

ESCENARIOS PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL ACUIFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO

STAGES FOR SUSTAINABLE USES OF THE QUERETARO VALLEY AQUIFER

Natalio Gutiérrez-Carrillo¹, Enrique Palacios-Vélez², Salvador Peña-Díaz² y Oscar L. Palacios-Vélez²

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. Tel. 01(595) 954-3222. ²Especialidad de Hidrociencias. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. Tel. 01(595) 951-0170.

RESUMEN

En la mayor parte de México son importantes las fuentes de agua subterránea y, en muchos casos, son la única forma de abastecimiento de agua. Uno de los problemas más importantes del manejo de aguas subterráneas es la sobreexplotación de los acuíferos. En este trabajo se presenta un análisis del impacto económico derivado de la sobreexplotación del acuífero del Estado de Querétaro, México, y se muestran algunas posibles soluciones. Mediante la predicción del comportamiento de dicho acuífero con el programa VisualModflow v. 2.61, se evaluaron tres posibilidades de manejo: A) Tendencia actual de explotación, C) Tendencia a estabilizar el acuífero y B) Tendencia intermedia entre A y C. Se estimaron los costos de bombeo mediante modelos empíricos en los diferentes sectores (en pesos de 1996) y, según los tres escenarios en el periodo 1995 a 2010, a partir de los niveles estáticos, y considerando las variaciones de los costos de inversión, operación y mantenimiento. Según los resultados, de continuar la tendencia actual de explotación, en el periodo 2005 a 2010 el abatimiento promedio de los niveles estáticos en el Valle de Querétaro alcanzará los 8 m año⁻¹ y la profundidad promedio al nivel estático será del orden de 175 m; mientras que para el escenario C sólo sería de 2.2 m año⁻¹, con una profundidad promedio del nivel estático de 122 m. Para los escenarios A y B, a partir de 2000, los cultivos cuya productividad del agua sea inferior a \$0.4 m⁻³, tenderán a desaparecer del patrón de cultivos debido a su poca rentabilidad. De continuar la tendencia actual de explotación del acuífero, los costos de bombeo para servicio público en el año 2010 serán \$1.1 m⁻³ para el escenario A, \$0.95 m⁻³ para el escenario B y \$0.80 m⁻³ para el escenario C; esto es, 27% menos que para el escenario A. Por lo anterior no es conveniente continuar con el régimen de explotación actual. Se recomienda el manejo del acuífero presentado en el escenario C, que requiere la reducción de los volúmenes de extracción, principalmente en el sector agrícola, y hacer más eficiente el manejo del agua para los otros sectores.

Palabras clave: Costos de bombeo, modelación de acuífero.

Recibido: Agosto, 1999. Aprobado: Noviembre, 2001.
Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 36: 1-10. 2002.

ABSTRACT

In a large part of México groundwater is of considerable importance and in many cases the only source of water supply. One of the most important problems in groundwater management in México is the overexploitation of aquifers. In this paper, an analysis of the economic impact derived of the overexploitation of the aquifer of the State of Querétaro and some possible solutions are presented. The behavior of this aquifer was predicted using the software Visual Modflow v. 2.61, evaluating three different possibilities of groundwater management: A) Maintaining the current tendency of exploitation, C) Changing the tendency with the aim of stabilizing the aquifer, and B) An intermediate tendency between A and C. Pumping costs were calculated by means of empiric models (at constant value in pesos of 1996) in the different sectors of water users, and according to the different scenarios from 1995 to 2010, starting from the present static levels and considering the variations of investment, operation, and maintenance costs. According to the results, if the current tendency of exploitation continues, in the period 2005 to 2010, the average depletion of the static levels in the Valley of Querétaro will reach 8 m per year and the average depth of the static level will be about 175 m, while for scenario C the depleting rate will be only 2.2 m per year, with an average depth of the static level of 122 m. For scenarios A and B, starting from year 2000, the crops whose water productivity will be inferior to 0.4\$ m⁻³ will disappear from the crop pattern due to their low profitability. The cost of pumping for public service in year 2010 will be 1.1\$ m⁻³, if the current tendency of exploitation of the aquifer continues. For scenario B the cost would be 0.95\$ m⁻³, and for C only around 0.8\$ m⁻³; that is, 27% less than for scenario A. From the above mentioned it is deduced that it is not convenient to continue with the current tendency of exploitation. It is recommended that the management of the aquifer be done in accordance to scenario C, which implies reduction of extractions for the agricultural sector and improving water use efficiency for the other sectors.

Key words: Pumping costs, aquifer modeling.

INTRODUCTION

In a large part of México, groundwater sources are very important and, in many cases, constitute the only form of water supply. Overexploitation of aquifers is

INTRODUCCIÓN

En gran parte de México las fuentes subterráneas de agua son muy importantes y, en muchos casos, constituyen la única forma de su abastecimiento. La sobreexplotación de los acuíferos es uno de los problemas más importantes en el manejo de las aguas subterráneas del país, y se define como la condición sostenida de mayor extracción que la recarga del acuífero. En las zonas de riego con bombeo de pozos profundos hay baja eficiencia, tanto del uso del agua como de la eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo y el manejo de los acuíferos, por lo que debe instrumentarse un manejo más equilibrado de estos. Es importante también realizar obras e inversiones que incrementen la eficiencia de los sistemas, ya que estas inversiones tienen una alta rentabilidad.

La información (SARH, 1988) de las condiciones para el acuífero de Querétaro es la siguiente:

1) La condición de equilibrio de este acuífero se mantuvo hasta la década de 1940, cuando se inició su explotación intensiva. Hasta finales de 1930, la explotación se realizaba mediante alumbramientos someros con baja capacidad de extracción.

2) De 1970 a 1986 se registraron abatimientos de 5 a más de 35 m, equivalente de 0.3 hasta poco más de 2 m por año. Las profundidades del nivel estático van de los 50 a los 70 m en el valle, con los niveles más profundos bajo la mancha urbana y el parque industrial, a causa de la gran concentración local de pozos, y va de 70 a más de 110 m en las partes altas debido a la pendiente topográfica. Para los caudales comunes de extracción, de 30 a 60 lps, el abatimiento en los pozos durante el bombeo varía de 10 a 30 m; consecuentemente, los niveles dinámicos se encuentran a profundidades de 70 a 90 m en las áreas de riego por bombeo, y de 110 a 130 m en el área urbana-industrial de la capital del Estado.

De persistir esta situación, el vaciado de los acuíferos implicará una reducción gradual de la oferta de agua subterránea, por el incremento en los costos de extracción y el deterioro de su calidad, y podría generar severas limitaciones en el uso futuro del recurso. Específicamente, podría dejar de ser rentable la agricultura de riego por bombeo en aquellas áreas donde los niveles de bombeo son más profundos y además se continúen abatiendo con rapidez. La concentración del bombeo en el área urbana e industrial de la ciudad de Querétaro provoca el descenso acelerado de los niveles del agua subterránea y la reducción del rendimiento de los pozos que la abastecen. De continuar esta situación, decrecerá progresivamente el caudal de agua para esta ciudad. El aumento de la capacidad instalada mediante la perforación de más pozos

one of the most serious problems in groundwater management, and it is defined as the sustained condition of an extraction greater than the recharge of the aquifer. In irrigation zones with pumping from deep wells, the efficiency of water use is low, both in electro-mechanical pumping equipment as in groundwater management. Therefore, a more balanced management of aquifers must be implemented. Also, public works and investments must be made to increase the efficiency of the systems, since these investments have a high profitability.

The information (SARH, 1988) about the conditions of the Querétaro aquifer is the following:

1) The condition of equilibrium of the aquifer was maintained until 1940, when its intensive exploitation began. Up to the end of 1930, the exploitation was by means of shallow wells with low extraction capacity.

2) From 1970 to 1986, total depletions from 5 to more than 35 m were registered, equivalent to 0.3 to more than 2 m per year. Depths of the static level in the valley go from 50 to 70 m, the deepest ones occurring underneath the cities and the industrial park, because of the great local concentration of wells, and from 70 to more than 110 m in the high parts due to the topographic slope. For the common water discharge (30-60 liters per second, lps), the water dawn in the wells during pumping varies from 10 to 30 m; consequently, the dynamic levels are found at depths between 70 and 90 m in the areas of pumping irrigation, and between 110 and 130 m in the urban-industrial area of the State capital.

If this situation persists, the emptying of aquifers will result in a gradual reduction of groundwater supply due to the increase of extraction costs and the deterioration of its quality, and might generate severe limitations in the future use of this resource. Specifically, agriculture based on pump irrigation might not be profitable in those areas where pumping levels are deeper and keep on depleting fast. Concentration of pumping in the urban and industrial area of the city of Querétaro accelerates the drop of groundwater levels and reduces the yield of wells, which are its sources of supply. If this situation continues, the water flow for this city will progressively decrease. The increase of the established capacity by boring more wells in the same area turns out to be counterproductive as it intensifies the problem, accentuating the rhythm of depletion and the interference among wells (SARH, 1988). In order to predict the behavior of an aquifer under certain conditions of its management flow models are used.

Aquifers' flow models

Aquifers' flow models are useful tools to predict their behavior employing policies different from or equal to

en la misma área resulta contraproducente, pues agudiza el problema al acentuar el ritmo de abatimiento y la interferencia entre pozos (SARH, 1988). Para predecir el comportamiento de un acuífero bajo un determinado escenario de manejo del mismo, se utilizan los modelos de flujo.

Modelos de flujo de acuíferos

Los modelos de flujo de acuíferos permiten predecir el comportamiento de éstos bajo políticas distintas o iguales a las que están sujetos, y calculan las condiciones de flujo bajo distintos regímenes de extracción. Los modelos son representaciones idealizadas de sistemas, compuestos por un conjunto de elementos físicos que interactúan de acuerdo con leyes que los gobiernan, y que permiten simular su comportamiento. Matemáticamente, se puede definir el sistema modelado por una serie de parámetros y variables (Custodio y Llamas, 1983). Los parámetros pueden describir los componentes geométricos, como forma, espesores, áreas, volúmenes, etc.; o sus componentes, como transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc. Las variables, que en la modelación matemática de acuíferos suelen denominarse variables de estado, describen la situación del sistema en cada momento y pueden ser cargas piezométricas, componentes de velocidad, concentraciones de solutos, y otros.

La calibración consiste en la modificación de los parámetros del modelo hasta reproducir la historia del comportamiento del sistema, conocida para un cierto periodo; mientras que la validación es la comparación de datos observados producidos por el sistema (pero no usados en la calibración) con datos simulados o calculados, dando una idea de la capacidad predictiva del modelo.

Las leyes de funcionamiento de los modelos de flujo subterráneo son la de continuidad y la de Darcy; de su combinación resulta la ecuación general de movimiento.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde k_{xx} , k_{yy} y k_{zz} son los valores de permeabilidad en los ejes respectivos (LT^{-1}), h es la carga hidráulica (L), w es el término fuente (T^{-1}), S_s es el coeficiente de almacenamiento específico (L^{-1}) y t es el tiempo.

Para resolver (1) existen los métodos de diferencias finitas y el del elemento finito. Siempre que se resuelve una ecuación diferencial se debe tener las condiciones iniciales y de frontera para obtener una solución única correspondiente a un proceso físico dado. Matemáticamente

those which they are subjected to, and calculate the conditions of flow under different extraction regimes. Models are idealized representations of systems, composed by a group of physical elements, which interact according to the laws by which they are ruled, and allow to simulate their behavior. Mathematically, a modeled system can be defined by a series of parameters and variables (Custodio and Llamas, 1983). The parameters can describe the geometric components, such as form, thickness, areas, volumes, etc.; or its characteristics such as transmissivity, storing coefficient, etc. The variables, usually called in mathematical modeling variables of state, describe the situation of the system at each moment, and can be piezometric heads, speed components, concentrations of solutes, and others.

The calibration consists in modifying the model parameters until reproducing the history of the system behavior, known for a certain period; whereas validation is the comparison of data produced by the system (but not used for the calibration) with simulated or calculated data, yielding a measurement of the predictive capacity of the model.

Laws governing groundwater flow models are the Law of Continuity and Darcy's; from their combination arises the general equation of movement,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

where k_{xx} , k_{yy} , and k_{zz} are the values of permeability in the respective axes (LT^{-1}), h is the hydraulic charge (L), w is the source term (T^{-1}), S_s is the specific storing coefficient (L^{-1}), and t represents time

Equation (1) can be solved by means of the finite differences and finite element methods. Whenever a differential equation is solved, the initial and boundary conditions must be specified in order to obtain a solution which corresponds to a given physical process.

Mathematically, the boundary conditions include the geometry of borders and the values of the dependent variables, or their derivatives. Regarding groundwater flow problems, the boundary conditions are of three types (Rumbaugh, 1993):

- a) Charge values (Dirichlet's or of first order boundary condition)
- b) Flow values (Neumann's or of second order boundary condition)
- c) Charge-dependent flow values (Cauchy's, Robin's or third order boundary Condition)

las condiciones de frontera incluyen la geometría de las fronteras y los valores de las variables dependientes o sus derivadas. En problemas de flujo subterráneo, las condiciones de frontera son de tres tipos (Rumbaugh, 1993):

- a) Valores de carga. (Condición de Dirichlet o de primer orden)
- b) Valores de flujo (Condición de Neumann o de segundo orden)
- c) Valores de flujo dependiente de carga (Condición de Cauchy-Robin o de tercer orden)

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Estudiar el comportamiento del acuífero de Querétaro bajo tres escenarios de manejo, los costos de bombeo y su impacto en los diferentes sectores. 2) Determinar si en dicho acuífero es conveniente económicamente continuar con la sobreexplotación o iniciar acciones para su recuperación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Valle de Querétaro está entre los 20° 30' y 20° 45' N y los 100° 22' y 100° 29' O, a una altitud media de 1800 m, con un área aproximada de 42 500 ha, y se ubica al suroeste del Estado del mismo nombre. Su acuífero cubre los municipios de Querétaro, Corregidora y parte del Marqués (Figura 1). De acuerdo con el padrón levantado por la CNA (1998), hay 239 pozos en operación.

La CNA proporcionó la mayor parte de la información que se utilizó en este estudio con fines de modelación, vgr: Censos de pozos, volúmenes de extracción de uso agrícola, y características hidráulicas y geométricas del acuífero. Para establecer una estrategia adecuada de manejo de un acuífero se requiere predecir el efecto que tienen ciertas acciones sobre él, por lo que se simuló tres escenarios de explotación para tres periodos de cinco años: 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010; con la ecuación 1 resuelta mediante métodos numéricos a través del programa Visual ModFlow v. 2.61 (Guiguer y Franz, 1997) facilitado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua.

Con las elevaciones medias anuales de los niveles estáticos en el Valle de Querétaro que resultaron de la simulación para los años 2000, 2005 y 2010, se calcularon los costos por m³ bombeado para los sectores agrícola, doméstico y de servicio público, para los tres escenarios.

El programa VisualModFlow v. 2.61 permite simular el flujo en acuíferos por un método matemático; esto es, resuelve la ecuación diferencial parcial tridimensional del flujo del agua en un acuífero heterogéneo y anisótropo (ecuación 1), mediante la técnica de diferencias finitas, utilizando celdas rectangulares de dimensiones variables, mediante el procedimiento totalmente implícito por métodos iterativos (McDonald y Harbaugh, 1988).

El modelo del acuífero, con 425 km², tiene una discretización espacial en planta de la forma siguiente: 1218 celdas de 500x500 m, 1009 celdas de 500x250 m, 208 celdas de 250x250 m, 120 celdas de 500x125 m y 32 celdas de 250x125 m. En la vertical tiene seis

The objectives of this work were: 1) To study the behavior of the Querétaro aquifer under three different kinds of management, pumping costs and their impact on the different sectors, 2) To determine if it is economically convenient to continue with the overexploitation of the above mentioned aquifer or initiate operations for its recovery.

MATERIALS AND METHODS

The Valley of Querétaro is located in the southwest part of the state with the same name, between 20° 30' and 20° 45' North Latitude and 100° 22' and 100° 29' West Longitude, at an average height of 1800 m, with an area of approximately 42 500 ha. Its aquifer covers the municipalities of Querétaro, Corregidora, and part of Marqués (Figure 1). According to the register of the CNA (1998), there are 239 operating wells.

The CNA provided most of the information utilized in this study with the purpose of modeling, for example: Census of wells, volumes withdrawn for agricultural use, and hydraulic and geometrical characteristics of the aquifer. To establish an adequate management strategy of an aquifer, the prediction of the effect that certain actions

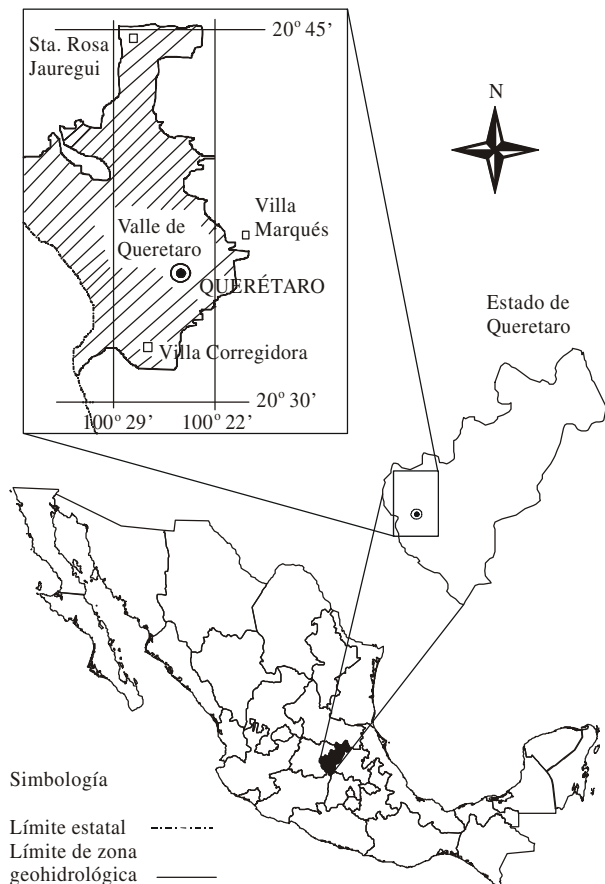


Figura 1. Localización del área de estudio.
Figure 1. Location of the area of study.

capas: las 1, 3 y 5 constituidas por medio poroso; y las 2 y 4 por medio fracturado; la capa 6 es el basamento del acuífero a una elevación media de 1250 m, equivalente a una profundidad promedio de 550 m.

Las condiciones de frontera utilizadas en el modelo de Querétaro son recarga vertical (consideradas constantes) y fronteras impermeables (segundo orden) y flujo dependiente de la recarga (tercer orden) en las vecindades con otros acuíferos.

Los escenarios simulados para los periodos de predicción 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010 se diseñaron con información referente a la demanda de agua de uso industrial y servicio público urbano, obtenida de la empresa Ariel Consultores S. A. (1996) y de volúmenes extraídos para uso agrícola de 1980 a 1995 proporcionados por la Comisión Nacional del Agua.

Escenario A. En éste se considera continuar la explotación según la tendencia actual sin modificación. Para la demanda del servicio público urbano: a) Uso doméstico, con un incremento anual de 4% (crecimiento de la población), y una dotación promedio de 159 L/habitante/d; b) La demanda de los usuarios comerciales, industriales y de servicios, considerando un incremento anual de 11.78% (de 1988 a 1993) y c) Pérdidas en la red de distribución y tomas domiciliarias de 30%. La tendencia de extracción para la demanda de uso agrícola se determinó mediante el modelo empírico obtenido a partir de los volúmenes extraídos para este sector de 1980 a 1995 (Ecuación 2)

$$V=4.8*10^{23} e^{-0.02562T} \quad (2)$$

en la que V es volumen en Mm^3 y T es un año específico. El coeficiente de determinación fue 0.995.

Para la demanda de uso industrial se consideró un crecimiento anual de 4%.

Escenario B. Corresponde a la condición intermedia entre los escenarios A y C para la demanda de servicio público urbano: a) Para la demanda de uso doméstico y de usuarios comerciales, industriales y de servicios, se consideró un incremento anual de 4%. b) Mediante la rehabilitación de la red de distribución, bajar las pérdidas de 30% a 23%, 3% mayor que la recomendación internacional. La demanda agrícola e industrial se consideró igual que en el escenario A.

Escenario C. Este es el tendiente a la estabilización del acuífero. Para la demanda de servicio público urbano, además de las consideraciones del escenario B, se disminuye la demanda debido a los caudales ahorrados por la sustitución de 153 000 retretes por otros de bajo consumo, considerando que se tienen 1.5 retretes por vivienda y cinco descargas/habitante/d. Para el sector agrícola se consideró una disminución lineal a extracción cero del acuífero para el año 2010, satisfaciendo la demanda mediante el uso de las aguas residuales tratadas. Para uso industrial se supuso una disminución lineal hasta de 40% de la demanda actual para 2010. 60% de la demanda reducida se usaría en procesos industriales que podrían emplear agua residuales tratadas y el 40% restante en las industrias de alimentos y bebidas, en las cuales se seguiría utilizando agua del acuífero.

Los escenarios simulados, de acuerdo con el diseño planteado, se presentan en el Cuadro 1.

have on it is required; therefore, three exploitation scenarios for three 5-year periods were simulated: 1995-2000, 2000-2005, and 2005-2010, using equation (1), solved by numerical methods employing the Visual ModFlow v. 2.61 (Guiguer and Franz, 1997) provided by the Groundwater Manager of the National Water Commission (Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua).

The pumping cost per m^3 for public service, domestic and agricultural sectors for the three scenarios were calculated based on the average yearly elevations of the static levels in the Valley of Querétaro, resulting from the simulation for the years 2000, 2005, and 2010.

The Visual ModFlow v. 2.61 program allows to simulate the groundwater flow by a mathematical method, that is, it solves the three-dimensional partial differential equation of the water flow in a heterogeneous and anisotropic aquifer (equation 1), with the technique of finite differences, using rectangular cells of variable dimensions by means of the totally implicit procedure by iterative methods (McDonald and Harbaugh, 1988)

The model of the aquifer with 425 km^2 , has a spatial discretization in plant of the following form: 1218 cells of 500x500 m, 1009 cells of 500x250 m, 208 cells of 250x250 m, 120 cells of 500x125 m, and 32 cells of 250x125 m. There are six layers in the vertical: layers 1, 3, and 5 constituted by porous matter and layers 2 and 4 by fractured matter; stratum 6 is the aquifer base at a mean elevation of 1250 m, equivalent to an average depth of 550 meters.

The boundary conditions used in the Querétaro model are vertical recharge (taken as constant), impermeable borders (second order boundary condition), and recharge-dependent flow (third order boundary condition) in the vicinity of other aquifers.

The scenarios simulated for the prediction periods of 1995-2000, 2000-2005, and 2005-2010 were designed, based on the information about the water demand for industrial use and urban public service, obtained from Ariel Consultores S. A. (1996), and about volumes extracted for agricultural use from 1980 to 1995, provided by the Comisión Nacional del Agua (CNA).

Scenario A. Under this scenario it is assumed that aquifer's exploitation continues under the current tendency without modification. For the demand of urban public service: a) Domestic use with an annual increment of 4% (due to population increase) and an average consumption of 159 l/inhabitant/day; b) The demand of commercial and industrial users and of services, considering an annual increment of 11.78% (1988 to 1993), and c) Losses in the distribution net and home water connections of 30%. The extraction tendency for agricultural demand was determined by the empirical model obtained from the volumes extracted by this sector from 1980 to 1995 (Equation 2)

$$V=4.8*10^{23} e^{-0.02562T} \quad (2)$$

in which V is volume in Mm^3 and T is a specific year. The determination coefficient was 0.995.

For the demand for industrial use an annual increase of 4% was considered.

Cuadro 1. Extracciones medias anuales supuestas por sector, para los escenarios simulados A, B y C, en millones de m³.
Table 1. Supposed annual mean extractions per sector for the simulated scenarios A, B, and C, in million m³.

Periodo	Uso público urbano	Uso agrícola	Uso industrial	Total
Escenario A				
1995-2000	70.7	28.6	10.6	109.9
2000-2005	96.2	25.2	13.5	134.9
2005-2010	138.8	22.1	16.4	177.3
Escenario B				
1995-2000	62.2	28.6	10.6	101.4
2000-2005	70.4	25.2	13.5	109.1
2005-2010	88.4	22.1	16.4	126.9
Escenario C				
1995-2000	49.3	28.6	9.9	87.8
2000-2005	58.6	21.5	9.6	89.7
2005-2010	73.2	7.2	9.4	89.8

Para calcular los costos de bombeo se consideraron los conceptos siguientes:

- a) Amortización e intereses del capital invertido, b) operación y, c) mantenimiento y reparaciones.

Así, el costo del metro cúbico bombeado sería el cociente de la suma de los conceptos anteriores anuales entre el volumen anual bombeado en m³.

Se utilizaron datos de un pozo típico en el Valle de Querétaro, a saber:

Gasto: 28.5 lps (media de datos de 1996); diámetro de descarga 6" (moda de datos de 1996); tiempo de operación anual 4500 horas, y elevación media del valle de Querétaro 1800 m.

El cálculo de la amortización e intereses anuales se efectuó con la fórmula de amortización anual uniforme con valor de rescate (FIRA, 1985):

$$A = (C - R) \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) + Ri \quad (3)$$

donde A es la anualidad por concepto de amortización e intereses del capital invertido, C el valor original de la inversión, R el valor de rescate de la inversión al final de su vida útil, n el número de años de vida útil o en los que se desea amortizar la inversión, e i es la tasa de interés real anual definida por:

$$i = (i_n - f)/(1+f) \quad (4)$$

donde i_n es la tasa de interés nominal anual de CETES a 28 días y f la inflación anualizada.

Scenario B. Corresponds to an intermediate condition between scenarios A and C for the demand of urban public service: a) A yearly increment of 4% was considered in the demand of domestic, commercial, and industrial use, as well as for users of services. b) Losses in the distribution net can be reduced from 30% to 23% (3% above the international standard) by restoring it. Agricultural and industrial demands were taken as in scenario A.

Scenario C. Tends to the stabilization of the aquifer. Besides the considerations of scenario B, the urban public service demand would diminish because of the volumes saved as a consequence of the reduction of water flows, caused by the replacement of 153 000 WC's by others of low consumption, assuming that there are 1.5 WC's per dwelling and 5 flushes/inhabitant/d. For the agricultural sector, a linear diminution to zero extractions from the aquifer for year 2010 was considered, satisfying the demand using treated sewage. For industrial use, a linear diminution up to 40% of the current demand was supposed for 2010. Sixty percent of the reduced demand would be used in industrial processes, which could utilize treated sewage, and the remaining 40% in the food and beverage industries which would continue utilizing water from the aquifer.

The scenarios simulated according to the set out design are presented in Table 1.

To calculate pumping costs, the following concepts were considered:

- a) Amortization and interests of the invested capital, b) operation, and c) maintenance and repairs.

Thus, the cost of one pumped cubic meter would be the quotient of the sum of the previous annual concepts divided by the pumped annual volume in m³.

Data of a typical well in the Valley of Querétaro were used, namely:

Volume of flow: 28.5 lps (data means of 1996); diameter of discharge 6" (data mode of 1996); annual operation time 4500 hours, and mean altitude of the Valley of Querétaro 1800 m.

The estimate of amortization and annual interests was done using the formula of uniform annual recovery value (FIRA, 1985).

$$A = (C - R) \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) + Ri \quad (3)$$

where A is the annuity for amortization and interests of the invested capital; C is the original value of the investment; R is the final value of the investment at the end of its life span; n the number of years of life span, expected for the recovery of the investment, and i the rate of annual real interest, defined by

$$i = (i_n - f)/(1+f) \quad (4)$$

where i_n is the rate of annual nominal interest of CETES at 28 days, and f the annual inflation.

El costo de perforación se estimó mediante la ecuación 5, en la cual éste depende de la profundidad del pozo y del gasto instantáneo bombeado (Palacios, 1999):

$$C_{perf.} = 1334.58 P_p^{0.9544} Q^{0.1673} \quad (5)$$

donde $C_{perf.}$ es el costo de la perforación en pesos de 1996, P_p es la profundidad del pozo en metros y Q el gasto en lps.

La profundidad de perforación se estimó como 1.5 veces la carga dinámica total (CDT), la cual se estimó mediante la ecuación 6, que depende de la profundidad al nivel estático (Ariel Consultores, 1996):

$$CDT = 1.0435 PNE + 14.229 \quad (6)$$

donde PNE es la profundidad del nivel estático en m.

El costo del equipamiento se calculó con la ecuación 7 (Palacios, 1999):

$$C_E = 147.37 CDT^{0.8966} Q^{0.826} \quad (7)$$

donde C_E es el costo del equipamiento en pesos de 1996, Q el gasto en lps y CDT la carga dinámica total en m.

Para estimar el costo por concepto de consumo de energía eléctrica, éste se consideró constante en el tiempo, con pago mensual de energía y tarifas de acuerdo al tipo de uso.

El cálculo del costo de la energía eléctrica anual se efectuó de la forma siguiente:

a) Potencia consumida en HP:

$$P_c = \frac{\omega Q CDT}{76\eta} \quad (8)$$

donde P_c es la potencia consumida en HP, ω el peso específico del agua kg m^{-3} , Q el gasto en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, CDT la carga dinámica total en metros, η la eficiencia electromecánica del equipo de bombeo (40%) y 76 es el factor de conversión de Kg m s^{-1} a HP.

b) Energía consumida en kWh anuales:

$\text{kWh anuales} = 0.746 * P_c * \text{tiempo de operación anual en horas}$.

c) Costo mensual de energía = $(\text{kWh anuales} / 12) * \text{Tarifa}$.

d) Costo anual de energía = $12 * \text{Costo mensual}$.

Las tarifas eléctricas utilizadas fueron la 9M para uso agrícola y la 6 para uso público e industrial, (CFE, 1999).

Para el costo anual por concepto de mantenimiento y reparaciones se consideró para el pozo 15% del costo inicial, y para el equipamiento de tipo eléctrico se tomó un valor de 4.5% del costo inicial de la inversión (FIRA, 1985).

The drilling cost was estimated using equation 5, where it depends on the depth of the well and the instant pumped volume of flow (Palacios, 1999).

$$C_{perf.} = 1334.58 P_p^{0.9544} Q^{0.1673} \quad (5)$$

where $C_{perf.}$ is the drilling cost in 1996 pesos', P_p is the depth of the well in meters and Q the volume of flow in lps.

The depth of the borehole was calculated as 1.5 times the total dynamic charge (CDT) estimated by equation 6, which depends of the depth at static level (Ariel Consultores, 1996)

$$CDT = 1.0435 PNE + 14.229 \quad (6)$$

where PNE is the depth of static level in m.

The equipment cost was calculated with equation 7 (Palacios, 1999)

$$C_E = 147.37 CDT^{0.8966} Q^{0.826} \quad (7)$$

where C_E is the cost of equipment in pesos of 1996; Q is the volume of flow in lps, and CDT the total dynamic charge in m.

To estimate the cost of electric energy consumption, this considered constant, with monthly payments, and electricity charges according to the type of use.

The calculation of annual electric energy cost was made as follows:

a) Power consumed in HP

$$P_c = \frac{\omega Q CDT}{76\eta} \quad (8)$$

where P_c is consumed power in HP, ω the specific weight of water kg m^{-3} , Q = volume of flow in $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, CDT total dynamic charge in m, η is the electro-mechanical efficiency of the pumping equipment (40%), and 76 is the conversion factor of Kg m s^{-1} to HP.

b) Consumed energy in annual kWh:

$\text{Annual kWh} = 0.746 * P_c * \text{annual operation time in hours}$.

c) Monthly cost of energy = $\text{annual kWh} / 12 * \text{tariff}$

d) Annual cost of energy = $12 * \text{monthly cost}$

Electricity tariffs used were the 9M for agricultural use and 6 for public and industrial use (CFE, 1999).

The annual cost for maintenance and repairs was considered 15% of the initial cost for the well, and 4.5% of the initial investment cost for the electric equipment (FIRA, 1985).

RESULTADOS

Una vez calibrado el modelo de simulación e introducida la información referente a cada escenario, se obtuvieron las profundidades promedio del nivel estático para los diferentes escenarios, las cuales se presentan en el Cuadro 2.

Los costos de bombeo para un pozo promedio en el Valle de Querétaro se determinaron de acuerdo con el uso, ya que sólo varían en las tarifas eléctricas. Es importante señalar que el análisis de costos supone que la política de subsidios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a las tarifas eléctricas no tendrá modificaciones. Si ocurrieran cambios en estas políticas, los resultados previstos cambiarían substancialmente. Los costos de bombeo para los diferentes sectores se presentan en los Cuadros 3 y 4.

Con respecto a la predicción de las elevaciones de los niveles freáticos en el tiempo, el empleo del modelo matemático del acuífero en Visualmodflow v. 2.61 puede predecir tales niveles en diferentes condiciones de

RESULTS

Once the simulation model was gauged and the information about each scenario introduced, the mean depths of the static level for the different scenarios were obtained; they are presented in Table 2.

Pumping costs' of an average well in the Valley of Querétaro were determined according to its use, since only the electricity tariffs' vary. It is worth indicating that the analysis of costs is based on the idea that the Federal Commission of Electricity (CFE) will not modify its policy of subsidies. Changes in this policy would substantially alter the predicted results. Pumping costs for the different sectors are shown in Tables 3 and 4.

With respect to the prediction of the elevation of the phreatic levels in time, the use of the mathematical model of the aquifer in Visual ModFlow v. 2.61 can predict them, under different exploitation conditions (as in the three simulated scenarios), which may be inconvenient, since when the model is calibrated, the phreatic surface is in the most superficial layers, which implies that if the

Cuadro 2. Profundidades promedio del nivel estático en el Valle de Querétaro.

Table 2. Mean depths of the static level in the Valley of Querétaro.

Año	Escenario A		Escenario B		Escenario C	
	Elevación del nivel estático (m)	Profundidad del nivel estático (m)	Elevación del nivel estático (m)	Profundidad del nivel estático (m)	Elevación del nivel estático (m)	Profundidad del nivel estático (m)
1995	1710	90	1710	90	1710	90
2000	1690	110	1694	106	1702	98
2005	1666	134	1676	124	1689	111
2010	1626	174	1655	145	1678	122

Cuadro 3. Costos de bombeo en el sector agrícola (pesos de 1996).

Table 3. Pumping costs in the agricultural sector (pesos of 1996).

Año	Carga dinámica total (m)	Costos anuales				Costo unitario \$/m ³
		Amortización e intereses	Operación [†]	Mantenimiento	Total	
Escenario A						
1995	108.1	38 910	55 823	52 128	146 861	0.3181
2000	129.0	45 825	67 479	61 605	174 909	0.3788
2005	154.1	54 017	82 728	72 871	209 616	0.4540
2010	195.8	67 465	108 605	91 440	267 510	0.5794
Escenario B						
2000	124.8	44 449	65 148	59 716	169 313	0.3667
2005	143.6	50 616	76 259	68 189	195 064	0.4225
2010	165.5	57 739	89 844	78 001	225 584	0.4886
Escenario C						
2000	116.5	41 686	60 485	55 929	158 100	0.3424
2005	130.1	46 168	68 062	62 076	176 306	0.3819
2010	141.5	49 934	74 965	67 251	192 150	0.4162

[†] Calculados utilizando la tarifa eléctrica 9M.

Cuadro 4. Costos de bombeo en servicio público e industrial (pesos de 1996).
Table 4. Pumping costs for public service and industry (pesos of 1996).

Año	Carga dinámica total (m)	Costos anuales				Costo unitario \$/m ³
		Amortización e intereses	Operación [†]	Mantenimiento	Total	
Escenario A						
1995	108.1	38 910	198 614	52 128	289 652	0.6274
2000	129.0	45 825	236 943	61 605	344 373	0.7459
2005	154.1	54 017	282 938	72 871	409 826	0.8876
2010	195.8	67 465	359 596	91 440	518 501	1.1230
Escenario B						
2000	124.8	44 449	229 277	59 716	333 442	0.7222
2005	143.6	50 616	263 773	68 189	382 578	0.8286
2010	165.5	57 739	304 019	78 001	439 759	0.9525
Escenario C						
2000	116.5	41 686	213 945	55 929	311 560	0.6748
2005	130.1	46 168	238 859	62 076	347 103	0.7518
2010	141.5	49 934	259 940	67 251	377 125	0.8168

[†] Calculados utilizando la tarifa eléctrica 6.

explotación (como en los tres escenarios simulados), con el inconveniente de que el modelo se calibra cuando la superficie freática se encuentra en las capas más superficiales, lo que implica que si las características hidráulicas de las capas subyacentes son sobrestimadas, los niveles serán subestimados y viceversa.

Para el escenario A los abatimientos son cada vez mayores, yendo desde 4m año⁻¹ en el periodo 1995-2000 hasta 8m año⁻¹ en el periodo 2005-2010. En el escenario C, los abatimientos van desde 1.6 m año⁻¹ en el periodo 1995-2000 hasta 2.2 m año⁻¹ en el periodo 2005-2010, lo que implica una diferencia de profundidad del nivel estático, entre los escenarios A y C, de 52 m para el año 2010.

Se puede apreciar que, a partir del año 2000, todos los cultivos que tengan una productividad inferior a 0.4\$ m⁻³ tendrán serias limitaciones de rentabilidad y posiblemente saldrán del mercado. Para 2010 el costo del m³ bombeado para uso agrícola será aproximadamente 0.6\$; esto quiere decir que la productividad mínima de los cultivos debe ser 0.6 \$ m⁻³ para que sean rentables, según la tendencia actual de explotación. Según el escenario C, sólo tendría que ser 0.4 \$ m⁻³, aproximadamente 33% menos.

Los costos de bombeo para el servicio público e industrial son superiores que para el sector agrícola. La productividad del agua en el servicio público se estima que es considerablemente superior al costo de bombeo, al igual que en el sector industrial.

CONCLUSIONES

La explotación del acuífero del Valle de Querétaro, según la tendencia actual (escenario A), provocará en el periodo 2005-2010 un abatimiento promedio de los niveles estáticos de 8 m año⁻¹ y la profundidad promedio

hydraulic characteristics of the underlying strata are overestimated, the levels will be underestimated and vice-versa.

As for scenario A, depletion is increasing from 4m year⁻¹ in the 1995-2000 period, to 8m year⁻¹ in the period 2005-2010. In scenario C, depletion goes from 1.6 m year⁻¹ in the 1995-2000 period to 2.2 m year⁻¹ from 2005 to 2010, which implies a difference of depth of statics' levels of 52 m to the year 2010 between scenarios A and C.

It can be observed that from 2000 on, all the crops producing less than 0.4\$ m⁻³ will have serious limitations in profitability and may possibly get off the market. By 2010, the pumping cost per m³ for agricultural use will be approximately 0.6\$, which means that the minimum productivity of the crops to be profitable must be 0.6\$ m⁻³ according to the current exploitation tendency. According to scenario C, it would have to be only 0.4\$ m⁻³, approximately 33% less.

Pumping costs for public service and industry are higher than those in the agricultural sector. Water productivity in public service, as well as in the industrial sector, is deemed considerably superior to pumping costs.

CONCLUSIONS

The exploitation of the aquifer of Querétaro's Valley, according to the current tendency (scenario A) will provoke an average depletion of the static levels of 8 m year⁻¹ in the period 2005-2010, and for 2010, the mean depth of the static level will be 175 m, whereas, if restoring the distribution net of drinking water, and maintaining the same tendency of scenario A (scenario B) for the other sectors, it would be 4.2 m year⁻¹. If (besides the

del nivel estático para el año 2010 será de 175 m; mientras que si se rehabilita la red de distribución de agua potable y para los otros sectores se mantiene la misma tendencia del escenario A (escenario B), sería de 4.2 m año⁻¹. Si, además de las consideraciones del escenario B, hubiera sustitución de retretes por otros de bajo consumo, disminución lineal a cero de la extracción por demanda agrícola para el año 2010; y, en cuanto a la demanda industrial, reducción lineal a 40% de la actual, para 2010 (escenario C), el abatimiento sería solamente de 2.2 m año⁻¹, con una profundidad promedio del nivel estático de 122 m para 2010.

Según el modelo de simulación, para el escenario A ocurrirá un déficit anual en el acuífero de Querétaro, para el periodo 2005-2010, de 95 Mm³; para el escenario B, dicho déficit sería 62 Mm³ y para el escenario C sólo sería de 30 Mm³. El déficit anual para 1996 fue del orden de los 37 Mm³, lo que representó 53% de la recarga. Para los escenarios A y B, a partir de 2000, los cultivos cuya productividad del agua sea inferior a 0.4 m³, tenderán a desaparecer del patrón de cultivos debido a su poca rentabilidad.

No es conveniente continuar con el régimen de explotación actual del acuífero de Querétaro. De acuerdo con estos resultados, se recomiendan las acciones consideradas en el escenario C; sin embargo, será conveniente realizar un análisis de beneficio-costos, evaluando el costo del establecimiento de las acciones y comparándolos con los beneficios totales esperados.

LITERATURA CITADA

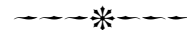
- Ariel Consultores S. A. 1996. Estudio del manejo de la demanda para la estabilización y recuperación de los acuíferos de Hermosillo Son. y Querétaro Qro. México, D. F. 126 p.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 1999. <http://www.cfe.gob.mx>
- Comisión Nacional del Agua (CNA). Gerencia Estatal Querétaro. 1998. Diagnóstico del acuífero del Valle de Querétaro. Querétaro, Qro. 27 p.
- Custodio G., E. y M. R. Llamas. 1983. Hidrología Subterránea. 2a. Ed. Omega. Barcelona España. 2347 p.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). 1985. Instructivos técnicos de apoyo para la formulación de proyectos de financiamiento y asistencia técnica. México. D. F. 190 p.

considerations of scenario B) WC's were replaced by others of low consumption, agricultural demands were diminished to zero extraction by year 2010, and industrial demand had a linear reduction to 40% of the current one, in 2010 (scenario C), this depletion would be only 2.2 m year⁻¹, with an average depth of the static level of 122 m.

According to the simulation model, for scenario A, an annual deficit of 92 Mm³ will occur in the Querétaro aquifer for the period of 2005-2010; for scenario B such deficit would be 62 Mm³, and for scenario C of only 30 Mm³. The annual shortfall for 1996 was on the order of 37 Mm³, representing 53% of the recharge. As for scenarios A and B, from 2000 on, crops with a productivity of water inferior to 0.4 m³ will tend to disappear, due to its low profitability.

It is not convenient to continue with the current regime of exploitation of the Querétaro aquifer. According to these results, actions considered in scenario C are recommended; nevertheless, it is convenient to make a benefit-cost analysis, evaluating the cost of the actions and comparing then with the expected total benefit.

—End of the English version—



- Guiguer, N. and T. Franz. 1997. Visual Modflow for Windows v. 2.61. User's Manual. Waterloo Hydrogeologic Software. Ontario, Canada. 178 p.
- McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. 1988. VisualModFlow v. 2.0. Reference Manual I. U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, E. U. 324 p.
- Palacios V., E. 1999. Factores técnicos, económicos y políticos que afectan la demanda de agua subterránea para riego en México. *In: Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobreexplotación de Acuíferos en México, Estudio Sectorial.* Banco Mundial - CNA. Guanajuato, México. 3: 1-17.
- Rumbaugh, J. O. 1993. ModelCad386. Computer Aided Design Software for Groundwater Modeling. Geraghty & Miller, Inc. Reston, Virginia, E.U. 273 p.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1988. Sinopsis geohidrológica del estado de Querétaro. México D. F. 57 p.