

Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano

• Polioptro F. Martínez-Austria* • Alberto Vargas-Hidalgo •
Universidad de Las Américas Puebla

*Autor para correspondencia

Resumen

Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (julio-agosto, 2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 139-154.

En el futuro, la mayor parte de la población se asentará en grandes ciudades y zonas metropolitanas, en cuencas en las que la presión sobre el recurso hídrico ya es muy grande. Ante esta situación, las empresas operadoras de agua y saneamiento deben realizar un esfuerzo continuo de planeación, que haga eficaz la aplicación de los reducidos recursos naturales y económicos. Sin embargo, la gestión hídrica de los sistemas urbanos está compuesta de muy diversos elementos que interactúan entre sí, que exhiben ciclos de retroalimentación y conductas emergentes, de tal manera que no pueden emplearse modelos simples. En resumen, se trata de sistemas complejos. En estas condiciones, los tomadores de decisiones requieren de métodos y herramientas apropiadas, que les permitan examinar diversas alternativas y sus impactos en el tiempo. El enfoque de sistemas y la modelación dinámica adaptativa son uno de los campos de investigación más activos y prometedores en la gestión de los recursos hídricos. En este trabajo se propone el uso de la modelación dinámica aplicada al abastecimiento de agua a ciudades, se muestra un modelo general, y se hace una aplicación a la ciudad de Puebla y su zona conurbada. Se analizan un escenario tendencial y uno de balance, compuesto de diversas acciones de conservación, captación pluvial y reúso de agua tratada en un horizonte de 15 años, demostrando la posibilidad de conducir al sistema de una situación de déficit a un balance de superávit hídrico, y ejemplificando las ventajas de la modelación dinámica en sistemas hídricos urbanos.

Palabras clave: ciclo urbano del agua, planeación de sistemas hídricos, modelación de sistemas de agua, gestión integral de los recursos hídricos urbanos, dinámica de sistemas, abastecimiento de agua a megaurbes, abastecimiento de agua a Puebla.

Abstract

Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (July-August, 2016). *Adaptive Dynamic Model for Urban Water Management*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(4), 139-154.

In the future, most of the population will settle in large cities and metropolitan areas, in basins where pressure over water resources is already very large. In this situation, the operators of water and sanitation services must make a continuous effort of planning, to reach effective application of the reduced natural and economic resources. However, the urban water systems are composed of many different elements that interact with each other, exhibiting feedback loops and emerging behaviors, so that no simple models could be used. In short, there are complex systems. Under these conditions, decision makers require appropriate methods and tools, such that allow them to examine several alternatives and their impacts in time. The systems approach and adaptive dynamic modeling is one of the most active and promising research fields in water resources management. In this paper the use of dynamic modeling applied to supply water to cities is proposed, a general model is shown and applied to the city of Puebla and its metropolitan area. A trend and a balance scenarios are analyzed, the second composed by a group of conservation, rainwater harvesting and reuse actions over a 15 years horizon, demonstrating the possibility of leading the system from a deficit into a surplus of water, and exemplifying the benefits of dynamic modeling in urban water systems.

Keywords: *Urban water cycle, water systems planning, water systems modeling, integrated urban water management, system dynamics, water supply of mega-cities, water supply of Puebla.*

Introducción

Entre los procesos que presionan con mayor intensidad los recursos hídricos en el mundo destaca el de la urbanización, que aunada al crecimiento de la población, ocasiona desequilibrios en los balances de agua en las cuencas en que se asientan las ciudades, especialmente si estas últimas son de gran tamaño —megaciudades— o se encuentran en zonas de escasez hídrica.

En la figura 1 se muestra la tendencia demográfica del mundo y el proceso de urbanización. La población global, a mediados de siglo, alcanzará los 9 550 millones de habitantes, mientras que la población rural disminuirá de 3 367 millones de habitantes en 2015 a 3 212 a mitad de siglo. Como consecuencia de esta tendencia, la población asentada en ciudades experimentará un crecimiento desproporcionado, pasando de 3 957 millones de habitantes en 2015, a 6 338 en 2050, es decir, un crecimiento de más de 60%. La mayor parte del crecimiento urbano ocurrirá en países en desarrollo.

En México, la situación seguirá la misma tendencia. Para el año 2050 se espera que la población del país alcance los 152.1 millones de habitantes. La población rural decrecerá de 25.99 millones de habitantes en 2015 a 21.27 en 2050, mientras que la población urbana crecerá de 99.245 millones en 2015 a 134.82 en 2050. Esto es, en 35 años, la población urbana en México aumentará 35.57 millones de personas, como se muestra en la figura 2. La mayor parte de esta población se establecerá en las grandes ciudades y zonas metropolitanas, principalmente en la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Puebla, Querétaro, Toluca, La Laguna, Tijuana y en la zona fronteriza de Tamaulipas. En muchas de estas regiones, la presión sobre el recurso hídrico ya es muy grande, existe sobreexplotación, se han realizado grandes trasvases, y en varias de ellas se observan deficiencias en los servicios de agua y saneamiento (Conagua, 2014).

Las empresas de agua y saneamiento en México enfrentan, además de los problemas de orden técnico, muchos otros de tipo organizativo, social y económico. Como resultado,

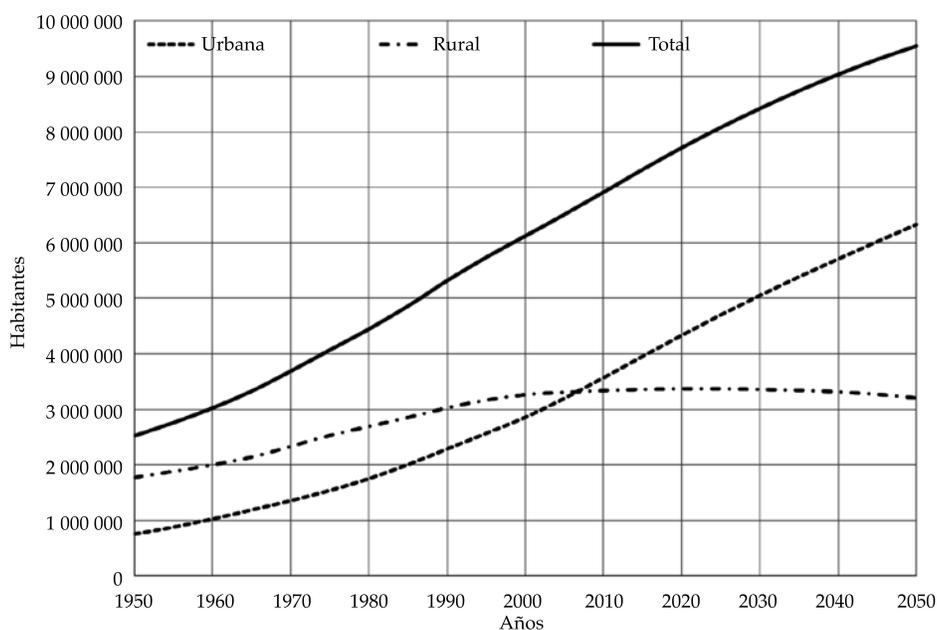


Figura 1. Tendencia de urbanización de la población mundial, población en miles de habitantes (elaboración con datos de (UNPD, 2014).

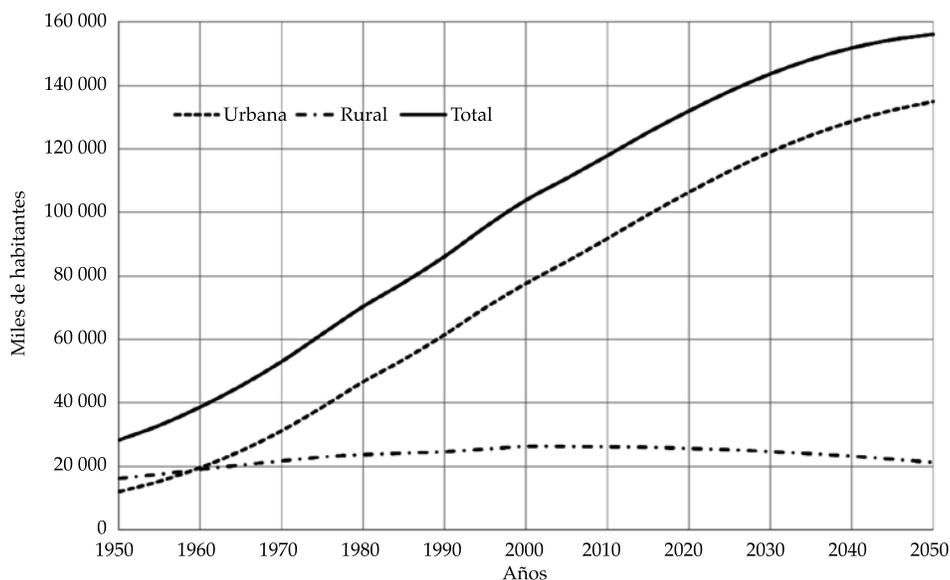


Figura 2. Crecimiento poblacional en México, 1950-2050, en miles de habitantes (elaboración con datos de UNPD, 2014).

su eficiencia global es en promedio menor a 50%, y la eficiencia física de poco más de 60% (IMTA, 2015, con base en una muestra de 120 organismos operadores).

En este panorama actual y futuro, los tomadores de decisiones en la planeación de los servicios de agua en municipios y ciudades requieren de métodos y herramientas que les permitan explorar diversas soluciones y sus impactos en el tiempo.

El enfoque moderno de la gestión del agua se caracteriza por dos conceptos fundamentales: sustentabilidad y gestión integrada. Para lograr la sustentabilidad hídrica, se deben aplicar los principios de gestión integrada.

La definición más usada de gestión integrada la describe como: “un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos hídricos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership, 2000)”.

Esta definición establece implícitamente la noción de un sistema como un concepto central

de gestión hídrica. En efecto, el ciclo urbano del agua exhibe la conducta de un sistema: es adaptativa y dinámica. El sistema de gestión hídrica está compuesto de muy diversos elementos que interactúan entre sí mediante una estructura definida, si bien a veces difícil de identificar, y que tiene funciones específicas; en este caso, proveer de agua y saneamiento. Se trata de un sistema complejo, en el que no puede emplearse el pensamiento lineal causa-efecto, debido básicamente a que existen ciclos de retroalimentación entre la dinámica poblacional y la disponibilidad de agua, para citar sólo uno de ellos.

El enfoque de sistemas y la modelación dinámica aplicada a la gestión del agua es uno de los campos de investigación y desarrollo tecnológico más activos (Giacomoni, Kanta, & Zechman, 2013; Ficot, 2009).

En este trabajo se propone el uso de la modelación de sistemas dinámicos adaptativos para la modelación del ciclo urbano del agua, la simulación del sistema de provisión de servicios de agua y saneamiento, y la toma de decisiones en organismos proveedores de estos servicios.

Modelación dinámica de la gestión del agua urbana

Históricamente, conforme los recursos hídricos se han tornado escasos y crece la competencia entre los diferentes usos, se desarrollan nuevas conexiones sistémicas entre usuarios y diversos componentes del sistema social.

Cuando los recursos son abundantes y los usuarios relativamente pocos, es posible que cada uno de ellos actúe según sus propias necesidades, sin tomar en cuenta a los demás y sin afectarlos mayormente. Los costos de uso del agua son relativamente bajos. Las corrientes superficiales, a las que se acude en esta etapa de bajos costos, con frecuencia son capaces de lograr la autodepuración del agua residual vertida en los cauces. Conforme el número de usuarios crece, el agua se torna escasa y se hace cada vez más difícil, y con frecuencia imposible, la actuación individual, así como evitar la afectación de las necesidades de otros usuarios en cantidad y/o calidad. Surgen interconexiones sistémicas entre usos del agua y usuarios. Las inversiones en infraestructura

de todo tipo se tornan mayores, y no pueden ser hechas por algún usuario o un grupo pequeño de ellos. Aparecen conexiones sistémicas cada vez más complejas. Conforme el agua se torna aún más escasa, usualmente cuando los usos se empiezan a acercar a los límites de disponibilidad natural, las interconexiones entre usuarios del agua alcanzan otros sectores sociales y económicos. Las interconexiones agua-energía-alimentos-derechos humanos se hacen evidentes. En esta etapa, los sistemas hídricos se tornan claramente complejos y en el futuro su complejidad se irá incrementando (Simonovic, 2009).

La ciencia de la complejidad “estudia los fenómenos que emergen de una colección de objetos que interactúan” (Johnson, 2011). Los sistemas complejos exhiben, entre otras, una característica que los hace muy diferentes a otros sistemas, por complicados que sean. Esta propiedad son los comportamientos emergentes: una característica de los sistemas que no puede explicarse por ninguno de sus elementos, y que emerge propiamente con el sistema. En el caso de sistemas hídricos, por ejemplo, se ha

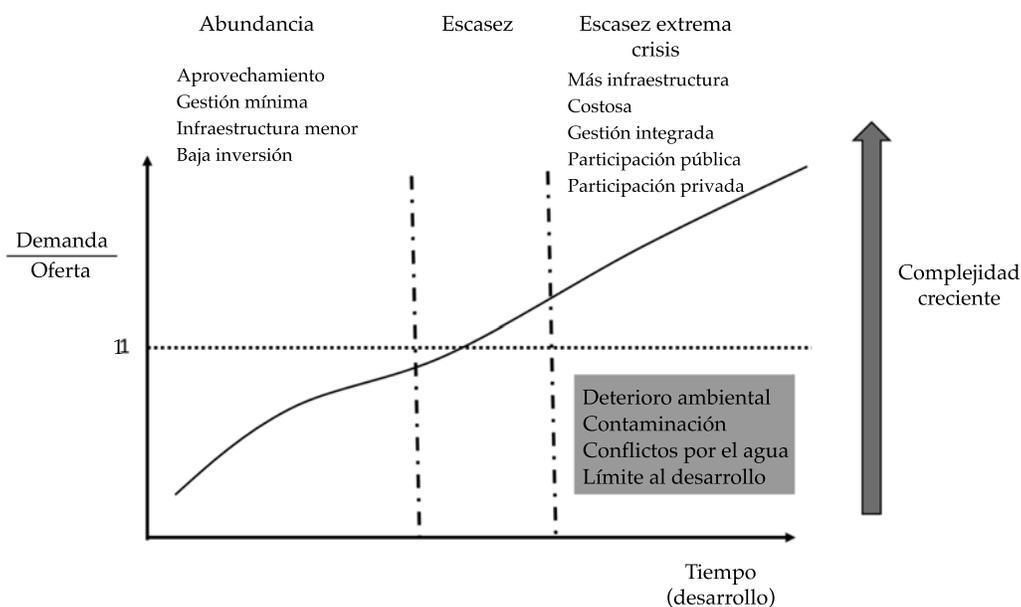


Figura 3. Representación esquemática de la evolución sistémica de la gestión hídrica.

citado el reúso del agua como una propiedad emergente (Ficot, 2009).

Los sistemas complejos están sujetos a una elevada incertidumbre, por lo que una de las técnicas más empleadas para su modelación son los simuladores dinámicos, que permiten estudiar y prever el comportamiento del sistema bajo diversos escenarios. Existen varios programas diseñados en específico para la simulación de sistemas. En este trabajo se usará *Vensim*, uno de los más empleados en modelación de sistemas complejos en general y en recursos hídricos en particular (Goncalves & Giorgetti, 2013; Abadi-Khalegh, Shamsai, & Goharnejad, 2015).

La ecuación de balance del sistema urbano de abastecimiento de agua se puede escribir de la siguiente manera, considerando su naturaleza dinámica:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dF}{dt} - \frac{dU}{dt} - \frac{dP}{dt} + \frac{dR}{dt} \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal de ingreso del sistema (en exceso o déficit).

F = caudal que proporcionan todas las fuentes de abastecimiento.

U = caudal de consumo por todos los usos.

P = caudal que se pierde en el sistema, usualmente por fugas en red y tomas domiciliarias.

R = caudal que se recupera y reingresa al sistema (p. ej., agua tratada y reusada) más caudales extraordinarios de ingreso (p. ej., captación de agua pluvial).

Cada una de estas variables puede descomponerse en sus elementos: las fuentes de abastecimiento pueden subdividirse en superficiales y subterráneas; o los usos en doméstico, de servicios, industrial, etcétera. Así, la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{dQ}{dt} = \int_{i=1}^n \frac{dF_i}{dt} - \int_{i=1}^n \frac{dU_i}{dt} - \int_{i=1}^n \frac{dP_i}{dt} + \int_{i=1}^n \frac{dR_i}{dt} \quad (2)$$

Donde:

F_i = caudal de la i -ésima fuente de abastecimiento.

U_i = caudal del consumo ocasionado por el i -ésimo uso del agua.

P_i = caudal que se pierde en el sistema, en el i -ésimo tipo de pérdida.

R_i = caudal que se recupera y reingresa al sistema en el i -ésimo método o acción de recuperación.

La mayor parte de las i -funciones de las diversas variables no son continuas o no pueden integrarse de manera directa.

En consecuencia, conviene escribir cada uno de los miembros de la ecuación como una sumatoria:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dF_i}{dt} - \sum_{i=1}^n \frac{dU_i}{dt} - \sum_{i=1}^n \frac{dP_i}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{dR_i}{dt} \quad (3)$$

La ecuación (3) no puede integrarse directamente en el tiempo. Es posible, sin embargo, considerar una integración discreta, siempre que los intervalos de integración sean lo suficientemente cercanos. Este tipo de aproximación es común en la simulación de sistemas hidráulicos.

Con lo anterior, la ecuación (3) puede escribirse de la siguiente manera, en los tiempos j y $j + 1$, considerando un intervalo Δt entre ambos suficientemente pequeño:

$$Q^{j+1} = Q^j + \sum_{i=1}^n (F_i^{j+1} - F_i^j) - \sum_{i=1}^n (U_i^{j+1} - U_i^j) - \sum_{i=1}^n (P_i^{j+1} - P_i^j) + \sum_{i=1}^n (R_i^{j+1} - R_i^j) \quad (4)$$

Cada una de las variables en la ecuación (4) deberá ser modelada de manera independiente, dado que cada una está determinada por diversos factores. Por ejemplo, el consumo doméstico dependerá del crecimiento demográfico, mientras que el consumo en riego dependerá sobre todo de la superficie sembrada, los requerimientos de agua de los cultivos y la temperatura ambiente. Los usos del agua urbanos se

deben dividirse en uso doméstico, comercial (o de servicios) e industrial. El primero dependerá de forma sustancial del crecimiento demográfico en la ciudad (por la relación entre nacimientos y defunciones, o por inmigración/emigración), y los otros dos, además de tasas de crecimiento económico diferenciadas (crecimiento en servicios y crecimiento industrial).

Lo que le da una de las características sistémicas al problema modelado es que muchas de estas variables están interrelacionadas (es decir, dependen una de otras). Por ejemplo, el crecimiento económico de la ciudad favorecerá una mayor inmigración y/o disminuirá la emigración, lo que afectará al crecimiento demográfico, que producirá a su vez un mayor consumo doméstico.

El modelo dinámico del sistema puede tomar en cuenta estas características, estableciendo los ciclos de retroalimentación correspondientes y los coeficientes de variación convenientes para cada uso.

En un modelo general de ciclo urbano del agua se deben tomar en cuenta al menos las siguientes variables y relaciones funcionales:

a) Consumos

Consumo doméstico = f (población, tasa de crecimiento poblacional, dotación, pérdidas físicas).

Consumo industrial = f (población industrial, tasa de crecimiento industrial, dotación para uso industrial, pérdidas físicas).

Consumo comercial = f (población comercial, tasa de crecimiento comercial, dotación para uso comercial, pérdidas físicas).

Consumo áreas verdes = f (superficie de áreas verdes, coeficiente riego de jardines, tasa de variación).

Dotación = f (temperatura, población).

b) Aportaciones al sistema

Aportaciones = f (aportaciones agua subterránea, aportaciones agua superficial).

c) Aportaciones extraordinarias

Pluviales = f (pluvial sin recubrimiento, pluvial con recubrimiento).

Pluvial con recubrimiento = f (área de captación cubierta, coeficiente de escurrimiento, precipitación).

Pluvial sin recubrimiento = f (área de captación abierta, coeficiente de escurrimiento, precipitación).

Agua residual tratada = f (aportaciones al sistema, coeficiente de aportación, agua residual tratada).

Por simplicidad no se ha incluido el tiempo en las relaciones funcionales, pero todas las variables dependen de éste.

El modelo, a su vez, permite calcular salidas de diversas variables que describen el estado del sistema en el tiempo. La variable de estado más relevante será el balance de caudal del sistema. Si este balance es negativo, es decir, hay menos oferta que demanda, la dotación real que se puede abastecer será menor que la requerida, y el desbalance acumulado en el tiempo (útil para estimar la sobreexplotación del acuífero) se incrementará.

En la figura 4 se muestra la representación en *Vensim* de un modelo general para la gestión del abastecimiento de agua urbana.

Aplicación a la zona metropolitana de la ciudad de Puebla

La ciudad de Puebla y su zona metropolitana se localizan en el altiplano central de México, en los 19°03' de latitud norte, y 98°12' de longitud oeste, a una altura promedio sobre el nivel del mar de 2 160 m. Se ubica en la Región Hidrológica RH-18, denominada Balsas. La red hidrográfica de la zona en estudio está conformada por los ríos Atoyac, San Francisco y Alseseca, y los arroyos El Zapatero y El Rabanillo. Las aguas de todos estos escurrimientos se concentran en la presa Manuel Ávila Camacho, construida en 1946, con un espejo de agua de unas 200 hectáreas, de la

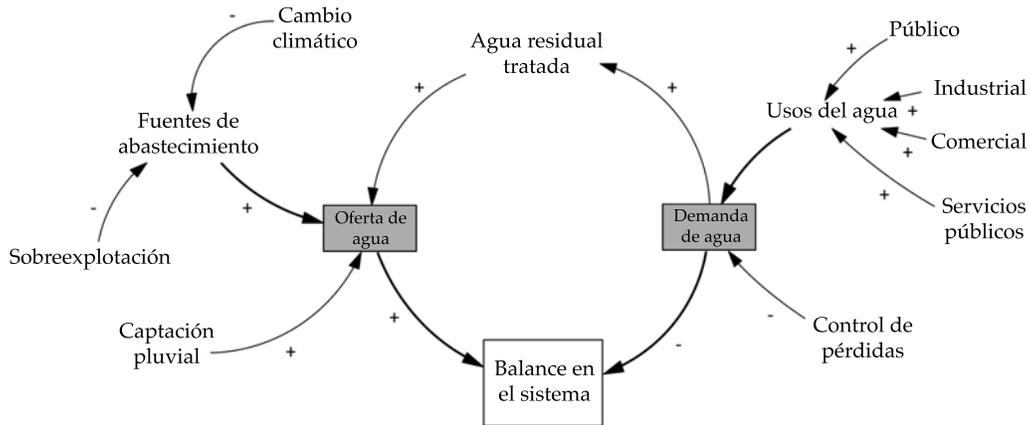


Figura 4. Representación en *Vensim* de un modelo general de abastecimiento de agua urbano.

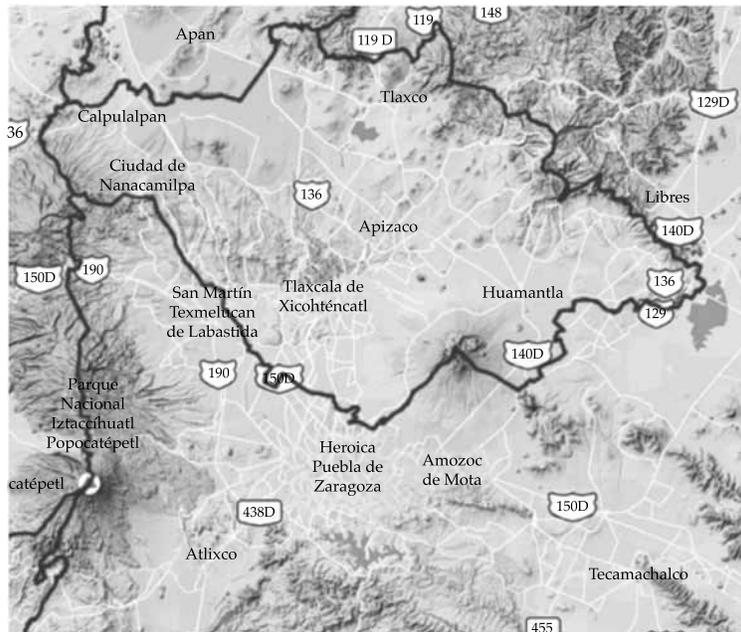


Figura 5. Ubicación de la zona metropolitana de la ciudad de Puebla.
Fuente: http://www.coteigep.puebla.gob.mx/mapa_interactivo.php.

que se extrae un volumen de agua para riego de más de 33 mil hectáreas del distrito de riego 30 Valsequillo en Tecamachalco y para riego de parcelas en Atlixco. El principal acuífero de la región es el denominado Valle de Puebla y registra

disminución de los niveles freáticos debido a la sobreexplotación (Conagua, 2012).

La zona de estudio está circundada por elevaciones como La Malinche, con 4 420 msnm; el Nahuachi, con 2 500 msnm; el cerro de San Pedro,

con 2 420 msnm, y el cerro Tepozuchitl, con 2 300 msnm. Al norponiente se localizan elevaciones del eje neovolcánico, como el Popocatepetl, con 5 500 msnm y el Iztaccíhuatl con 5 210 msnm.

La zona de estudio presenta un clima templado con lluvias en verano, con una temperatura promedio anual de 12 a 14 °C. La precipitación pluvial media es de 840 mm anuales.

Debido a su escurrimiento escaso, pero sobre todo a la contaminación de las aguas de los cauces que la rodean, las fuentes de abastecimiento de la zona urbana de Puebla son subterráneas.

El acuífero del Valle de Puebla constituye la principal fuente de abastecimiento para la zona metropolitana de la ciudad. El Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, hoy Aguas de Puebla (AP), está integrado por tres subsistemas: el subsistema de agua potable, el de alcantarillado sanitario y pluvial, y el subsistema de saneamiento; cuenta con una planta potabilizadora; dos plantas ablandadoras, y cuatro plantas de tratamiento de agua residual.

El sistema opera 190 pozos profundos de los cuales se extraen 3.672 l/s. Presta servicio a 1 842 000 habitantes de 968 colonias, a través 169 tanques de almacenamiento. La extensión de la red de agua potable es de 3 360 km.

El sistema brinda servicio doméstico, público urbano, comercial e industrial. El componente esencial del sistema es el flujo del recurso agua, por lo que el desarrollo del modelo del sistema debe iniciar con la modelación del ciclo urbano del agua, como dimensión nuclear del sistema integrado físico-económico-social.

En la figura 6 se presenta el modelo dinámico elaborado en el simulador *Vensim* para la ciudad de Puebla y zona conurbada abastecida por el organismo operador.

En el cuadro 1 se muestran los datos introducidos al modelo, así como la fuente de información de la cual fueron obtenidos.

El modelo permite hacer simulaciones de diferentes escenarios y pronosticar los resultados en el futuro.

Escenario tendencial

El primer escenario a considerar es el que resulta de no tomar acciones y continuar con las condiciones actuales en las que opera el sistema; es decir, se hace extracción de agua subterránea sin inyección artificial al acuífero, nuevas fuentes locales o trasvases; no hay disminución de fugas en la red, no hay reúso de agua tratada, y

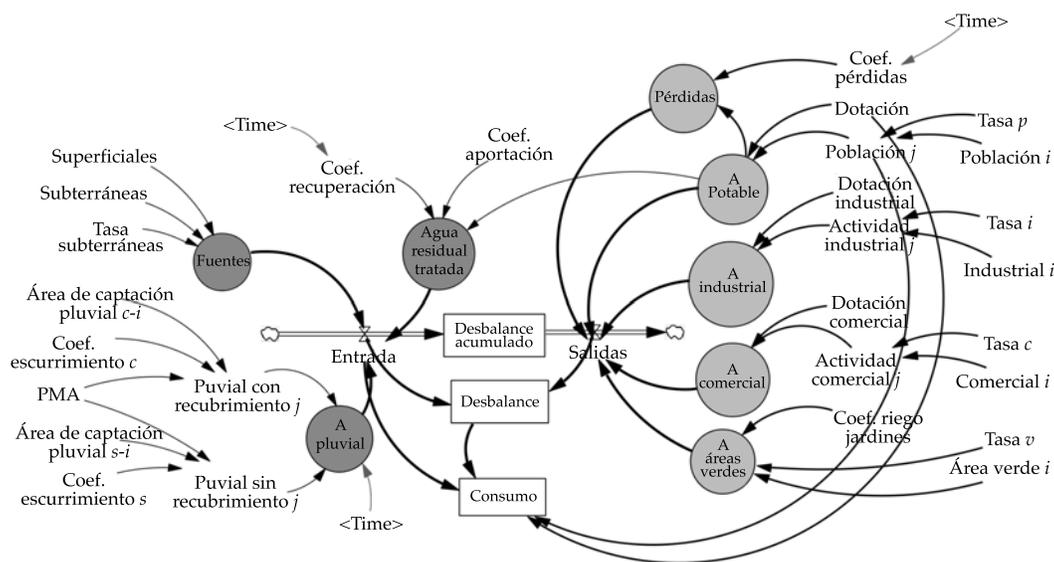


Figura 6. Modelo dinámico de simulación del abastecimiento de agua de Puebla, desarrollado en *Vensim*.

Cuadro 1. Datos para el modelo de simulación del sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Puebla, y fuentes de información consultadas.

| Variable | Unidades | Descripción y fuente de información | Valor en el modelo |
|--|---------------------|--|--------------------|
| Coefficiente de pérdidas | Adimensional | SOAPAP en 2011 reporta el coeficiente de pérdidas y fugas de agua del sistema en 37.38%, Conagua estima este valor entre 40 y 60% (MAPAS-2000) | 37.38% |
| Dotación | l/hab/d | Dotación proporcionada actualmente de 184.62 l/h/d, estimada a partir de datos del SOAPAP, 2015 | 184.62 |
| Tasa p (tasa de crecimiento poblacional) | Adimensional | INEGI considera 0.33% como velocidad de crecimiento para la ciudad de Puebla para el periodo 2015-2030 | 0.33% |
| Población i | Habitantes | Población atendida por el SOAPAP en 2015 | 1 841 500 |
| Población j | Habitantes | Población de proyecto, en habitantes | |
| Tasa i (tasa de crecimiento industrial) | Adimensional | Valor estimado de 4% obtenido de los datos económicos del estado de Puebla | 4% |
| Industrial i | Adimensional | Valor inicial de industrias. Dato tomado del "Diagnóstico respecto de la contaminación por descargas al Atoyac". Semarnat-Conagua, marzo de 2011 | 307 |
| Actividad industrial j | Adimensional | Industrias de proyecto, en número | |
| Tasa c (tasa de crecimiento comercial) | Adimensional | Valor estimado a partir de los datos económicos del estado de Puebla | 4% |
| Comercial i | Adimensional | Número inicial de establecimientos comerciales Valor estimado por comparación a partir de los datos de organismos operadores de la zona | 13 312 |
| Actividad comercial j | Adimensional | Usuarios comerciales de proyecto, en número | |
| Tasa v (tasa de crecimiento de áreas verdes) | Adimensional | Valor estimado del Plan Municipal de Desarrollo, 2002-2005 | 0.1% |
| Área verde i | ha | Hectáreas de áreas verdes que se riegan con pozos que se encuentran dentro del área de la ciudad de Puebla. Valor estimado considerando los principales parques que se localizan dentro de la mancha urbana de la ciudad de Puebla | 806 |
| Coefficiente de riego en jardines | l/m ² /d | Consumo de agua para riego de jardines. <i>Manual de ingeniería sanitaria</i> , CECOSA, 1995 | 3 |
| Coefficiente de aportación | Adimensional | Porcentaje de agua potable que se convierte en agua residual. Valor de 80% para zonas urbanas, (MAPAS-CNA-2000) | 80 |
| Coefficiente de recuperación | Adimensional | Porcentaje de agua residual que se recupera para reúso Actualmente no se recupera agua tratada para reúso, por lo que el valor inicial es cero. Los países desarrollados recuperan entre el 70 y 90% de agua tratada para reúso | 50 |
| Superficiales | m ³ /s | Fuentes de abastecimiento superficiales en m ³ /s Valor cero por no contar con este tipo de fuente en la ciudad de Puebla | 0 |
| Subterráneas | m ³ /s | Volumen de las fuentes de abastecimiento: 3.65 m ³ /s. Fuente: SOAPAP, 2015 | 3.65 |
| Tasa subterránea | Adimensional | Tasa de decrecimiento de las fuentes. DOF Disponibilidad media anual de las aguas subterráneas | 0.7 |
| Área de captación pluvial $c-i$ (de áreas cubiertas) | ha | Área de captación pluvial en zonas cubiertas no pavimentadas. Se midió el área correspondiente al área actual (2015) de los estacionamientos seleccionados en la mancha urbana | 73.5 |
| Coefficiente de escurrimiento c | Adimensional | Coefficiente de escurrimiento para una superficie con recubrimiento, obtenido de la NOM-011-CNA | 0.169 |
| PMA | mm | Precipitación media anual. Se tomaron datos de estación representativa; en este caso, estación 21034, Echeverría, Puebla | 913.8 |
| Área de captación pluvial $s-i$ (de áreas no cubiertas) | ha | Área de captación pluvial en parques, jardines y en general áreas con cubierta vegetal. Se midió área actual (2015) de parques seleccionados en la mancha urbana | 806 |
| Coefficiente de escurrimiento s | Adimensional | Coefficiente de escurrimiento para una superficie con cubierta vegetal obtenido de la NOM-011-CNA-2000 | 0.116 |

no hay captación de agua de lluvia. Sin embargo, el sistema, por su naturaleza, no permanece estático, fundamentalmente por el crecimiento urbano.

En el periodo de tiempo a simular, que culmina en el año 2030, la población de 1 842 000 habitantes en el año 2015 pasará —conforme a

los resultados del modelo y con la tasa de crecimiento poblacional estimada por INEGI— a 1 930 000 habitantes en 2030. No obstante, debido al abatimiento de los pozos de que se abastece el sistema —y siempre considerando el escenario de inacción— reduciría su caudal de 3.65 m³/s en 2015 a 3.267 m³/s en 2030. Ambas

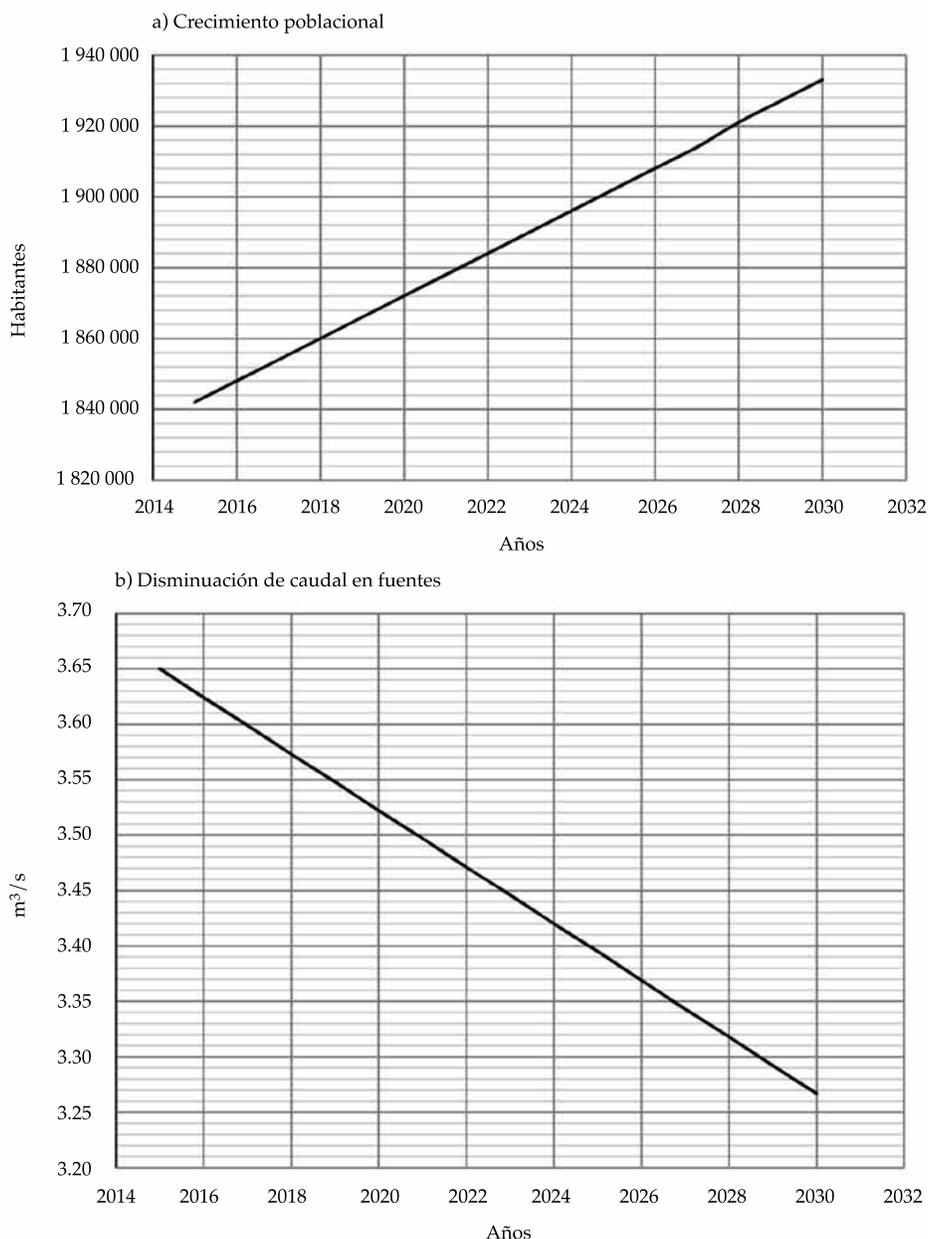


Figura 7. Variaciones de población y disponibilidad de las fuentes en el periodo de análisis.

tendencias quedan representadas en el simulador, como se muestra en la figura 7.

La variable de estado a considerar como salida del sistema para este análisis es la dotación real (o consumo real) que se puede abastecer en el sistema.

De acuerdo con los resultados del modelo de simulación, en las condiciones indicadas, el consumo real per cápita de agua, que en 2015 fue de 171.3 l/hab/d, disminuiría a 146 l/hab/d en 2030, como se muestra en la figura 8, una salida directa del modelo en *Vensim*.

Si se considera que el consumo per cápita para una clase socioeconómica media con un clima templado debe ser de 195 l/hab/d de acuerdo con la normativa federal (Conagua, 1994, *Datos básicos*, p. 52.), la dotación en 2030 estará 25% por debajo de lo considerado por esta normatividad.

Bajo estas circunstancias se encontró que en la actualidad hay un déficit de abasto de agua respecto del óptimo recomendado (Conagua, 1994) de $-1.855 \text{ m}^3/\text{s}$. En el futuro, por el

crecimiento poblacional, industrial, comercial y de servicios que presenta la ciudad, la situación se agravará, agudizándose aún más por el abatimiento constante del caudal de los pozos, de tal manera que al año 2030, el déficit sería de $-2.564 \text{ m}^3/\text{s}$, impactando en la salud de la población, y en el desarrollo económico y social de la zona metropolitana.

Por fortuna, este escenario es improbable, dado que el sistema adoptará medidas correctivas que mejoren el balance hídrico. La naturaleza y prioridad de estas medidas, y la valoración de sus efectos son preguntas que pueden responderse con el modelo dinámico de simulación.

Escenario de balance

Utilizando el modelo en un primer ejercicio de planeación, se podría considerar conveniente iniciar de inmediato, en el mismo año (2015) las acciones de reutilización del agua residual tratada, disminuir las pérdidas físicas y captar agua

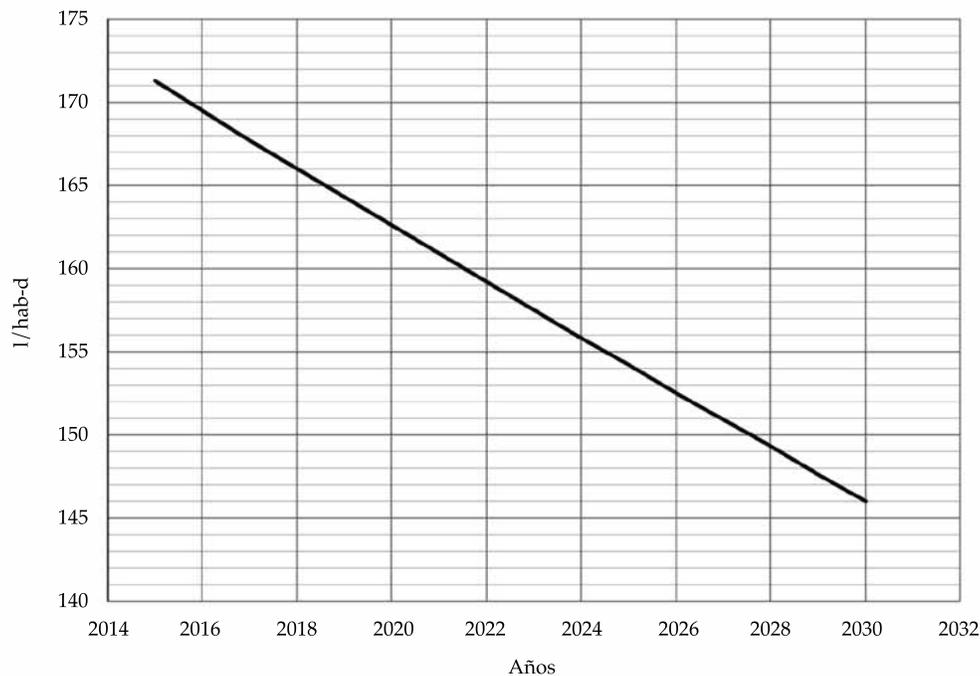


Figura 8. Variación del consumo real en la ciudad en el escenario de no acción.

pluvial. Sin embargo, en la práctica se requiere de tiempo para la elaboración de proyectos ejecutivos, y obtener los recursos económicos necesarios, que en muchas ocasiones se entregan por ministraciones anuales, lo que orienta a hacer una programación de acciones anuales en diferentes etapas, buscando que se ejecuten en el menor tiempo posible, para evitar deterioro a la salud de la población y no frenar el desarrollo económico de la ciudad.

En el modelo dinámico se simularon diversas combinaciones de acciones hasta lograr un escenario realista, y que produjera un balance entre disponibilidad y demandas de agua de la ciudad.

Si se consideran los tiempos de elaboración de los proyectos, obtención de los recursos económicos y el tiempo de ejecución para cada acción, se puede construir un escenario realista y de balance. Una programación de acciones, con sus metas, será la que a continuación se presenta.

En 2017 se ejecutan diversas acciones de control de fugas, que se irán reduciendo con rapidez hasta el año 2022 y luego de forma

paulatina hasta alcanzar su mínimo en 2025. En los sistemas de países desarrollados, el porcentaje de fugas en sistemas de abastecimiento de agua es de entre 8 y 10%. Con esta estrategia, las pérdidas o fugas se reducirán de 1.49 en 2015 a 0.5 m³/s en 2030, como se muestra en la figura 9.

Otra de las estrategias a considerar es el reúso de agua tratada. Se propone que en 2017 inicie un programa de reúso y que se alcance una reutilización de 50% del agua residual tratada en 2022. Las plantas de tratamiento en la ciudad de Puebla fueron diseñadas para operar con un tratamiento primario avanzado, que reduce la carga contaminante a los límites fijados por la NOM-SEMARNAT-002-1996 (Semarnat, 1996). No obstante, para reutilizar el agua tratada en otros usos, el proceso de tratamiento tendrá que mejorarse. Por el costo financiero de recuperar el agua residual tratada se considera en una primera etapa tratar hasta 50% del volumen que actualmente descargan las plantas de tratamiento, como se muestra en la figura 10. Con esta estrategia, el volumen tratado y reusado pasaría de 0 en 2015 a 1.7 m³/s en 2030.

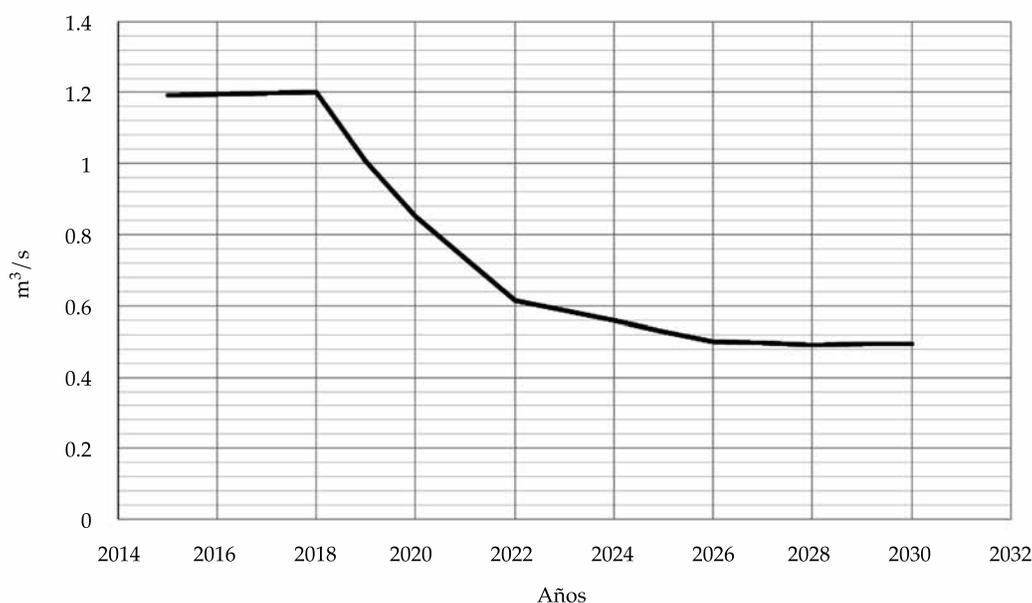


Figura 9. Comportamiento de pérdidas físicas, incluida disminución programada de pérdidas de agua en el sistema.

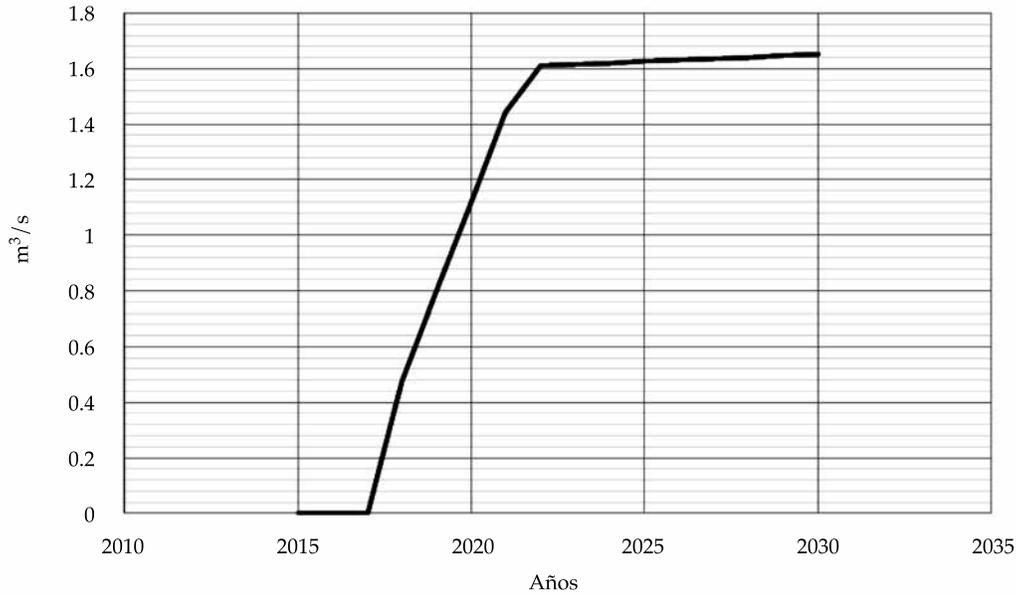


Figura 10. Estrategia de reúso de agua tratada.

Se analizaron las superficies disponibles en la zona para la captación de aguas pluviales, para después ser conducidas a su tratamiento y uso en el sistema. Como resultado de este análisis, se considera como factible una superficie de 73.57 hectáreas de áreas cubiertas en edificios y estacionamientos, y 806.08 hectáreas de áreas verdes, ubicadas en diversos parques y jardines de la ciudad. La estrategia consiste en emplear estos recursos hídricos con posterioridad al reúso de agua tratada y la recuperación de pérdidas. Así, en 2019 se ingresará al sistema el agua pluvial captada en 62% de las áreas seleccionadas, dejando para una segunda etapa la captación de 38% del área restante. Como resultado, el agua pluvial captada pasaría de 0 en 2015 a 0.01925 m³/s en 2019.

La suma de estas tres estrategias compone el “escenario de balance del sistema” al 2030, y la representación gráfica de la correspondiente simulación en *Vensim* se muestra en la figura 12.

Una vez hecha la simulación, se obtiene como resultado que en 2021 se lograría, a pesar del incremento poblacional, que el sistema alcance el balance, y hacia 2030, el balance sería

ligeramente positivo, con lo que se revierte el déficit actual y se cubre de manera satisfactoria el crecimiento en la demanda.

El resultado, que se presenta en la figura 13, muestra que el comportamiento del desbalance considerando las tres estrategias pasó de ser negativo (-1.855 m³/s) en 2015 a ligeramente positivo (+0.155 m³/s) en 2030.

La estrategia combina una disminución de la demanda, por la vía de bajar las pérdidas físicas que se registran en el sistema, con un incremento en la oferta, por medio del reúso del agua residual tratada, lo que no compromete más las fuentes naturales. Las estrategias que mejores resultados producen son entonces reducción de pérdidas y reúso del agua. La estrategia de aprovechamiento de aguas pluviales, por la superficie disponible de captación y el régimen de lluvias de la ciudad, tiene un aporte marginal al balance.

En un plazo mayor, las medidas del escenario serían probablemente insuficientes. Sin embargo, con estrategias factibles, que se pueden implementar en los primeros años de la simulación, se logra un balance que, mientras tanto, permitirá

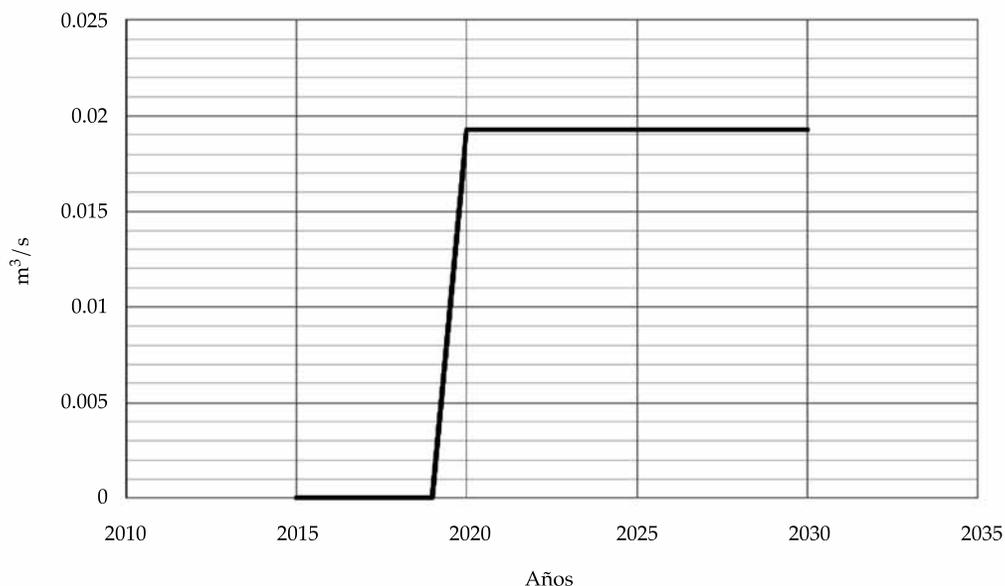


Figura 11. Estrategia de captación de agua pluvial.

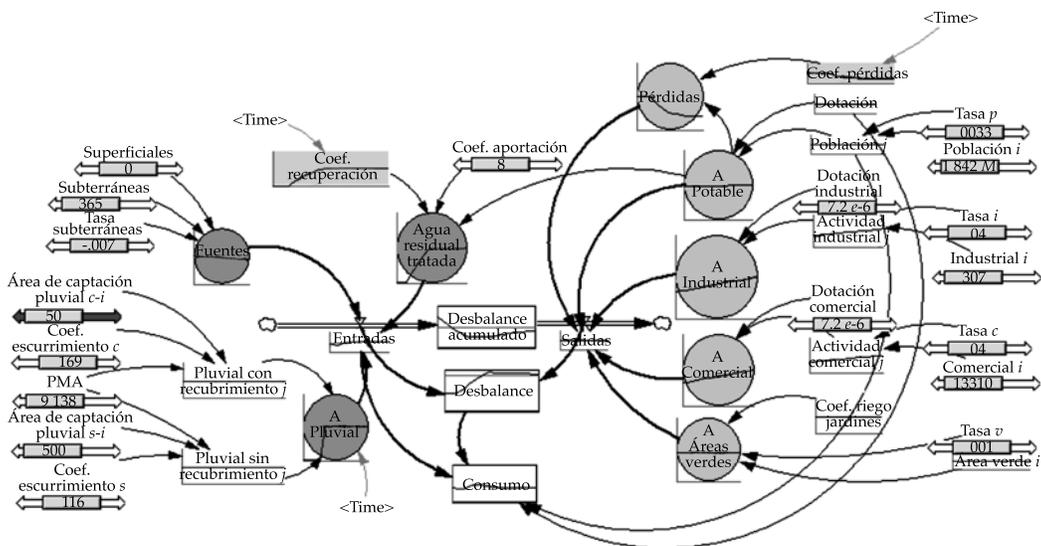


Figura 12. Representación en *Vensim* de la simulación del “escenario de balance” del sistema de abastecimiento de agua de Puebla.

el estudio e implementación de otras medidas más costosas y de implementación social más difícil, tales como la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento o acciones de recuperación

en la cuenca. Estas medidas requerirían de un mayor financiamiento, que mientras tanto puede obtenerse con base en proyectos sólidos y una mejor situación financiera del sistema.

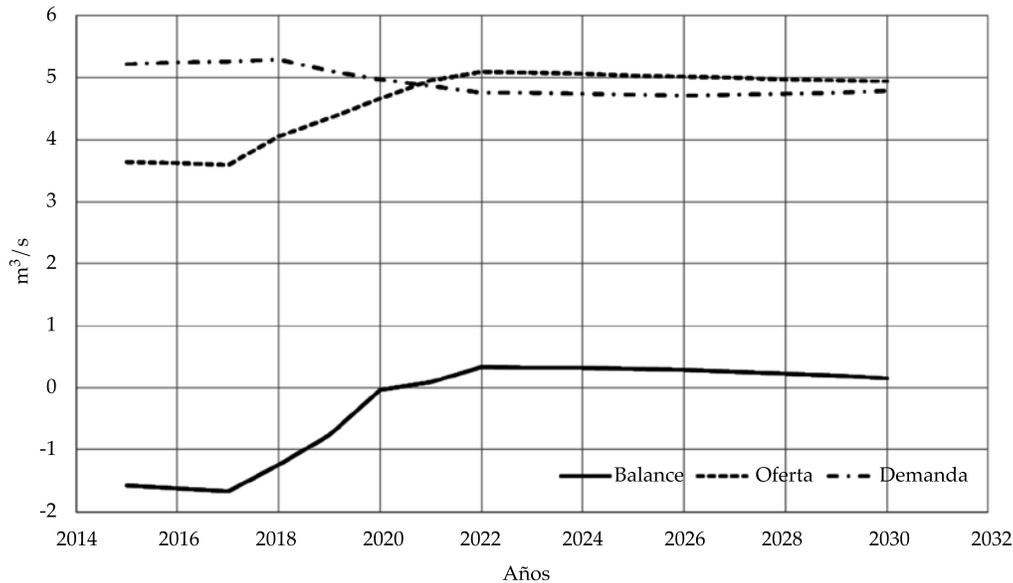


Figura 13. Evolución del balance hídrico en el sistema, en el “escenario de balance”. Se observan los incrementos en el balance conforme se incorporan las diversas estrategias.

Conclusiones y recomendaciones

Los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento son sistemas complejos, es decir, que están compuestos de múltiples variables interconectadas mediante una estructura subyacente, y que exhiben retroalimentación y conductas emergentes. En consecuencia, para resolver la problemática que su naturaleza dinámica les impone, deben usarse técnicas de modelación que representen de modo adecuado al sistema y su cambio en el tiempo, bajo diferentes escenarios de variación natural y estrategias de intervención.

La modelación de sistemas dinámicos adaptativos es una metodología útil para la creación de modelos de simulación que permitan el diseño de escenarios, compuestos por diversas estrategias, y la valoración de sus resultados en el sistema. En última instancia, se muestra como una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones del sistema.

En este texto, las ventajas de la modelación dinámica de sistemas se aplicaron al caso de la

ciudad de Puebla y área conurbada, que atiende el Sistema de Aguas de la ciudad. Se analizó el posible efecto del escenario tendencial, y se diseñó y probó un escenario de balance, compuesto por un conjunto de estrategias, que demostró la posibilidad de revertir la condición actual de déficit y de conducir al sistema a un balance. El periodo de análisis termina en 2030.

Referencias

- Abadi-Khalegh, L. S., Shamsai, A., & Goharnejad, H. (2015). An analysis of the sustainability of basin resources using Vensim model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1941-1949.
- Conagua (1994). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, DF: Subdirección General Técnica, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2014). *Atlas del agua en México 2014*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Ficot, D. (2009). *Complexity Theory and Emergence of Water Recycling*. MSc Dissertation. MSc Thesis. London: UCL-Department of Civil, Environmental and Geomatic

- Engineering, University College London, University of London.
- Giacomoni, M. H., Kanta, L., & Zechman, E. M. (2013). Complex Adaptive Systems Approach to Simulate the Sustainability of Water Resources and Urbanization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(5), 554-564.
- Global Water Partnership (2000). *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee. Background Paper No. 4. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership.
- Goncalves, J. C., & Giorgetti, M. F. (2013). Mathematical Model for the Simulation of Water Quality in Rivers using the Vesnim PLE Software. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(1), 48-63.
- IMTA (2015). *Resumen 2014 de indicadores de gestión de organismos operadores*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de <http://www.pigoo.gob.mx/>.
- Johnson, N. (2011). *Simply Complexity. A Clear Guide to Complexity Theory*. Kindle ebook edition. Paperback, first edition 2009. Oxford, England: Oneworld Publications.
- Semarnat (1996). *NOM-002-SEMARNAT-1996*. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales>.
- Simonovic, S. P. (2009). *Managing Water Resources. Methods and Tools for a System Approach*. Paris: Earthscan and UNESCO.
- UNPD (2014). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Dirección institucional de los autores

Dr. Polioptro F. Martínez-Austria
Dr. Alberto Vargas-Hidalgo

Universidad de Las Américas Puebla
Sta. Catarina Mártir
72810 Cholula, Puebla, México
Teléfono: +52 (222) 229 20 00, extensión 2217
polioptro.martinez@udlap.mx
alberto.vargasho@udlap.mx