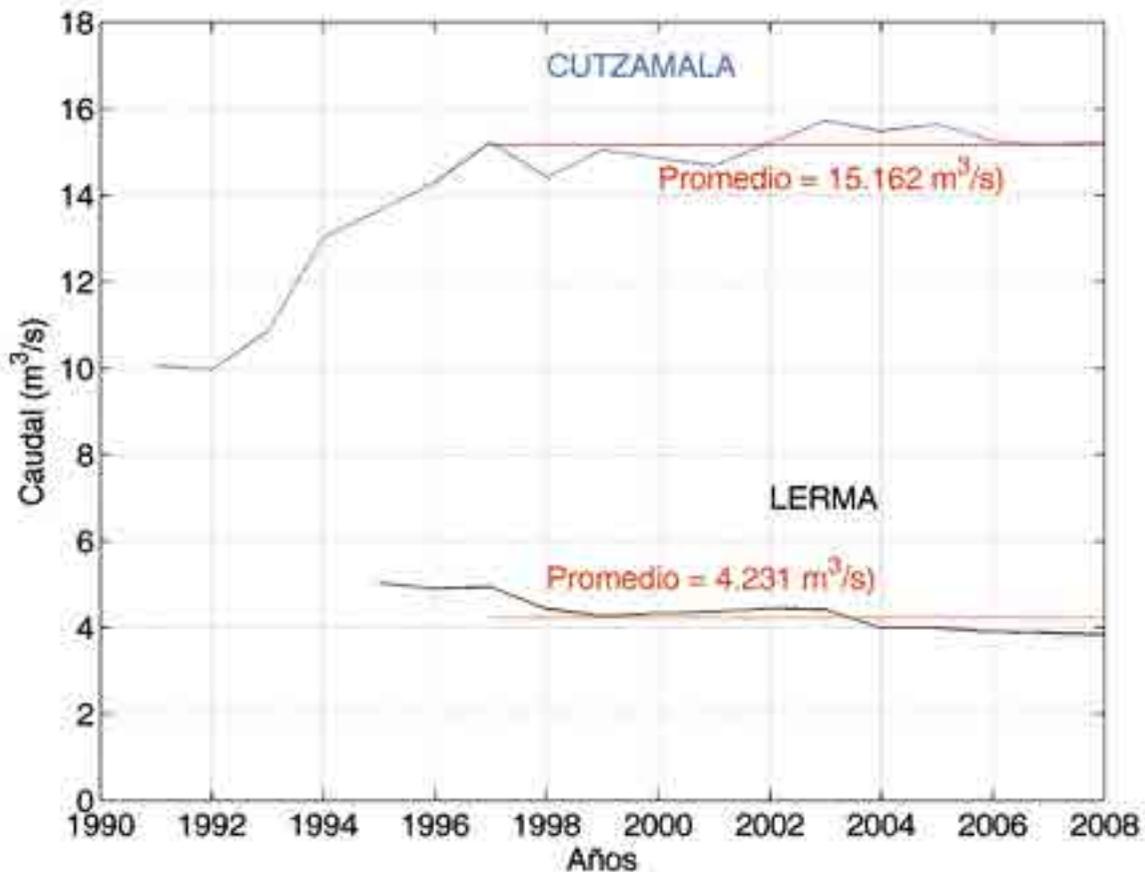
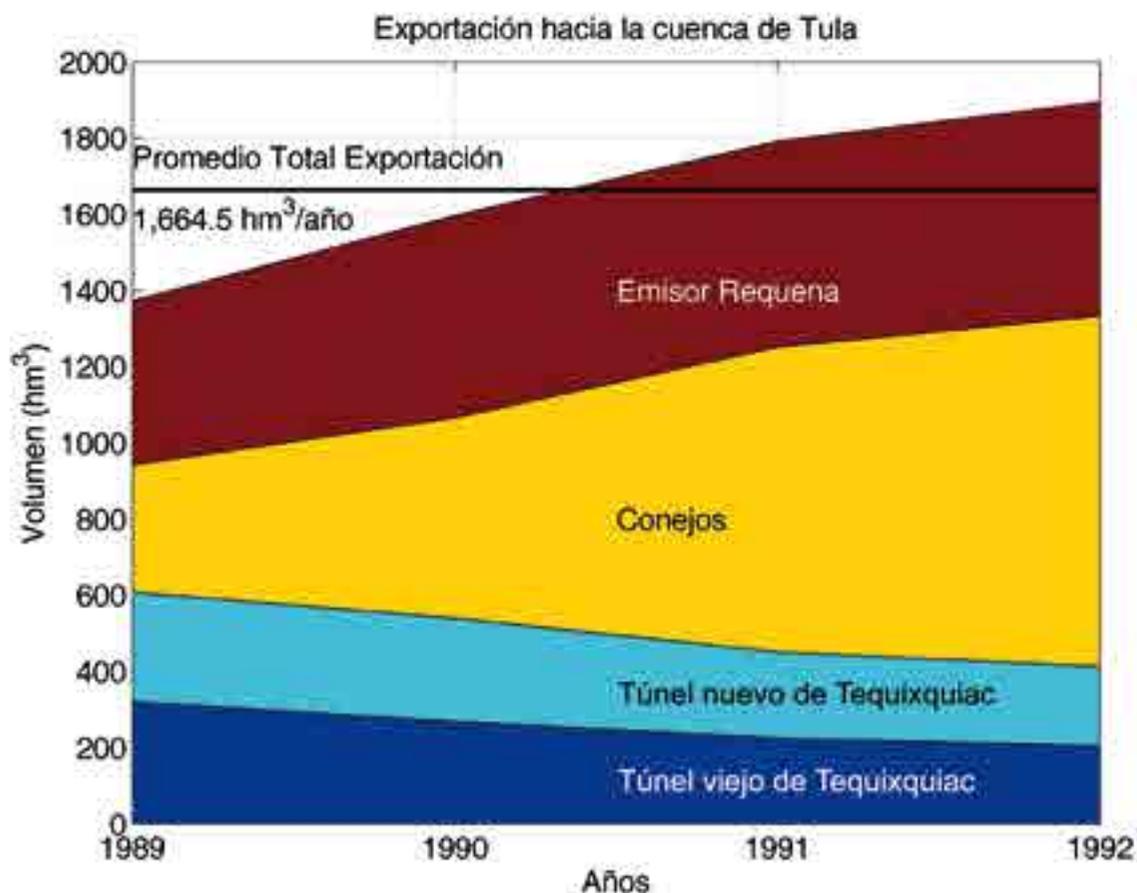


Figura 8

Exportaciones medias anuales del agua de la cuenca del Valle de México a la de Tula



1992; la salida aforada promedio de la cuenca del Valle de México fue de 1 664.5 hm³/año, *i. e.*, un caudal promedio de 52.782 metros cúbicos por segundo.

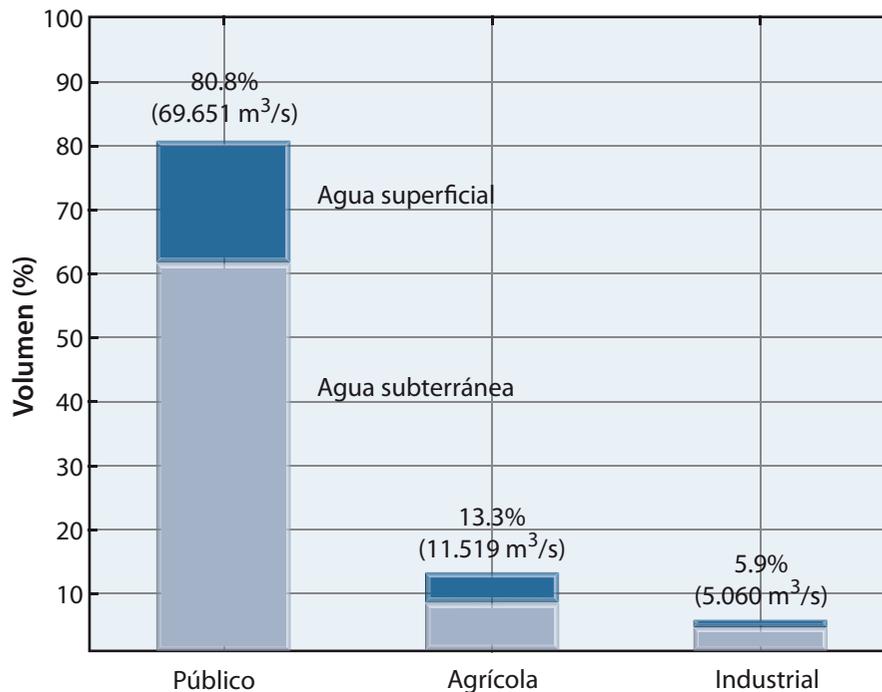
3.8 Volúmenes de usos del agua

A partir de las concesiones de los volúmenes de agua registrados en el REPDA —tanto de los aprovechamientos superficiales como de los subterráneos— se realiza la estadística por sectores de usos agrupados consuntivos del agua (público, agrícola

e industrial) de la cuenca en cuestión. En el caso del Valle de México, para conocer la cantidad de agua de uso público (*i. e.*, la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos y a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes), de manera adicional se consideran los caudales que se extraen de los pozos PAI y SACM y los que entrega el sistema Lerma-Cutzamala, así como los aprovechamientos de los manantiales, que están destinados propiamente para uso público urbano y que no están registrados en el REPDA. En total,

Figura 9

Volúmenes de usos consuntivos agrupados en la cuenca del Valle de México



todas estas fuentes aportan 69.651 m³/s de caudal de agua de uso público. Estos volúmenes de agua son de la mayor relevancia, ya que se convierte en demanda social contar con agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano.

Del volumen total de usos agrupados consuntivos en la cuenca del Valle de México (ver figura 9), el mayor uso es el público (80.8%), seguido del agrícola (13.3%) y el industrial (5.9%). Al respecto, es importante destacar que 75% del agua para uso consuntivo proviene de los acuíferos, mientras que el resto procede de ríos, arroyos y lagos. En el abastecimiento público, tres veces más del volumen de agua utilizado se origina en pozos de extracción de agua subterránea; para la agricultura, dos veces más es de procedencia subterránea y para el uso industrial, se emplea casi en su totalidad agua de fuentes subterráneas; el uso agrícola del vital líquido se refiere, esencialmente, al agua utilizada para regar cultivos en distritos y unidades de riego para el desarrollo rural.

3.9 Volúmenes de tratamiento y de reuso

Los de tratamiento corresponden a los de agua residual tratada que generan las PTAR; la utilización de esta última (*i. e.*, volúmenes de reuso), vista como un proceso de regeneración del agua residual, se ha convertido en un componente esencial de la gestión integral de los recursos hídricos, en especial en cuencas donde la disponibilidad de agua es escasa. En la cuenca del Valle de México, estos volúmenes constituyen una fuente de abastecimiento de agua

Cuadro 4

Reuso asignado a los caudales de las aguas residuales tratadas del Valle de México (CONAGUA 2009)

Usuario	Volumen anual (hm ³)
Público	66.23
Agrícola	100.92
Industrial	15.77

adicional para ella misma. Los de reuso de agua residual tratada en esta cuenca asciende a un caudal de 5.800 m³/s (CONAGUA, 2009). Un poco más de la mitad (55%) se emplea para el riego agrícola y de jardines; sólo 9%, para el uso industrial y el resto se destina para el uso público (ver cuadro 4).

3.10 Volúmenes de retorno de aguas

Cuadro 5

Porcentajes de volúmenes de retorno

Usuario	Rango en México ^{a/} (%)	Valle de México (%)	
		Lafragua <i>et al.</i> (2003)	IMTA (2005)
Público	70-80	80	74
Agrícola	5-15	10	40
Industrial	50-60	55	25

^{a/} Aparicio-Mijares *et al.*, 2006.

Son la cantidad de agua que regresa a la cuenca porque no es utilizada en el uso que fue comprometida. Existen tantas variedades de volúmenes de retornos como clasificaciones de usos del agua: en el cuadro 5 se presentan los porcentajes de volúmenes de retorno que se han utilizado en México y en la cuenca del Valle de México.

Los porcentajes de volúmenes de agua de retorno utilizados aquí para la cuenca del Valle de México corresponden al promedio del rango que se ha utilizado en nuestra nación (ver cuadro 5), ya que los reportados para la cuenca exceden los límites superiores e inferiores de los rangos notificados en el país para los usos agrícola e industrial, respectivamente. De manera adicional, se ha considerado un porcentaje de retorno de 27.5% para el uso de agua de las PTAR, como resultado de los volúmenes de agua residual utilizados por las PTAR (8.005 m³/s) y la asignación de los de agua tratada para su reuso (5.800 m³/s).

3.11 Volúmenes de pérdidas

Son los desaprovechados por fallas (fugas) en el sistema hidráulico de la cuenca, las cuales, por lo general, se cuantifican en términos de la eficiencia del proceso hidráulico, *v. gr.*, en un proceso que tenga una eficiencia de 100% no tendrá pérdidas de agua, de manera tal que existen Q_{fugas} en las redes de distribución de agua potable y tratada, así como en la red de drenaje, en los sistemas de riego y en las PTAR. Para el caso de la cuenca del Valle de México, la cantidad total de agua que entra, se usa y recicla, se cuantifica en el desalojo aforado; por esto, el cálculo de Q_{fugas} considera los volúmenes de agua perdidos de manera global en lo que se conduce hacia fuera de la cuenca a través del drenaje combinado y lo que se registra como desalojo, *i. e.*:

$$Q_{fugas} = \left(\underbrace{Q_{escurre} - Q_{cuerpos} - Q_{almacen}}_{\text{drenaje pluvial}} + \underbrace{(Q_{retorno} - Q_{PTAR})}_{\text{drenaje sanitario}} \right) - Q_{desalojo} \quad (7)$$

3.12 Volúmenes de almacenamiento

Se refiere al resultado que se obtiene de la suma de las componentes del balance hídrico, el cual debe corresponder al volumen de agua almacenado en las presas de la cuenca en estudio. En el Valle de México se cuenta con un sistema de 22 presas que se han construido para controlar las avenidas que, en conjunto, tienen una capacidad equivalente a 2.900 m³/s de almacenamiento (CONAGUA, 2007). Por otro lado, el volumen de almacenamiento que se obtiene mediante el balance hídrico es de 2.687 m³/s. La discrepancia del valor calculado para $Q_{almacen}$ y el observado en las presas de la cuenca del Valle de México, así como para las demás componentes del balance hídrico, constituye el tema de análisis del siguiente apartado.

4. Incertidumbre en los cálculos de volúmenes de agua

Los cálculos de las componentes de la ecuación

de balance están sujetos a cierta incertidumbre, la cual está en función del origen y la medición de los valores de las variables (*i. e.*, calidad y cantidad de la información recolectada), así como del algoritmo empleado para su cálculo. Debido a que esta investigación pretende aportar un procedimiento de cálculo en la estimación de los balances hídricos, la incertidumbre se asocia a un error en la estimación del cálculo (Taylor, 1982), considerándola como la diferencia entre el valor real (incertidumbre 0%) y el calculado por los algoritmos utilizados. Este concepto de error es difícil utilizarlo en una ecuación de balance, ya que el valor verdadero no se conoce en ningún momento, además de estar trabajando siempre con valores medios; sin embargo, el error adquiere un valor aditivo cuando se consideran todas las componentes que intervienen en la ecuación, *i. e.*, al sumar todas las incertidumbres se obtiene la incertidumbre total del balance (Taylor, 1982), el cual deberá ser comparado con la componente de pérdidas por fugas que se calcula en los balances para efectuar el cierre (Aparicio-Mijares *et al.*, 2006). Si la incertidumbre resulta ser menor o igual al valor de las pérdidas por fugas, estaremos hablando de un balance correcto; si no es así, se deberán revisar los cálculos o verificar la información de origen para lograr un cierre adecuado.

La incertidumbre asociada al valor final de cada componente del balance hídrico de la cuenca del Valle de México se obtuvo evaluando la diferencia entre los volúmenes de agua calculados en la cuenca (con los algoritmos presentados aquí) y los valores que, de manera oficial, están reportados por la CONAGUA, los cuales, para fines de comparación, aquí son considerados como reales. Este procedimiento permite, a su vez, modular los grados de libertad (coeficientes de los algoritmos numéricos) involucrados en el cálculo de los volúmenes de agua, de manera tal que la incertidumbre puede decrecer al ajustar los resultados a los valores reales. La estimación de los volúmenes de escurrimiento involucra el valor del coeficiente C , según el Método Racional (ver ecuación 4), el cual puede

ser ajustado espacialmente para obtener la mejor estimación de Q_{escurre} que se aproxime al valor real; cuando este caso sucede, se dice entonces que el coeficiente C está calibrado; con este valor se obtuvo la estimación de Q_{escurre} y se comparó con el valor correspondiente reportado por la CONAGUA, de la misma manera que se compararon las otras estimaciones de las componentes del balance hídrico de la cuenca del Valle de México (ver cuadro 6).

Como se observa en el cuadro 6, se obtuvo una incertidumbre global promedio de 1% en la estimación de las componentes del balance hídrico en la cuenca del Valle de México, equivalente a una diferencia total de 0.926 m³/s entre los valores calculados y los reales (reportados por CONAGUA), con una diferencia máxima de 4.951 m³/s sobrevaluando los volúmenes de uso público. La incertidumbre total del balance obtenida (0.926 m³/s) es mucho menor que la componente de pérdidas por fugas calculada (15.971 m³/s) o reportada (15.636 m³/s), por lo que estamos hablando de un balance hídrico correcto, es decir, el balance hídrico promedio anual calculado para la cuenca del Valle de México resulta confiable en $\pm 1\%$ respecto al reportado por la CONAGUA.

En algunas cuencas se presentan problemas para realizar un balance hídrico como el mostrado aquí para el Valle de México debido a la escasa información de que se dispone; por ejemplo, para los diferentes consumos de agua, es difícil encontrar macro y micromediciones del vital líquido. Asimismo, la red de estaciones climatológicas e hidrométricas, por lo general, no es lo suficientemente densa para estimar, de manera confiable, la precipitación, la evapotranspiración ni los escurrimientos. En estas cuencas, de las que no se dispone de información o si existe no es del todo confiable, la estimación de los volúmenes de agua puede llevarse a cabo mediante una regionalización, donde se agrupan zonas con comportamientos similares de un conjunto de variables ligadas entre sí (Gutiérrez-López, 1996). De esta forma se pueden exten-

Cuadro 6

Comparación de las componentes del balance de agua en la cuenca del Valle de México con los reportados por la CONAGUA (2007)

Componente del balance	Flujo (m ³ /s)		Incertidumbre	
	Calculados	CONAGUA	(m ³ /s)	(%)
Precipitación	211.789	214.700	2.911	1
Evapotranspiración	158.063	159.400	1.337	1
Escorrentamiento	25.395	23.700	-1.695	7
Infiltración	28.331	31.600	3.269	10
Manantiales	2.449	2.700 ^{a/}	0.251	9
Pozos	57.920	59.500	1.580	3
Cutzamala	15.162	14.700	-0.462	3
Lerma	4.231	4.800	0.569	12
Desalojo	52.782	50.400	-2.382	5
Uso público	69.651	64.700	-4.951	8
Uso agrícola	11.519	12.600	1.081	9
Uso industrial	5.060	4.600	-0.460	10
Reuso público	2.100	2.100	0.000	0
Reuso agrícola	3.200	3.200	0.000	0
Reuso industrial	0.500	0.500	0.000	0
Pérdidas	15.971	15.636 ^{b/}	-0.335	2
Almacenamiento	2.687	2.900	0.213	7
			Total = 0.926	Promedio = 5

^{a/} CONAGUA, 2008.

^{b/} Lafragua *et al.*, 2003.

der las mediciones a zonas similares respecto al comportamiento de características significativas de la región; por ejemplo, en el caso de que la temperatura y los índices de población fueran similares entre dos regiones, se podría asignar los mismos porcentajes de volúmenes de agua

para el uso doméstico en la región de la cuenca sin medición, que los obtenidos en la cuenca con micromedición del consumo de agua.

Por otro lado, no sólo el tipo de información influye directamente en la estimación de los vo-

lúmenes del balance hídrico, sino también la calidad de la misma, *i. e.*, el resultado del balance hídrico será tan confiable como lo sea la calidad de los datos utilizados. En el caso de la cuenca del Valle de México, por ejemplo, la información oficial empleada también está sujeta a errores en la medición, los cuales pueden ser detectados durante una verificación en la calidad de la información, como el aplicado en nuestro caso, pudiéndose corregir; sin embargo, estos controles de calidad no garantizan datos libres de errores. Por fortuna, al promediar las estimaciones anuales y mensuales de las componentes del balance hídrico, estos valores promedio están menos afectados por los errores de medición que los valores de los volúmenes instantáneos.

5. Conclusiones

Las metodologías aplicadas aquí para la obtención de las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas están sujetas al tipo de datos disponible. Mucha de la información requerida para este propósito se encuentra recopilada por el INEGI, sin embargo, el resto está diseminado en diferentes formatos de las instancias operadoras y de gestión de los recursos hídricos. En este sentido, es deseable concentrar toda la información requerida para el cálculo del balance hídrico en una sola institución, de tal manera que todos los datos pasen por el mismo control de calidad, se cuente con información confiable y se reduzca la incertidumbre en la estimación de las componentes del balance hídrico.

El balance hídrico promedio anual calculado con las metodologías expuestas aquí para la cuenca del Valle de México resulta confiable en 12% máximo respecto al reportado por la CONAGUA. Es decir, éstas fueron probadas en la cuenca y resultaron correctas, lo cual permite decir que son confiables para ser aplicadas en otras cuencas e iniciar la estandarización del cálculo del balance hídrico.

Fuentes

- Aparicio-Mijares, F. J. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, 2007, 303 pp.
- Aparicio-Mijares J., J. Lafragua-Contreras, A. Gutiérrez-López, R. Mejía Zermeño y E. Aguilar-Garduño. "Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas", en: *Documento técnico núm. 4. Programa Hídrico Internacional de la UNESCO para América Latina y El Caribe*, 2006, 98 pp.
- Band, L. E. "Topographic Partitioning of Watersheds with Digital Elevation Models", in: *Water Resources Research*, 22 (1): 15-24, 1986.
- Carrera-Hernández, J. J., and S. J. Gaskin. "Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico", in: *Journal of Hydrology*, 353 (3-4): 228-246, 2008.
- Chiles, J. P., and P. Delfiner. "Geostatistics, Modeling Spatial uncertainty", in: *Wiley Series in Probability and Statistics*, 1999.
- Chow, V. T. *Handbook of Hydrology: A Compendium of Water-resources Technology*. McGraw-Hill, 1964.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua 2007 de la Región XIII*. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, CONAGUA, 2007.
- _____. "Equilibrio hidrológico en la cuenca del Valle de México", en: *XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Luege-Tamargo, J. L. (conferencista), 30 de enero del 2008.
- _____. *Estadísticas del agua de la Región Hidrológica-Administrativa XIII, aguas del Valle de México*. CONAGUA-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2009.
- _____. *Agenda del agua 2030*. CONAGUA-SEMARNAT, 2011.
- Gandin, L. S. "Complex Quality Control of Meteorological Observations", in: *Monthly Weather Review*, 166: 1137-1156, 1988.
- Gómez-Reyes, E. "Gestión Hidrológica", en: Burns, E. (editor). *Repensar la Cuenca: La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México*. Universidad Autónoma Metropolitana, 2009, 160 pp.
- González-Sosa, E., C. A. Mastachi-Loza, J. B. Rivera-Vázquez, A. Gutiérrez-López, J. Lafragua y A. Guevara-Escobar. "La evaporación en la cuenca del lago de Pátzcuaro, México", en: *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(3): 51-69, 2010.
- Gutiérrez-López, A. "Identificación de regiones hidrológicamente homogéneas con base en las curvas de Andrews", en: *International Association for Hydraulic Research (IAHR)*. Guayaquil, Ecuador, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 1966.
- Gray, D. M. "Synthetic water hydrograph for small watersheds", in: *Proc. Am. Soc. Civil Engineers, Journal of Hydraulic Division*, 87(HY4): 33-53, 1961.
- IMTA. "El agua en la Región XIII Valle de México, análisis hidrológico y su aprovechamiento", en: *Reporte técnico TH0527.3 para la Comisión Nacional del Agua*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2005.
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue. "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis", in:

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-600, 1988.
- Lafragua J., A. Gutiérrez, E. Aguilar, J. Aparicio, R. Mejía, O. Santillán, M. A. Suárez y M. Preciado. "Balance hídrico del valle de México", en: *Anuario IMTA*, 40-46, 2003.
- Lerner, D. N., A. S. Saar, and I. Simmers. "Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge", in: *IAH International Contributions to Hydrogeology*, 8, 1990.
- Mark, D. M. "Automatic Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models", in: *Cartographic*, 21(2/3): 168-178, 1984.
- Marks, D., J. Dozier, and J. Frew. "Automated basin delineation from digital elevation data", in: *Geo-Processing*, 2: 299-311, 1984.
- Martz, L. W., and J. Garbecht. "Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models", in: *Computers and Geosciences*, 18(6): 747-761, 1992.
- Montero-Contreras, D., E. Gómez-Reyes, G. Carrillo-González y L. Rodríguez-Tapia (editores). *Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua: nuevos retos del agua en el Valle de México*. México, Universidad Autónoma Metropolitana y Porrúa, 2009, 356 pp.
- O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark. "The extraction of drainage networks from digital elevation data", in: *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28: 323-344, 1984.
- Perló-Cohen, M. y A. E. González-Reynoso. *¿Guerra por el agua en el Valle de México?: estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el estado de México*. Segunda edición. México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009, 155 pp.
- Pilgrim, D. H., and I. Cordery. "Flood runoff", in: Maidment, D. R. (editor). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, 9, 1992.
- Pladeyra, S. C., O. Escolero-Fuentes, E. Domínguez-Mariani y S. Martínez-Edda. "Ciclo hidrológico", en: Cotler-Ávalos, H., M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (editores). *Atlas de la cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta*. INE-SEMARNAP, 198, 2006.
- Remenieras, G. "Tratado de Hidrología Aplicada", en: *Editores Técnicos Asociados*, 515, 1971.
- Sánchez-San Román, F. J. "Evapotranspiración", en: *Hidrología*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 2006. En línea (http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/peactico_climatologia_2010/P-3/5.ETP%20articulo.pdf); última visita 17 de septiembre del 2010.
- Romero-Lankao, P., and G. Günther. "Missing the multiple dimensions of water? Neoliberal Modernization in Mexico City and Buenos Aires", in: *Policy and Society*, 30: 267-283, 2011.
- Sandwell, D. T. "Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data", in: *Geophysical Research Letters*, 14(2): 139-142, 1987.
- Springall, G. R. "Método de I - Pai Wu", en: *Drenaje en cuencas pequeñas*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 1969, p. 4.
- Sophocleous, M. "Groundwater recharge estimation and regionalization: the Great Bend Prairie of central Kansas and its recharge statistics", in: *J. Hydrol.* 137: 113-140, 1995.