





DOI: 10.24850/j-tyca-2024-05-10

Notas

Estimación de los volúmenes históricos de las aguas residuales exportados por la megaciudad de México al Valle del Mezquital de 1985 a 2020

Estimation of Mexico megacity wastewater volumes poured into the Mezquital Valley from 1985 to 2020

Ana Karen Hernández-Espinosa¹, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6300-3768

Elena María Otazo-Sánchez², ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9324-8926

Alma Delia Román-Gutiérrez³, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0927-1061

Claudia Romo-Gómez⁴, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7826-4557

¹Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, he450518@uaeh.edu.mx

²Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, elenamariaotazo@gmail.com









³Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, aroman@uaeh.edu.mx ⁴Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, claudiar@uaeh.edu.mx

Autoras para correspondencia: Elena María Otazo-Sánchez, elenamariaotazo@gmail.com; Alma Delia Román-Gutiérrez, aroman@uaeh.edu.mx

Resumen

El sistema de drenaje de la Ciudad de México es muy complejo y cuenta con cuatro salidas artificiales de desalojo: el Gran Canal de Desagüe, y los Emisores Central, Poniente y Oriente, que transportan agua residual y pluvial hacia el Valle del Mezquital. Sin embargo, no se tienen registros de los volúmenes históricos del agua residual que ha recibido el Valle del Mezquital. Por ello se realizó una estimación del volumen de agua residual y pluvial que ingresa al sistema de drenaje proveniente de cuatro fuentes principales de descargas: población, industrias, servicios y ríos, para el periodo 1985-2020, en un lapso quinquenal. El promedio de precipitación aportada por las áreas metropolitanas fue de 648 ± 12.49 hm³. La estimación promedio de descargas industriales y de servicios reportadas por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) fue de 117 ± 18.09 hm³ y la población aumentó el vertido de aguas negras de 582 hm³ en 1985 a 803 hm³ en 2020. Este estudio desagrega los volúmenes aproximados transportados por cada emisor y los que reciben los ríos El







Salto y El Salado. Se reporta por primera vez una estimación anual del volumen histórico de aguas residuales que han propiciado el desarrollo socioeconómico del Valle del Mezquital, permitiendo posteriores trabajos de escenarios futuros para la toma de decisiones y la prevención de desastres.

Palabras clave: distribución espacial, gestión del agua, metrópolis, saneamiento, sistema de drenaje.

Abstract

The sewer system of Mexico City is very complex and has four drains: the Grand Canal and the Central, West, and East drain, which transport wastewater (from population, industry, services) and rainwater to the Mezquital Valley. However, there are not records of the historical volumes of wastewater received by the Mezquital Valley. Therefore, an estimate was made of the volume of wastewater and rainwater sent the drainage system from four main sources of discharges: population, industries, services, and rivers, for the period 1985-2020, in a five-year period. The average rainfall contributed by the metropolitan areas was 648 ± 12.49 hm³. The average estimate of industrial discharges and services reported by the Public Registry of Water Rights (REPDA) was $117 \pm 18.09 \text{ hm}^3$ and the population increased the discharge of sewage from 582 hm³ in 1985 to 803 hm³ in 2020. This study disaggregates the volumes transported by each drain toward the El Salto and El Salado rivers. It is reported for the first time an annual estimate of the historical volume of wastewater that has led to the socioeconomic development of the Mezquital Valley,







allowing subsequent work of future scenarios for decision making and disaster prevention.

Keywords: Metropolis, sanitation, space distribution, sewer system, water management.

Recibido: 19/09/2022

Aceptado: 30/04/2023

Publicado Online: 16/05/2023

Introducción

En la época prehispánica, Tenochtitlan (ahora Ciudad de México) estaba rodeada por cinco lagos (Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco) que provocaban grandes inundaciones en época de lluvia. Éstos se localizaban dentro de la Cuenca del Valle de México (comprende la Ciudad de México y el Estado de México) que es tipo endorreica, la cual no posee salidas naturales para el desalojo del agua (Conagua, 2018a). Por tal motivo, la ciudad fue dotada de un sistema de desagüe y su principal propósito era acarrear el agua hasta el mar a través de ríos aledaños (ríos Tula y Moctezuma). Ello se realizó mediante el uso de diques que ayudaban al control del nivel hidrológico en la urbe, siendo el albarradón de Nezahualcóyotl el más destacable de la época (Conagua, 2018a). Sin embargo, dicho sistema quedó destruido debido a las guerras durante la conquista española, reanudándose las inundaciones, que se







acrecentaron por el aumento de la urbanización (Breña-Puyo & Naranjo-Pérez de León, 2018).

En 1607 se creó un nuevo sistema de drenaje con el Tajo de Nochistongo, bajo la supervisión del ingeniero Enrico Martínez, cuya ubicación es en el actual municipio de Huehuetoca (Conagua, 2018b). Este dren ayudó a desviar el cauce del río Cuautitlán, y evitar las inundaciones que afectaban las edificaciones y la vida cotidiana de la población.

Con el aumento poblacional y de descargas residuales, la capacidad del tajo fue rebasada, presentando inundaciones más extremas; en 1856, el ingeniero Francisco de Garay construyó el primer túnel de Tequixquiac, que descargaba las aguas de la ciudad en el río del mismo nombre (Ramírez-de-Alba, 1995).

En 1900, la necesidad de proveer a la población de un servicio de alcantarillado permanente trajo consigo la construcción del Gran Canal de Desagüe, un dren abierto, que impediría inundaciones con el apoyo del túnel de Tequixquiac. Este canal recorre en el oriente de la ciudad y desemboca en el río El Salado, perteneciente al Valle del Mezquital. En 1930, la población de la zona era de más de un millón de personas, provocando que el sistema de drenaje resultara insuficiente, por lo que se amplió el Gran Canal y se construyó el Nuevo Túnel de Tequixquiac (Galina-Macías, 2010; Legorreta, 2006).

A mediados del siglo XX se inició la construcción del Emisor Poniente, siendo su principal función auxiliar al Gran Canal en el desalojo del aqua proveniente de los ríos del poniente de la ciudad. Dicho dren







lleva su cauce hacia el Valle del Mezquital por el Tajo de Nochistongo, finalizando en el río El Salto.

Ante el crecimiento tan acelerado de la población y la capacidad del drenaje rebasada nuevamente, en 1975 se terminó de construir el Emisor Central, el primer dren profundo, conformado por interceptores y lumbreras, que unen el agua residual y pluvial (Espinosa-Villareal *et al.*, 2018; Calleja, 2019; González-López, 2022). Este emisor no requería bombeo, porque funcionaría por gravedad y no se afectaría por el hundimiento de la ciudad. Dicho túnel también vierte sus aguas en el río El Salto, junto con el Emisor Poniente.

La falta de mantenimiento al drenaje y los daños en sus estructuras provocaron la pérdida en la capacidad de desalojo de todos los emisores. En 2007 se decidió añadir otro dren al drenaje profundo: el Túnel Emisor Oriente. Esta obra inicia en el río de Los Remedios y termina en la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula (Benítez, 2016).

Desde su concepción, el sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha recibido el agua residual y pluvial de la zona. A lo largo de la historia, su capacidad de desalojo ha sido insuficiente debido al crecimiento exponencial de la urbe. Algunos expertos (Izazola, 2001; Lesser-Illades & Cortés-Pérez, 1998; Martínez-Pereda, 1967) han planteado que tal situación prevalecerá en el futuro y quizás se deban añadir más emisores que eviten inundaciones que afecten la vida de la población.

En una publicación reciente, Hernández-Espinosa, Otazo-Sánchez, Román-Gutiérrez y Romo-Gómez (2021) describen los constantes trabajos de mantenimiento y ampliación al sistema de drenaje, haciendo







énfasis en el hecho de que el agua residual es vertida en el Valle del Mezquital, lo cual ha promovido el desarrollo de la agricultura en esa zona semidesértica, pero con un gran costo ambiental. La Figura 1 muestra el mapa del sistema de drenaje actual, que concentra la información recabada acerca de su distribución. En la Figura 1 se indican los emisores del drenaje de la Ciudad de México: Gran Canal (rojo), Emisor Central (verde), Emisor Poniente (azul) y Emisor Oriente (morado).







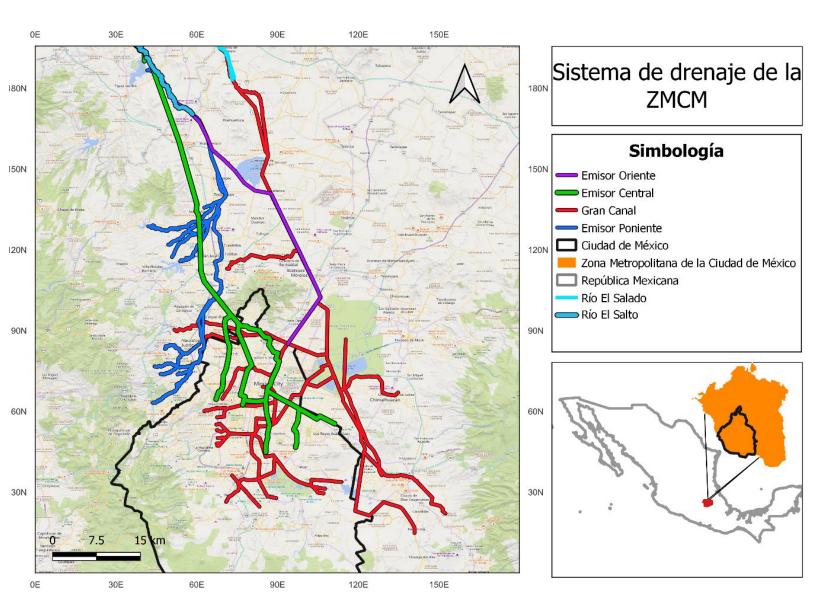


Figura 1. Distribución de los emisores del actual sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El sistema de drenaje de la Ciudad de México es un tema de interés. Sin embargo, la información sobre el mismo es muy dispersa o nula. Asimismo, no se tiene acceso a los registros históricos sobre los







volúmenes de agua residual que ha recibido el Valle del Mezquital provenientes del drenaje debido a que su clasificación por los organismos operadores es confidencial. Estos datos son necesarios para determinar las fuerzas impulsoras de desarrollo del Valle tanto externas como internas. Mucho se habla de la importancia que ha tenido la importación de estas aguas para el desarrollo agrícola de la zona (Jiménez, 2005; Lesser-Carrillo, Lesser-Illades, Arellano-Islas, & González-Posadas, 2011; Velázquez, Martínez, Kohashi, & García, 2002; García-Salazar, 2019; Ponce-Lira, Rodríguez-Martínez, & Sánchez-Herrera, 2020), pero no se ha comprobado por métodos científicos el peso que ha tenido este aspecto en el desarrollo socioeconómico.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es estimar los volúmenes históricos de agua residual y pluvial anuales que han ingresado al Valle del Mezquital por los ríos El Salto y Salado, provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México durante el periodo 1985-2020, y que puedan ser utilizados posteriormente para la determinación de las fuerzas impulsoras del desarrollo en el Valle del Mezquital, y el estudio de escenarios de manejo sustentable del recurso para evitar futuros desastres. Lo anterior se realizó mediante el cálculo de los volúmenes de agua residual vertida al drenaje por la población, industria y servicios, además del agua pluvial y de ríos.







Materiales y métodos

Área de estudio

En la Figura 2 se muestra la ubicación geográfica de toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (color amarillo), su colindancia con el Valle del Mezquital (color naranja), y los cuatro emisores que llevan agua hacia éste, y los ríos El Salto y El Salado.







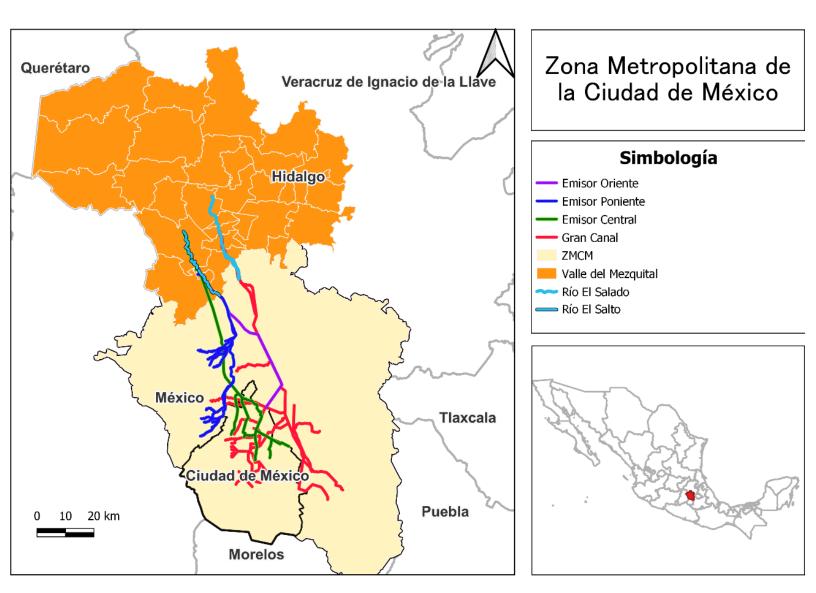


Figura 2. Localización geográfica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su conexión con el Valle del Mezquital. Modificado de INEGI (2020b).

La ZMCM está ubicada en la esquina suroeste de la cuenca del Valle de México, entre los 20° 11´ 20″ y 98° 45´ 29″ de latitud norte y los 99° 30′ 54″ y 19° 30´ 59″ de longitud oeste, a una altitud de 2 240 msnm







(Sosa-Echeverría *et al.*, 2019; Soto-Galera, Mazari-Hiriart, & Bojorquez-Tapia, 2000). Forma parte de una cuenca endorreica y posee una superficie de 9 560 km², en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco.

El área de estudio comprende la parte noroeste de la ZMCM, seleccionada bajo los siguientes criterios: delegaciones y municipios que aportan sus aguas residuales a los tres emisores seleccionados para el estudio: Gran Canal, Emisor Central y Poniente.

Modelo conceptual para la estimación de los volúmenes históricos de agua residual provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El modelo se enfoca en estimar los volúmenes de descargas de agua que ingresan a tres de los emisores que componen el sistema de drenaje y provienen de cinco fuentes: población, industria, servicios, agua pluvial y agua de ríos (Figura 3). Las estimaciones anuales fueron realizadas cada cinco años durante el periodo 1985-2020. Finalmente, los volúmenes calculados se agrupan de acuerdo con el afluente por el cual ingresan al Valle del Mezquital.









Figura 3. Esquema de las entradas de agua residual al sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

La estimación requirió de una serie de premisas, supuestos y datos reales para alimentar al modelo conceptual.







Premisas del modelo conceptual

- El periodo de tiempo considerado en el modelo es de 1985 a 2020. Se eligió 1985 como año de inicio debido a que en 1982 el sistema Cutzamala entró en funcionamiento, dando lugar a las condiciones que prevalecen actualmente en cuanto al agua potable que recibe la población.
- Los cálculos fueron realizados para los años terminados en 5
 y 0 dentro del periodo de estudio.
- Se exceptúa del análisis el Túnel Emisor Oriente debido a que entró en funcionamiento en 2019, lo cual no cumple con los requisitos de tiempo.
- En las delegaciones donde comparten territorio el Túnel Emisor Central y el Gran Canal, se consideró que toda la población vierte sus aguas residuales hacia el Emisor Central debido al amplio sistema de colectores que posee.
- Se consideró que toda la población tiene la misma dotación de agua potable (190 litros/habitante/día), tomando como referencia el consumo estimado por clima predominante proveniente de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Conagua, 2019a). El modelo considera esto constante en el tiempo.
- Se asumió que el 75 % del agua potable suministrada a la población va al drenaje de acuerdo con lo especificado en el Manual de Agua, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2019b).







- Las descargas totales de ríos, lluvia, agua residual poblacional, industrial y de servicios no están separadas dentro del sistema de drenaje.
- Los volúmenes de agua residual de industria y servicios que han ingresado al sistema de drenaje fueron obtenidos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).
- Se consideró que todos los días del año hay descargas industriales y de servicios debido a que en el sistema REPDA no se especifica.
- Se asumió que en aquellos lugares donde no había suficientes datos en los reportes del REPDA se tomaría en cuenta para todos los años el valor más alto reportado para la industria y servicios.
- El cálculo de agua pluvial se realizó con los reportes de estaciones climatológicas que estuvieran dentro de las áreas de escurrimiento, tomando como referencia el trabajo realizado por Saikia, Ryan, Nuyts y Clifford (2022), además de considerar las recomendaciones del "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento" (Conagua, 2007).
- Las áreas de escurrimiento de las zonas se calcularon de los mapas del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) para cada uno de los emisores, teniendo como base el trabajo de Godínez-Brizuela *et al.* (2018).
- El coeficiente de escorrentía urbana para el agua de lluvia
 (0.80) se tomó del "Manual de agua potable y saneamiento" (Conagua,
 2019b).







- Las estaciones hidrométricas solo fueron consideradas para los ríos que vierten sus aguas al Emisor Poniente y el Gran Canal.
- Se asume que toda el agua residual ingresa al Valle del Mezquital a través de los ríos El Salado y El Salto.
- No se contabilizaron los volúmenes de agua provenientes de las presas y vasos reguladores, para no duplicar los volúmenes de agua provenientes de los ríos.
- Los emisores se denominaron mediante las siguientes siglas: Gran Canal (GC), Túnel Emisor Central (TEC) y Túnel Emisor Poniente (TEP).

Bases de datos recabadas para el modelo matemático

Las bases de datos utilizadas fueron recabadas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), principalmente. En la Tabla 1 se muestran las fuentes de información consultadas a detalle.







Tabla 1. Aspectos considerados para bases de datos y fuentes consultadas.

	Aspectos considerados	Fuente	Referencias
Población	Habitantes totales de los municipios y delegaciones que vierten agua residual a los emisores del sistema de drenaje	Censos de población y vivienda Anuarios estadísticos	(INEGI, 1970; INEGI, 1980; INEGI, 1990; INEGI, 1995; INEGI, 2000; INEGI, 2005; INEGI, 2010; INEGI, 2015; INEGI, 2020a)
Industria y servicios	Reportes de descargas industriales y de servicios en los municipios y delegaciones seleccionados	Reportes del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)	(Conagua, 2022)
Agua pluvial	Promedio de precipitación por décadas en mm reportada por las estaciones climatológicas consideradas para cada emisor	Reportes del Servicio Meteorológico Nacional	(Conagua, 2019c; Conagua, 2020a)
	Áreas de escurrimiento en m² para cada emisor	Mapas del Simulador de Flujos de Agua por Cuencas Hidrográficas	(INEGI, 2022b)
Ríos	Caudales históricos de los ríos que forman parte del Túnel Emisor Poniente y Gran Canal	Reportes de estaciones hidrométricas	(Conagua, 2019c)







Estimación de descargas de agua residual de la población a cada emisor

Paso 1. Cálculo de la población que vierte agua a cada emisor

Mediante superposición de mapas en el *software* (QGIS, 2022), se desagregó la población específica que vierte su agua residual a cada emisor. Las cartografías utilizadas fueron el mapa del sistema de drenaje dividido por emisores (Figura 1) y la división municipal de la república mexicana (INEGI, 2020b). El formato de ambos mapas es vectorial, con escala 1:250000. El mapa obtenido se presenta en la Figura 4.







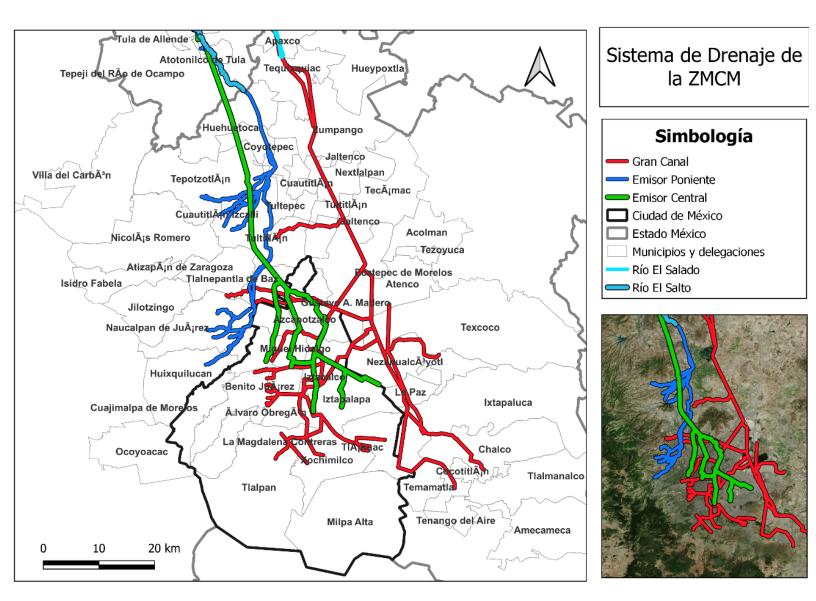


Figura 4. Mapa del recorrido de los emisores a través de los municipios seleccionados de la ZMCM. Modificado de Yannick (2015).

Finalmente, el área de estudio comprende 31 municipios del Estado de México y las 16 delegaciones de la Ciudad de México. Posteriormente, éstos se agruparon de acuerdo con el emisor al que su población le tributa agua, como se observa en la Tabla 2.







Tabla 2. Municipios y delegaciones que vierten agua residual a cada emisor del drenaje profundo.

	Estado d	Ciudad de México	
Gran Canal de Desagüe 19 municipios 7 delegaciones	Apaxco Atenco Atizapán Chalco Chicoloapan Chimalhuacán Ecatepec Ixtapaluca Jaltenco La Paz	Naucalpan Nextlalpan Nezahualcóyotl Tecámac Temamatla Tequixquiac Texcoco Valle de Chalco Zumpango	Álvaro Obregón Benito Juárez Magdalena Contreras Milpa Alta Tláhuac Tlalpan Xochimilco
Túnel Emisor Central 7 municipios 8 delegaciones	Cuautitla Huehu	tepec án Izcalli uetoca zotlán pantla	Azcapotzalco Coyoacán Cuauhtémoc Gustavo A. Madero Iztacalco Iztapalapa Miguel Hidalgo Venustiano Carranza
Túnel Emisor Poniente 5 municipios 1 delegación	Cuautitlán Huixquilucan Naucalpan	Teoloyucan Tultitlán	Cuajimalpa







Paso 2. Cálculo de los volúmenes de agua residual de la población

Para la estimación de descargas poblacionales se consideraron diversos factores que permitieron tener un cálculo más certero y cercano a la realidad, los cuales fueron los siguientes: porcentaje de población con acceso a agua potable y drenaje; consumo promedio de agua potable por habitante al día, y porcentaje de agua que es vertida al drenaje por habitante. Estos datos fueron obtenidos de reportes emitidos por las comisiones de agua del Estado de México y de la Ciudad de México (Conagua, 2000; Conagua, 2005; Conagua, 2010; Conagua, 2015; Conagua, 2020d). Antes del año 2000 no existen reportes del porcentaje de la población que disponía de los servicios de agua y alcantarillado; se utilizaron los datos del 2000 por ser el más cercano. El porcentaje de población de la CDMX recibe aproximadamente un 10 % de mayor cobertura en ambos servicios que la del Estado de México (Jiménez-Ramón, 2018).

Se asumió que el consumo promedio de agua potable es de 190 l hab⁻¹ d⁻¹ en para ambas poblaciones (Conagua, 2019a). Se consideró que el 75 % del consumo de agua potable por habitante termina en el drenaje (Conagua, 2019b).

Teniendo el número de habitantes totales que vierten agua en cada emisor y los porcentajes mencionados, se calcularon los volúmenes en m³ de agua residual que vierte la población mediante las siguientes ecuaciones:







Ecuación (1). Población real que tributa agua al sistema de drenaje:

$$PR = HT * HAP * HAD$$
 (1)

Donde:

PR = población de la ZMCM que vierte agua al sistema de drenaje.

HT = habitantes totales por año establecido

HAP = porcentaje de habientes con acceso a agua potable.

HAD = porcentaje de habitantes con acceso a la red de drenaje

Ecuación (2). Estimación de volúmenes anuales de consumo de agua potable de la población:

$$VRC = (PR * CR * DA)/FC$$
 (2)

Donde:

VRC = volúmenes anuales de consumo de agua potable (m³/año).

CR = dotación de agua a la población (l/hab/d).

PR = población.

DA = días totales en un año.

FC = factor de conversión de litros a metros cúbicos (1000).







Ecuación (3). Volúmenes de agua residual poblacional que ingresan al sistema de drenaje:

$$VRD = VRC * DSD$$
 (3)

Donde:

VRD = volúmenes anuales de agua residual poblacional que ingresan al drenaje ($m^3/a\tilde{n}o$).

VRC = volúmenes anuales de consumo de agua potable (m³/año).

DSC = porcentaje de agua potable que ingresa al drenaje (0.75)

Estimación de volúmenes de agua residual proveniente de descargas industriales y servicios que ingresan a cada emisor del drenaje

Para obtener los volúmenes de descargas provenientes de la industria y los servicios se consultaron los Registros Públicos de Derechos de Agua (REPDA), mediante una búsqueda por tipo de aprovechamiento (descargas residuales) y lugar específico. Las bases de datos recopiladas comenzaron desde 1995 debido a que el registro REPDA comenzó a funcionar en julio de ese año (Conagua, 2020c).

Los reportes se procesaron de acuerdo con las industrias y servicios presentes en los municipios y delegaciones seleccionados que vierten agua a cada emisor. No todos los lugares solicitados poseían información, así que para todos los años se asumió el valor mayor reportado en el







periodo. Para este estudio se seleccionaron solamente los años terminados en 0 y 5 para calcular los volúmenes de vertidos industriales que ingresan a cada drenaje mediante la Ecuación (4):

Ecuación (4). Volúmenes de agua residual industrial y de servicios que ingresan al sistema de drenaje:

$$VDI = VRD * DA$$
 (4)

Donde:

VDI = volúmenes anuales de agua residual industrial y de servicios que ingresan al drenaje $(m^3/a\tilde{n}o)$.

VRD = volúmenes de descarga de la industria y los servicios (m³/día).

DA = días totales de un año.

Estimación del agua pluvial que ingresa a cada emisor del sistema de drenaje

Para el cálculo del volumen de agua de lluvia se utilizaron los datos (mm) promedio anual por década desde 1980 hasta 2020, según los reportes de las estaciones climatológicas situadas en las áreas de estudio.

La selección de las estaciones climatológicas para cada emisor se realizó mediante superposición de mapas en QGIS. Para localización de las estaciones climatológicas de la república mexicana se utilizaron las capas en formato vectorial de Conagua (2020b). Los mapas







correspondientes a las áreas de escurrimiento de cada emisor están en formato KML (Keyhole Markup Language) y son reportadas por INEGI (2022a). En ambos casos, la escala fue de 1:250000.

Se excluyeron las estaciones climatológicas fuera de operación y se seleccionaron aquéllas que poseían mayor representatividad según los polígonos de Thiessen (Mu, 2009; Damant, Austin, Bellon, & Broughton, 1983) (Figura 5). Resultando finalmente 129 estaciones para todo el sistema de drenaje: se consideraron 41 estaciones climatológicas para el Gran Canal; 62 para el Emisor Central, y 26 para el Emisor Poniente.







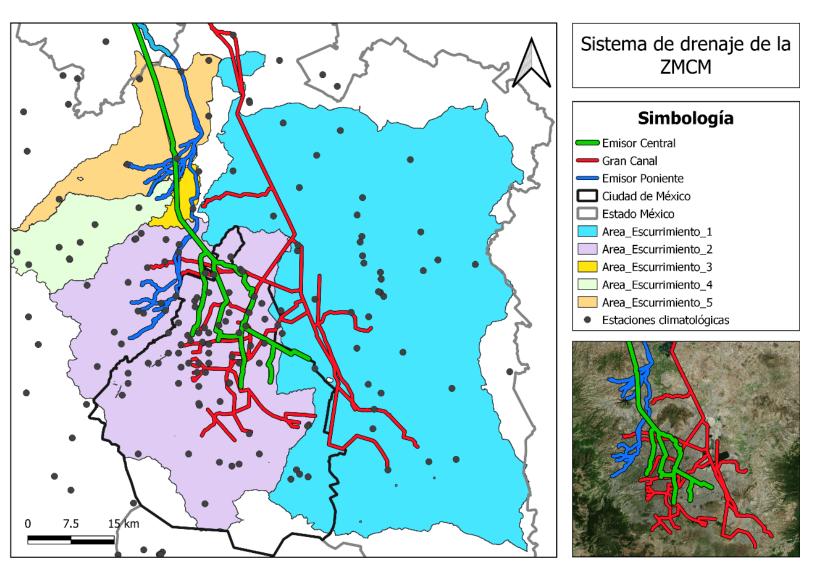


Figura 5. Localización de las estaciones climatológicas y áreas de escurrimiento consideradas para el cálculo de volúmenes de agua pluvial.

Ecuación (5). Volúmenes de agua pluvial que ingresan al sistema de drenaje:







VAP = (PPD * AE)/FC (5)

Donde:

 $VAP = volúmenes anuales de agua pluvial que ingresan al drenaje (<math>m^3$).

PPD = promedio de precipitación (I/m^2) .

 $AE = \text{áreas de escurrimiento } (m^2).$

FC = factor de conversión de litros a metros cúbicos (1000).

Estimación de los volúmenes aportados por los ríos que forman parte del sistema de drenaje

Se consideraron los ríos del poniente de la ciudad que vierten al TEP (Conagua, 2018b) y los que forman parte del cauce del GC. Los volúmenes de los ríos se calcularon mediante la Ecuación (6) con los gastos promedio (m³/s) reportados por las estaciones hidrométricas para cada cinco años.

El GC recibe agua de los siguientes ríos: La Piedad, Churubusco, Los Remedios y San Buenaventura, además de los escurrimientos provenientes de la zona oriente del Estado de México.

Mientras, el TEP está conectado a los siguientes afluentes: El Sordo, Hondo, San Joaquín, Tacubaya, Becerra, Mixcoac, Tarango, Las Flores, Dolores, Colorado, Totolica, Los Arcos, Los Cuartos, La Mina, Tequilasco, Anzaldo, Texcalatlaco, El Capulín, Ruiz Cortines, Pilares, Tecamachalco, El Tornillo y El Periodista.







Ecuación (6). Volúmenes de agua residual de los ríos que forman parte del sistema de drenaje:

$$VAP = CPR * STA$$
 (6)

Donde:

VAR = volúmenes anuales de agua residual de los ríos parte del drenaje $(m^3/a\tilde{n}o)$.

CPR = caudales promedio reportados por las estaciones hidrométricas (m^3/s) .

STA = segundos totales de un año.

Los volúmenes estimados se sumaron al emisor correspondiente por el cual ingresan al Valle del Mezquital. El TEC y TEP mediante el río El Salto y el GC por el río El Salado.

Resultados y discusión

Estimación de los volúmenes del agua residual generada por la población

En la Tabla 3 se muestran los volúmenes de agua residual generados por la población durante el periodo estudiado, desglosados por cada emisor del sistema de drenaje.







Tabla 3. Volúmenes (hm³) de agua residual proveniente de la población que es vertida en cada emisor del sistema de drenaje de la ZMCM.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Gran Canal de desagüe	227.56	268.12	307.95	334.70	354.91	374.97	388.68	415.00
Túnel Emisor Central	286.89	261.36	266.53	266.78	266.89	267.02	268.38	269.00
Túnel Emisor Poniente	67.80	80.10	92.05	99.20	103.68	109.12	114.01	119.00
Total	582.25	609.58	666.53	700.68	725.48	751.11	771.07	803.00

El Gran Canal recibió la mayor cantidad de agua residual de la población (de 227.6 hm³ en 1985 a 415 hm³ en 2020) debido a su amplio recorrido a través de la ZMCM. Se observa que los volúmenes aumentaron notablemente en el tiempo debido al incremento de la población.

A diferencia del Gran Canal, el Emisor Central presenta una leve disminución a través del tiempo en los volúmenes, posiblemente debido a la reducción de la población en las delegaciones que le tributan agua, que fueron las más afectadas por el sismo de 1985. Posterior a ese año se observa una cierta estabilización en todo el periodo (de 261 a 269 hm³).







El Emisor Poniente fue el túnel que transportó la menor cantidad de agua vertida por la población, aunque duplicó el volumen al final del periodo estudiado (de 67.80 hm³ en 1985 a 119 hm³ en 2020).

Las poblaciones que vertieron más agua al sistema de drenaje en todos los años fueron las siguientes: Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Álvaro Obregón y Azcapotzalco. Mientras que los municipios son Nezahualcóyotl, Ecatepec, Tlalnepantla, Naucalpan, Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli y Texcoco.

Estimación de volúmenes de agua residual proveniente de descargas industriales y servicios que ingresan a cada emisor del drenaje

En la Tabla 4 se muestran los volúmenes calculados para cada dren del agua proveniente de la industria y los servicios.

Tabla 4. Volúmenes (hm³) de agua residual proveniente de descargas industriales y servicios que ingresaron al sistema de drenaje de la ZMCM.

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Gran Canal de desagüe	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00
Túnel Emisor Central	28.86	28.91	28.97	29.04	29.08	29.08
Túnel Emisor Poniente	46.19	46.22	46.27	46.31	46.37	46.37
Total	117.05	117.13	117.24	117.35	117.45	117.45







El dren que recibió la mayor cantidad de descargas fue el Emisor Poniente, llevando 46.19 hm³ durante el periodo, seguido del Gran Canal con 42.00 hm³ y finalmente el Emisor Central con 28.86-29.08 hm³.

La capacidad de conducción establecida de los drenes no ha permitido aumentar el volumen de agua residual industrial que ingresa a pesar del gran número de industrias y servicios que posee la zona. En respuesta a este fenómeno, en 2019 se añadió el Túnel Emisor Oriente al sistema de drenaje.

No toda el agua residual generada por las entidades económicas ingresa al sistema de drenaje, y según el sistema REPDA algunas de las industrias poseen plantas de tratamiento de agua residual que la reutiliza y, en otros casos, el agua generada se utiliza para el riego de áreas verdes de las localidades.

Estimación de los volúmenes de agua pluvial que ingresaron al sistema de drenaje de la ZMCM

Los volúmenes calculados de agua pluvial que ingresó a cada dren del sistema de drenaje se presentan en la Tabla 5.







Tabla 5. Volúmenes (hm³) de agua pluvial que ingresaron a cada dren del sistema de drenaje de la ZMCM.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Gran Canal de desagüe	213.55	209.67	216.14	223.72	227.79	232.97	238.14	242.24
Túnel Emisor Central	254.52	258.83	268.04	285.26	286.49	287.72	290.17	296.12
Túnel Emisor Poniente	142.60	144.36	153.17	161.97	163.73	165.49	167.25	171.36
Total	610.67	612.86	637.35	670.95	678.01	686.18	695.56	709.72

Estos volúmenes no dependen de acciones antrópicas, sin embargo se observa que el agua pluvial de los tres drenes aumenta con el tiempo, lo cual demuestra que hay incremento de las precipitaciones en la megaciudad de México, que explica la presencia de inundaciones extremas en la CDMX y en la ciudad de Tula. Este resultado coincide con los modelos reportados por Martínez (2021) para la Ciudad de México durante el periodo estudiado.

El Emisor Central fue el que transportó el mayor volumen de agua pluvial de la ZMCM (de 254.52 hm³ en 1985 a 296.12 hm³ en 2020), a pesar de no poseer una amplia área de escurrimiento como el GC. Este dren transporta la mayor parte del agua pluvial de la CDMX gracias a su sistema de colectores.

El Gran Canal ocupa el segundo lugar en trasladar agua pluvial (de 213.55 hm³ en 1985 a 242.24 hm³ en 2020). La disminución observada en 1995 en el Gran Canal pudo ser consecuencia de la sequía extrema







que enfrentó México en el periodo 1990-1995 (Flores-Cano & Swan, 1995).

Finalmente, el Emisor Poniente recibió las menores cantidades de agua pluvial (de 142.60 hm³ en 1985 a 171.36 hm³ en 2020).

Estimación del agua proveniente de los ríos que forman parte del sistema

Los ríos descargan solo en dos emisores: el Gran Canal y Emisor Poniente. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Volúmenes (hm³) de afluentes que descargan su agua al sistema de drenaje de la ZMCM.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Gran Canal de desagüe	43.88	46.28	60.49	60.25	73.87	76.00	77.52	83.12
Túnel Emisor Poniente	125.67	129.55	132.14	139.72	143.79	148.97	154.14	158.23
Total	169.55	175.83	192.63	199.97	217.66	224.97	231.66	241.35

En coincidencia con lo encontrado anteriormente, también los ríos reciben mayores escurrimientos y lluvia que aumentan sus caudales a lo largo del tiempo (de 169.55 hm³ en 1985 a 241.35 hm³ en 2020). El modelo considera estos volúmenes como importaciones de agua limpia, ya que no son generados por las actividades naturales y antrópicas de la







ciudad. Esta contribución es afectada por los eventos climáticos extremos e influye grandemente en las inundaciones que se observan con frecuencia en zonas más bajas de la CDMX, y de manera reciente en Tula de Allende y otras ciudades del Valle del Mezquital. El Emisor Poniente recibe la mayor cantidad de agua, debido a que está conectado con varios ríos que se describen en la metodología.

Resultados de volúmenes totales de agua residual transportada por cada dren del sistema de drenaje

Finalmente, se sumaron los resultados de los volúmenes calculados para cada dren por tipo de fuente y que forma el agua residual mixta. Estos valores se muestran en la Figura 6.







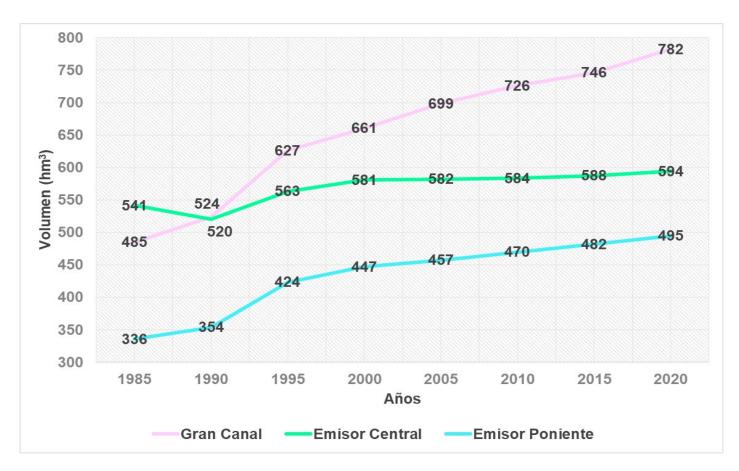


Figura 6. Volúmenes en hm³ de agua residual transportada por cada emisor a través del tiempo.

El Gran Canal resultó tener la mayor capacidad de desalojo en el sistema de drenaje, transportando de 485 hm³ en 1985 a 782 hm³ en 2020, con un aumento notable en el periodo, debido a que se incrementó un 61 %.

El segundo lugar lo ocupa el Emisor Central (de 541 hm³ en 1985 a 594 hm³ en 2020), con un discreto aumento en el periodo. La disminución observada en 1990 fue explicada anteriormente por el sismo de 1985 en







la CDMX. Después de 1995, el dren mostró una discreta estabilización hasta 2020, teniendo un incremento de 9 %.

Finalmente, el Emisor Poniente trasladó la menor cantidad de agua, de 336 hm³ en 1985 a 495 hm³ en 2020, incrementado un 47 %.

Porcentajes de contribución por sector a cada emisor del drenaje

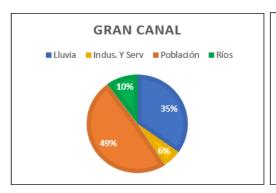
Los porcentajes de aportación de las fuentes para 1995 y 2020 a cada emisor se muestran en la Figura 7.

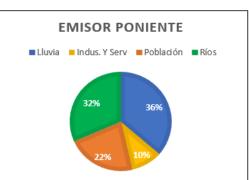


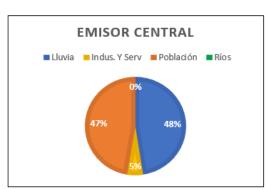




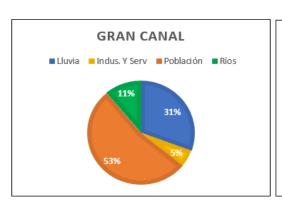
1995







2020





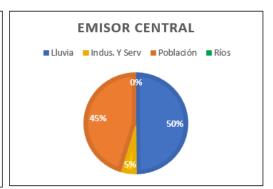


Figura 7. Porcentajes de aportación de las fuentes a cada emisor en 1995 y 2020.

La Figura 7 muestra que la población fue la que aportó la mayor cantidad de agua al GC debido a su largo recorrido al oriente de la ciudad y al hecho de que no comparte áreas urbanas con otros emisores. Por este motivo, también aumentó en el periodo (de 49 a 53 %). Por otra parte, el porcentaje de precipitación mostró una disminución del 35 al 31 %.







En contraste con el GC, la precipitación resultó la principal aportación del TEP, seguida del agua de los ríos, de modo que ambas fuentes aportan cerca del 67 a 68 % del agua total en ambos años. La población aportó solamente del 22 al 24 %.

En el caso del TEC, la lluvia dotó el principal aporte, del 48 al 50 % del agua total, seguida de la población con más del 40 % en ambos años.

En todos los emisores, la industria aporta el menor porcentaje de agua.

La composición porcentual de cada emisor al total del agua del sistema de drenaje se presenta en la Figura 8.

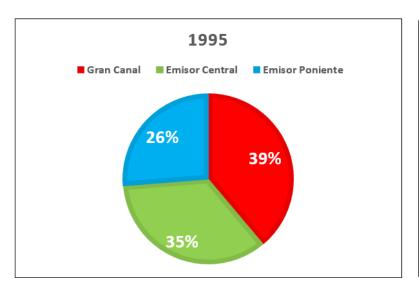




Figura 8. Porcentajes de aportación de agua de cada emisor al sistema de drenaje en 1995 y 2020.







En la Figura 8 se observa que el GC fue el emisor que aportó el mayor porcentaje de agua al sistema de drenaje (de 39 % en 1995 a 42 % en 2020), seguido del TEC (más del 30 %); por último, el Emisor Poniente mantuvo su aportación en 26 %. Estos resultados son congruentes con el gráfico de volúmenes mostrado en la Figura 6.

Volúmenes históricos de agua residual que han ingresado al Valle del Mezquital

Al finalizar el cálculo de volúmenes totales por emisor, éstos se desglosaron de acuerdo con el afluente por el cual ingresan al Valle del Mezquital. El TEC y TEP vierten sus aguas al río El Salto, mientras que el GC a El Salado. En la Tabla 7 se muestran los volúmenes de agua residual ingresados al VM por sus dos principales afluentes.

Tabla 7. Volúmenes históricos en hm³ de agua residual han ingresado al VM provenientes del sistema de drenaje de la ZMCM.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Río El Salto	877	874	987	1028	1040	1054	1069	1089
Río El Salado	485	524	627	661	699	726	746	782
Total	1362	1398	1614	1689	1738	1780	1816	1872







A lo largo del periodo estudiado, el río que recibe siempre la mayor cantidad de agua residual anual es El Salto, que desde el año 2000 sobrepasa los 1000 hm³, cerca de 400 hm³ más que El Salado.

Validación del modelo

El modelo creado calcula los volúmenes de agua residual ingresada a tres drenes del sistema de drenaje de la ZMCM, en lapsos quinquenales para el periodo 1985-2020. Los cálculos para cada dren se hicieron de manera estructurada, lo que permitió que al realizar una comparación contra datos provenientes de una fuente confiable de información (Conagua), el porcentaje de error fuera menor a 2 % a pesar de las limitantes.

La limitante del modelo radica en el cálculo de los volúmenes de agua residual proveniente de la industria y los servicios debido a la ausencia de reportes del REPDA. Por este motivo, se llevaron a cabo interpolaciones para mitigar el efecto.

La Tabla 8 muestra la similitud de los volúmenes calculados en este trabajo con los dos únicos reportes (Conagua, 2009; Conagua, 2013) que aparecen en la literatura para el volumen de agua residual que ha ingresado al VM.

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







Tabla 8. Comparación entre los volúmenes calculados y los reportados (hm³) de agua residual que han ingresado al VM provenientes del sistema de drenaje de la ZMCM.

	Volumen calculado	Volumen reportado	Error (%)	Referencia
Agua total exportada en 2005	1738	1771	1.8	Conagua (2009)
Agua total exportada en 2010	1780	1804	1.3	Conagua (2013)

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo se cumplió, al crear un modelo que permitió obtener los volúmenes históricos de agua residual que han ingresados al VM proveniente del sistema de drenaje de la ZMCM, mediante la estimación del agua ingresada en cada dren. Los datos obtenidos son de libre acceso, permitiendo que todas las personas interesadas puedan consultarlos sin restricciones.

El modelo planteado para la estimación de los volúmenes históricos de agua residual mostró ser confiable, pues las diferencias entre los datos calculados y los reportados son bajas, así como el porcentaje de error.

Los volúmenes estimados para los ríos y el agua pluvial demuestran que las lluvias han aumentado notablemente en el Valle de México y sus alrededores durante el periodo 1985-2020.







El emisor que acarrea la mayor cantidad de agua al sistema de drenaje de la ZMCM es el Gran Canal, aportando aproximadamente el 40 % del agua total ingresada.

Los drenes que transportaron la mayor cantidad de agua al Valle del Mezquital fueron el Emisor Central y el Emisor Poniente, que vierten sus aguas al río El Salto.

Hasta la fecha, los registros históricos del agua residual que han ingresado al Valle del Mezquital desde la ZMCM no están publicados. Los resultados obtenidos son los primeros reportes de volúmenes históricos de agua residual entre los años 1985 y 2020, y pueden ser utilizados por investigadores y tomadores de decisiones para la proyección de escenarios.

Agradecimientos

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada 774058 para sus estudios de Doctorado en Ciencias Ambientales.

Referencias

Benítez, V. (2016). Túnel Emisor Oriente, obra única en su tipo a nivel mundial. *Gaceta Instituto de Ingeniería*, 1(51), 7-8.

Breña-Puyol, A. F., & Naranjo-Pérez de León, M. F. (2018). *Evolución de la hidrología urbana en la Ciudad de México (1325-2018).* XXVIII Congreso Latinomericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.







- Calleja, L. M. (2019). Túnel emisor Poniente II: obra subterránea de vanguardia en México. *Ingeopres: Actualidad Técnica de Ingeniería Civil, Minería, Geología y Medio Ambiente*, 279, 28-33.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2000). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento (Vol. I). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2005). Situación del subsector agua potable alcantarillado y saneamiento (Vol. V). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-demapas
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009). Estadísticas del agua de la Región Hidrológico Administrativa XIII, Aguas del Valle de México (pp. 162). Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-aguade-la-region-hidrologica-administrativa-xiii-aguas-del-valle-demexico
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento (Vol. X). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.







- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2013). Estadísticas del agua de la Región Hidrológico Administrativa XIII. En: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.). Estadísticas del agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (pp. 206). Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-aguade-la-region-hidrologica-administrativa-xiii-aguas-del-valle-demexico
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento. (Vol. XV). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018a). *Monografía del sistema del drenaje del Valle de México*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018b). *Plan Maestro de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019a). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado (Vol. IX). Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Drenaje pluvial urbano* (Vol. XIX). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.







- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019c). Sistema de Información Hidrológica (SIH). Recuperado de https://sih.conagua.gob.mx/
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020a). *Información de Estaciones Climatológicas*. Recuperado de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020b). *Información de estaciones climatológicas* (cartografía). Recuperado de smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020c). *Registro Público de Derechos de Agua*. Recuperado de https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020d). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento (Vol. XX). Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2022). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Recuperado de https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx
- Damant, C., Austin, G. L., Bellon, A., & Broughton, R. S. (1983). Errors in the Thiessen technique for estimating areal rain amounts using weather radar data. *Journal of Hydrology*, 62(1), 81-94. DOI: 10.1016/0022-1694(83)90095-1







- Espinosa-Villareal, O. R.-F., Núñez-Garduño, C., Guasch-Saunders, J. C., Cortez-Pérez, M. A., Pineda-Migueles, R., & Platas-López, F. (2018). El Plan Maestro de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1994-2010. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/plan-maestro-dedrenaje-de-la-zona-metropolitana-de-la-ciudad-de-mexico-155440?idiom=es#:~:text=El%20Plan%20Maestro%20de%20Dre naje,su%20funcionamiento%20y%20su%20prospecci%C3%B3n
- Flores-Cano, E., & Swan, S. (1995). *Breve historia de la sequía en México*.

 Ciudad de México, México. Editorial: Biblioteca Universidad

 Veracruzana.
- Galina-Macías, J. A. (2010). Drenaje profundo en la Ciudad de México. Administración y Tecnología para el Diseño. Anuario 2010, 12, 215-236.
- García-Salazar, M. E. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, 29(54), 2-34. DOI: 10.24836/es.v29i54.741
- Godínez-Brizuela, E., Fonseca-Gasca, A. E., Pérez-Agreda, L. V., Gutiérrez-Flores, I., Mares-Ventura, J., Sánchez-Parra, D. F., Cea-Barcía, G. E., & Delgadillo-Ruiz, E. (2018). *Estimación del escurrimiento superficial utilizando sistemas de información geográfica, caso de estudio: Ciudad de Guanajuato*. Recuperado de http://www.veranos.ugto.mx/wp-content/uploads/2021/08/Taller EladioDelgadilloRuiz.pdf







- González-López, I. (2022). La construcción del sistema hídrico del poniente, proyecto NZT y sus consecuencias para el Valle de México, 1950–1990. *Revista Diacronías*, 15(26), 109-128. Recuperado de https://palabradeclio.com.mx/view/page/diacronias.php
- Hernández-Espinosa, A. K., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D. & Romo-Gómez, C. (2021). El sistema de drenaje de la Ciudad de México. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 24-30. DOI: 10.29057/icbi.v9i17.7146
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1970). *IX Censo General de Población 1970*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1970/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1980). *X Censo General de Población y Vivienda 1980*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1980/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1990). *XI Censo General de Población y Vivienda 1990*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1995). *Conteo de Población y Vivienda 1995*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1995/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/







- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2005). *II Conteo de Población y Vivienda 2005*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2015. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702 825077143.pdf
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463914075.pdf
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). *División política municipal, 1:250000. 2020 (cartografía)*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022a). Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. Recuperado de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022b). Simulador de flujos de agua por cuencas hidrográficas (SIATL). Recuperado de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/







- Izazola, H. (2001). Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. Estudios Demográficos y Urbanos, 16(2), 285–320. DOI: 10.24201/edu.v16i2.1121
- Jiménez, B. (2005). Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: A case study in Mexico. *Irrigation and Drainage*, 54(S1). DOI: 10.1002/ird.183
- Jiménez-Ramón, A. (2018). Infraestructura para el aprovechamiento integral del agua. Abasto, Inundaciones y Reúso del Agua en el Valle de México. Recuperado de https://comisiones.senado.gob.mx/cienciaytecnologia/docs/evento s/310119_3.pdf
- Legorreta, J. (2006). El agua y la Ciudad de México. De Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., & González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 323-336.
- Lesser-Illades, J. M., & Cortés-Pérez, M. Á. (1998). El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(3), 13-18.







- Martínez Pereda, P. (1967). Algunos aspectos del alcantarillado y drenaje en México. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP); 63 (4). Recuperado de https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/12639/v63n4p330.pdf?sequence=1
- Martínez, B. (2021). Cómo ha cambiado la lluvia en México. *Este País* (361). Recuperado de https://estepais.com/impreso/numero-361-junio-de-2021/como-ha-cambiado-la-lluvia-en-mexico/
- Mu, L. (2009). Thiessen polygon. In: Kobayashi, A. (ed.). *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 251-257) (2nd ed.). Oxford, UK: Elsevier.
- Ponce-Lira, B., Serrano-Olvera, M., Rodríguez-Martínez, N., & Sánchez-Herrera, S. G. (2020). Polluted wastewater for irrigation in the Mezquital Valley, Mexico. Water availability and management in Mexico, 215-231.Alemania: Springer.
- QGIS. (2022). *QGIS Geographic Information System (Version 3.24.1)*. Recuperado de http://www.ggis.org
- Ramírez-de-Alba, H. (1995). Primeros usos del concreto en México: primer túnel de Tequixquiac. *CIENCIA Ergo-Sum*, 2(1), 99-103.
- Saikia, S. D., Ryan, P., Nuyts, S., & Clifford, E. (2022). Precipitation, tidal and river level impacts on influent volumes of combined wastewater collection systems: A regional analysis. *Results in Engineering*, 15, 100588. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100588







- Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jimémez, A. L., Torres-Barrera, M. C., Jaimes-Palomera, M., Retama-Hernández, A., Sánchez-Álvarez, P., Granados-Hernández, E., & Bravo-Álvarez, H. (2019). Spatial and temporal variation of acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. *Atmósfera*, 32(1), 15. DOI: 10.20937/atm.2019.32.01.05
- Soto-Galera, E., Mazari-Hiriart, M., & Bojorquez-Tapia, L.A. (2000). Entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. *Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, (43), 60-75.
- Velázquez, M. A. O., Martínez, A., Kohashi, J., & García, N. (2002).
 Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 459-464.
- Yannick (Cartographer). (2015). Red de drenaje zona metropolitana.

 Recuperado de http://132.248.14.102/layers/CapaBase:iii 1 6 red drenajedf