

Un lago misterioso en México

INTRODUCCIÓN

El Lago de Tequesquitengo (estado de Morelos, México) en el siglo XIX tenía un nivel de agua alrededor de 20 metros por debajo del actual y en un periodo entre 1820 y 1865 el nivel subió y dejó completamente sumergido el pueblo que había en sus orillas. La explicación que se ha dado a este fenómeno se relaciona con un trasvase y un sistema de riego construídos en esa época.

La tecnología seleccionada (AQÜIMPE) en este trabajo es un modelo matemático bidimensional no estacionario basado en el método del elemento finito y que emplea triángulos cuadráticos como elemento básico para la discretización del campo de estudio. (Llanusa et al., 1988^{a7}; Llanusa et al., 1988b⁶; Llanusa, 1997⁴; Llanusa y Martínez, 2002⁵; Martínez, 1988¹⁰; Martínez, 1989⁸; Martínez y Llanusa, 1998⁹). También está dotado de la capacidad de simular, conjuntamente, la presencia de embalses o lagos que interactúan con el acuífero (Singhofen, 1998¹⁸; Llanusa y Martínez, 2002⁵).

La calibración del modelo (Martínez, 2002, 2004, 2004a)¹¹⁻¹³ se basó en:

- ◆ Reproducir los niveles observados mensuales en el lago.
- ◆ Estimar, mediante métodos hidrológicos convencionales, el aporte subterráneo anual de salida por las fronteras Sur e interior y lograr que el modelo los reprodujera. Lo que incluye el aporte a tres ríos: Amacuzac, Yautepec y Apatlaco.

La estrecha relación existente entre acuífero y lago ya se había puesto de manifiesto en el trabajo de Ortega et. al 1998¹⁵⁻¹⁷. La referida calibración reafirmó este hecho de una forma todavía más evidente por cuanto se trabaja de forma conjunta con el acuífero y el lago conformándose un sistema en el cual participan, además, varios ríos y

Resumen / Abstract

El Lago de Tequesquitengo (Morelos, México) en el siglo XIX tenía un nivel de agua alrededor de 20 metros por debajo del actual y entre 1820-1865 el nivel subió y dejó sumergido el pueblo que había en sus orillas. El autor abordó, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), mediante modelación matemática, el estudio de la interacción entre el lago y el acuífero subyacente. Se construyó un escenario semejante a las condiciones naturales de esa época y se probaron las variantes que supuestamente explicaban el fenómeno, obteniéndose las conclusiones pertinentes. Posteriormente, se analizó una nueva variante que se relaciona con una posible recarga natural accidental desde el acuífero profundo.

Palabras clave: lago, acuífero, simulación conjunta.

The Tequesquitengo Lake water level in XIX century was about 20 meters below present-day levels and within a time period between 1820 and 1865 the lake level gradually increased and the small town existing on its banks was completely submerged. The study of the lake-aquifer interaction was developed by the author working at the Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). In this paper an attempt is made to explain what might have happened in the XIX century. After building a scenario representing natural conditions at that time, two alternatives were tested which presumably were the explanation given to this strange event. Pertaining conclusions were obtained. Finally, a third alternative was analyzed in which a possible natural recharge might had come from the deep aquifer as a result of a natural accident.

Keywords: lake, aquifer, joint simulation.

sus aportes superficiales y subterráneos. Aunque de forma aproximada, se logró una situación calibrada objetiva y consistente, que sirve de base para otros estudios. En efecto, y a partir de los resultados de esa calibración es que se formula el objetivo que consiste en investigar sobre los posibles orígenes de la sobre-elevación que experimentó el lago en el siglo XIX.

■ SITUACIÓN DEL SIGLO XIX

A partir de la situación conocida actual del lago caben las siguientes preguntas:

I. ¿Pudo el trasvase del Colotepec y su empleo en el sistema de riego de Xoxocotla ser la causa de la sobre-elevación del lago a mediados del siglo XIX?

II. En caso negativo, ¿cuál fue la causa de dicha sobre-elevación?

Es que ciertamente resulta de interés práctico y no sólo por mera curiosidad, el darle una explicación a lo ocurrido en el siglo XIX, ya que las causas pueden revelar mecanismos regionales existentes que pudieran aprovecharse en diversos sentidos. En Aguilar (1999)¹ aparece un croquis del lago de Tequesquitengo. Confrontando el croquis mencionado con el gráfico del sondeo presentado en Ortega et al (1998)¹⁵⁻¹⁷ se puede estimar, aunque no con mucha precisión, que el lago se encontraba unos 20 m por debajo de los niveles actuales.

En el presente trabajo se ha incluido la tarea de simular un período histórico de 60 años, tratando de que la situación simulada refleje, de forma fundamentalmente cualitativa, los aspectos esenciales de lo ocurrido a partir de 1820. En esa situación se supone que no hay bombeo en pozos y que, con semejanza a la situación actual, el acuífero y el lago mantienen una estrecha relación. Por lo tanto, tanto el acuífero como el lago deben tener elevaciones del agua unos 20 m por debajo de los niveles actuales. Esta condición del acuífero corresponde más bien a la parte OESTE del modelo ya que, como se ha dicho, hay casi total independencia entre los flujos que provienen del OESTE y del NORTE del modelo, figura 1.

Bajo estas condiciones, sobre el modelo actúan las mismas acciones que antes pero descontando la extracción en los pozos. Sobre el embalse se descuenta la entrega y se modifica la cota superior de vertimiento, que ahora es mucho más alta. Se utilizan los mismos datos de geometría y propiedades que se obtuvieron en la calibración, excepto el estado inicial. Para lograr esta nueva situación del estado inicial requerido se hizo una corrida hipotética, dejando "drenar" el modelo por los contornos Sur e Interior con los contornos NORTE y OESTE como impermeables. También se utilizan las mismas proporciones que se usaron como infiltración a partir de la lluvia pero considerando que no hay riego. Las condiciones de contorno de la modelación se mantuvieron iguales que en

la calibración. Todo esto significa que el modelo conceptual es el mismo de la calibración. Lo que se modifica ahora es lo que tiene que modificarse, o sea, el estado inicial y las acciones exteriores.

En una primera corrida de 60 años no se considera el trasvase del Apatlaco (realmente es el Colotepec). Sería como contemplar el sistema acuífero-lago antes de que existiera dicha obra. Esta corrida se denomina Condiciones Naturales. Para efectuar esta corrida se procesaron las series mensuales de lluvia y evaporación (1953-1985) tomadas de Ortega et. al 1998¹⁵⁻¹⁷ y se obtuvieron sus parámetros estadísticos anuales. Ajustando la distribución log-normal de probabilidades se generó una serie sintética de 60 años por semestres para la lluvia y para la evaporación. El modelo se corrió esta vez con un periodo semestral, o sea, que las corridas tuvieron 120 intervalos de tiempo. El escurrimiento hacia el lago se calculó de la misma forma que antes (a partir de la serie generada de lluvia) pero excluyendo los aportes del trasvase.

La figura 3 ilustra los resultados de Condiciones Naturales. En ella se observan tres gráficos: el primero es la variación semestral del nivel del lago y del nivel medio del acuífero (bajo el lago) durante 60 años. Se observan fluctuaciones anuales normales con períodos de elevación y descenso de carácter hiperanual (multianual). El segundo gráfico es el de la recarga al lago, véase que fluctúan valores positivos y negativos, indicando recarga en ambos sentidos. El tercer gráfico ilustra la variación del volumen total del acuífero. Puede verse que, en general y como tendencia, el acuífero y el lago suben y bajan "juntos" (1^{er} gráfico), que la recarga es negativa cuando el lago está más alto (1^o y 2^o gráficos) y que el almacenamiento total del acuífero muestra un estado de "equilibrio" (3^{er} gráfico).

■ EL TRASVASE

Para simular el efecto del trasvase se utilizaron los mismos datos de la corrida de Condiciones Naturales pero con la adición del riego en la zona de Xoxocotla y un aporte directo al lago a través del canal. El área de riego de Xoxocotla está representada en el modelo por un grupo de triángulos que, en total, tiene un área de 1902 ha = 19.02 km².

Según Solórzano 2002¹⁹ la capacidad de derivación de la presa de Alpuyecá es de unos 1500 l/s. Para simular las consecuencias del trasvase se formularon dos variantes:

I. Derivación completa: se riega con 1000 l/s y se envía al lago por el canal el resto: 500 l/s. Este riego en toda el área representa 1658 mm/año de los cuales se supone una evapotranspiración de 1050 mm (estimado mediante fórmula empírica, TACSA, 1981a)^{20,21} y el resto (608

mm) penetra al acuífero. Como se está usando un intervalo semestral, el acuífero recibe 304 mm por semestre en toda esta área. Esta variante se denomina Riego500.

II. Derivación parcial: se riega igual que en el caso anterior pero lo que se envía al lago por el canal es menor. Se toma un valor semejante al usado en la calibración: 100 l/s. Esta variante se denomina Riego100.

Los resultados para estas dos variantes (Riego500 y Riego100) se ilustran en la figura 4 que presenta los gráficos de la variación del nivel del lago y de la recarga en el periodo simulado y también en la figura 5 que presenta los gráficos de la variación del nivel medio del acuífero bajo el lago y el volumen total de almacenamiento del acuífero. En las propias figuras se incluyen los resultados de las Condiciones Naturales para permitir la comparación y los resultados de otra variante que se explica más adelante.

Del análisis de los gráficos presentados en las figuras 4 y 5 se desprende lo siguiente:

- ◆ La variante Riego500 logra elevar el nivel del lago en casi 20 m en un periodo de unos 20 años. Sin embargo, se observa que la recarga es negativa todo el tiempo (figura 4, segundo gráfico), indicando que el lago está más alto, tal como se observa si se compara la figura 4 (primer gráfico) con la figura 5 (primer gráfico). De hecho la elevación general del agua en el acuífero no sobrepasa los 3 metros por encima del nivel de Condiciones Naturales. Esta variante conduce a una situación que no puede considerarse reflejo de lo que realmente sucedió: tanto porque la diferencia de niveles entre el lago y el acuífero es exagerada como porque el lago es el que está por encima.

- ◆ La variante Riego100 no logra elevar el nivel del lago más allá de unos 5 m por encima del nivel de Condiciones Naturales. Se observa que la recarga sigue siendo negativa todo el tiempo aunque mucho menor que en la variante anterior. La elevación general del agua en el acuífero queda en una posición intermedia entre Condiciones Naturales y Riego500. Esta variante tampoco ilustra una situación que pueda considerarse semejante a lo que debió suceder porque no logra elevar las aguas en la medida en que ocurrió realmente.

¿Pudo el trasvase del Colotepec y su empleo en el sistema de riego de Xoxocotla ser la causa de la sobre-elevación del lago a mediados del siglo XIX?

Parece evidente que la respuesta a esta pregunta es negativa ya que, dentro de las limitaciones del riego y del canal, no se infiere posibilidad alguna de lograr el llenado del acuífero y del lago simultáneamente incluyendo la parte acuífera del Oeste. De la descripción de cómo funciona regionalmente el sistema se desprende que los niveles del lago y el nivel medio del acuífero, en la zona bajo el lago, son similares y muy cercanos. Las fluctuaciones estacionales pueden situar a uno por encima del otro y viceversa pero en poca magnitud. Si el nivel del agua en

el acuífero está por encima del nivel del lago (que es lo que ocurre la mayor parte del año), entonces el acuífero "inyecta" agua al lago. Si el lago está más alto que el acuífero, el lago está drenando hacia el acuífero. Si el sistema lago-acuífero es una unidad que funciona muy estrechamente unida, no puede aceptarse como factible una variante en que el nivel del agua en el acuífero esté más de 15 m por debajo del nivel del lago. En la hipótesis de este caso, el agua que hace elevar el nivel del lago salió de una cuenca vecina mediante la derivación y el riego. Pero esta agua es incapaz de hacer elevar el nivel del agua en el acuífero!!!

EL ACUÍFERO PROFUNDO

Ya se mencionó anteriormente sobre la existencia de un acuífero confinado profundo con las siguientes características, figura 2:

- ◆ Le sobreyace un estrato relativamente impermeable que lo separa del acuífero superior freático, que es el que se ha venido modelando aquí.

- ◆ Estos dos estratos superiores mencionados tienen un espesor entre 100 y 200 m.

- ◆ El acuífero confinado profundo parece tener un espesor considerable (quizás más de 500-1000 m)

- ◆ Al parecer, permanece no explotado (ni siquiera explorado) hasta hoy y se manifiesta superficialmente a través de manantiales y afloramientos aislados (García, 2002)².

- ◆ Su recarga proviene de la sierra de Chichinautzin al Norte. Esta zona de recarga se encuentra en el lugar de mayor precipitación de la región y, además, se estima (Morales Casique, 1997)¹⁴ que se infiltra el 35-50% al subsuelo. Esta alta tasa de infiltración parece corroborarse por la ausencia de arroyos en estas partes altas de los valles (Gutiérrez, 2002)³.

- ◆ El recorrido del agua a través del acuífero confinado profundo hasta la zona del valle demora un tiempo que se mide en años (Morales Casique, 1997).

Teniendo en cuenta lo anterior hay muchos indicios que sugieren la posibilidad de que este acuífero profundo, lenta pero constantemente, esté alimentando al acuífero superior freático. A partir de todo este razonamiento, se consideró oportuno evaluar la variante de recarga vertical hacia arriba desde el acuífero profundo y hacer una simulación provocando ese efecto en el modelo. Y, por supuesto, comparar sus resultados con las variantes anteriores. Esta variante se denominó Acuífero Profundo. Los resultados se muestran en las figuras 4 y 5. En el primer gráfico de la figura 4 se muestra que el lago también sube casi los 20 m pero ahora en un periodo de quizás más de 30 años antes de llegar a una situación más estable. En el segundo gráfico de la figura 4 se observa la recarga, que es ahora positiva todo el tiempo, lo cual está más acorde con la realidad. Puede argumentarse que la recarga even-

tualmente puede ser negativa (del lago al acuífero) y es cierto, pero también faltan por ocurrir más de 100 años hasta llegar a la situación actual. En los dos gráficos de la figura 5 para esta variante ahora sí se observa que el acuífero se "rellena" hasta niveles ligeramente superiores al lago y llegando hasta una situación de estabilidad. En estos cuatro gráficos y su comparación con las variantes anteriores se muestra una evidencia de que la causa de la sobre-elevación del lago puede perfectamente haber sido provocada por este fenómeno que se ha descrito, en relación con la comunicación desde el acuífero profundo.

En caso negativo, ¿cuál fue la causa de dicha sobre-elevación?

En opinión de este autor la causa de la sobre-elevación sólo puede explicarse de la forma que se ha argumentado en este apartado. Para ampliar el análisis puede señalarse que no existe contradicción entre el hecho de que se ha considerado impermeable el estrato que separa los dos acuíferos con el hecho de que en la segunda parte se "abre" una conexión entre dichos acuíferos.

CONCLUSIONES

1) Con el modelo calibrado, se realizan simulaciones hipotéticas de un periodo de 60 años con el fin de investigar el origen del llenado del lago en el siglo XIX. Se concluye que el trasvase del río Colotepec para el riego de la zona de Xoxocotla no es la causa de la sobre-elevación del lago porque conduce, de acuerdo con los resultados del modelo, a situaciones que se alejan mucho de la realidad.

2) Aunque no hay comprobación experimental posible en estos momentos, se esboza la explicación del acuífero profundo como causa de la sobre-elevación y se comprueba con el modelo que conduce a una situación mucho más cercana a la realidad.

3) Es posible continuar profundizando en esta investigación en varias direcciones que se han esbozado en ambas partes del presente trabajo. También podría sugerirse la conformación de un modelo ampliado en espacio que pudiera abarcar, al máximo posible, la extensión de los acuíferos involucrados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, S. *Ecología del Estado de Morelos-un enfoque geográfico*, Editorial Praxis, México, 2ª. Edición, 1999.
2. García, A., *Comunicación personal*, CNA, Cuernavaca, 2002.
3. Gutiérrez, C., *Comunicación personal*, IMTA, Cuernavaca, 2002.
4. Llanusa, H., *Ampliación de la Tecnología AQÜIMPE: Acciones sobre el Sistema Acuífero en la Modelación Matemática*, Tesis Doctoral, CIH, ISPJAE, Habana, Cuba, 1997.

5. Llanusa, H. y Martínez, J.B. *Modelación Explícita de Embalse y Acuífero*, Ingeniería Hidráulica en México, vol.XVII, no. 4, pp. 89-97, oct-dic. 2002.

6. Llanusa, H., et. al.: *Guía de usuario del programa AQÜIMPE*, Monografía, CIH, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988b.

7. Llanusa, H., et. al.: *Metodología para la calibración de Modelos Matemáticos de acuíferos subterráneos*, Monografía, CIH, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988a.

8. Martínez, J.B., *Simulación matemática de cuencas subterráneas: Flujo impermanente bidimensional*, Monografía, CIH, ISPJAE, Habana, Cuba, 1989.

9. Martínez, J.B. y Llanusa, H., *Interacción entre Acuífero y Embalse en el sistema AQÜIMPE*, Monografía, CIH, ISPJAE, Habana, Cuba, 1998.

10. Martínez, J.B., *Reflexiones sobre la modelación de acuíferos en las condiciones de Cuba*, Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de la IAHR, Palacio de las Convenciones, Ciudad de La Habana, 1988, pp. 264-271.

11. Martínez, J.B. *Estudio del Intercambio de Aguas entre el Lago Tequesquitengo y el Acuífero Subyacente*, Informe de Investigación, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA), Coordinación de Tecnología Hidrológica, Noviembre 2002.

12. Martínez, J.B. *¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el Lago Tequesquitengo? 1. Calibración de un modelo del sistema hidrológico*, Ingeniería Hidráulica en México, vol.XIX, no. 4, oct-dic. 2004.

13. Martínez, J.B. *¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el Lago Tequesquitengo? 2. Simulación de eventos en el Siglo XIX*, Ingeniería Hidráulica en México, vol.XIX, no. 4, oct-dic. 2004a.

14. Morales Casique, E., *Análisis Numérico de Flujo Regional de Agua Subterránea: cuenca del río Amacuzac*, Tesis de Maestría en Aguas Subterráneas, Posgrado de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 1997.

15. Ortega, M. A., *Las Condiciones de Frontera Hidráulicas Naturales en la Cuenca de México, usando modelo matemático*, Geofísica Internacional, vol.28, no.2, pp. 283-295, México, D.F., 1989.

16. Ortega, V. ; Solórzano, J.C. y Maya, P. *Factibilidad de restituir artificialmente las pérdidas de agua en el Lago Tequesquitengo: Morelos*, CNA, Gerencia Regional Balsas, Subgerencia Regional Técnica, Cuernavaca, Morelos, Oct. 1998.

17. Ortega, V., *Comunicación personal*, CNA, Cuernavaca, 2002.

18. Singhofen & Associates, Inc. (Stormwater Management and Civil Engineering). *Sawmill Pond / Horseshoe Lake / Crooked Lake Interconnection Study*, Report prepared for Orange County Stormwater Management Department, Orlando, Florida, November 1998.

19. Solórzano, J.C., *Comunicación personal*, CNA, Cuernavaca, 2002.

20. TACSA (Técnicos Asesores y Constructores S. A.), *Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Cuernavaca, en el Estado de Morelos*, SARH (Secr. de Agric. y Rec. Hidr.), México, 1981a.

21. TACSA (Técnicos Asesores y Constructores S. A.), *Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Zacatepec, en el Estado de Morelos*, SARH (Secr. de Agric. y Rec. Hidr.), México, 1981b.

FIGURA- 1: Ubicación del Área de Estudio sobre Mapa Topográfico

(escala 1: 250 000)

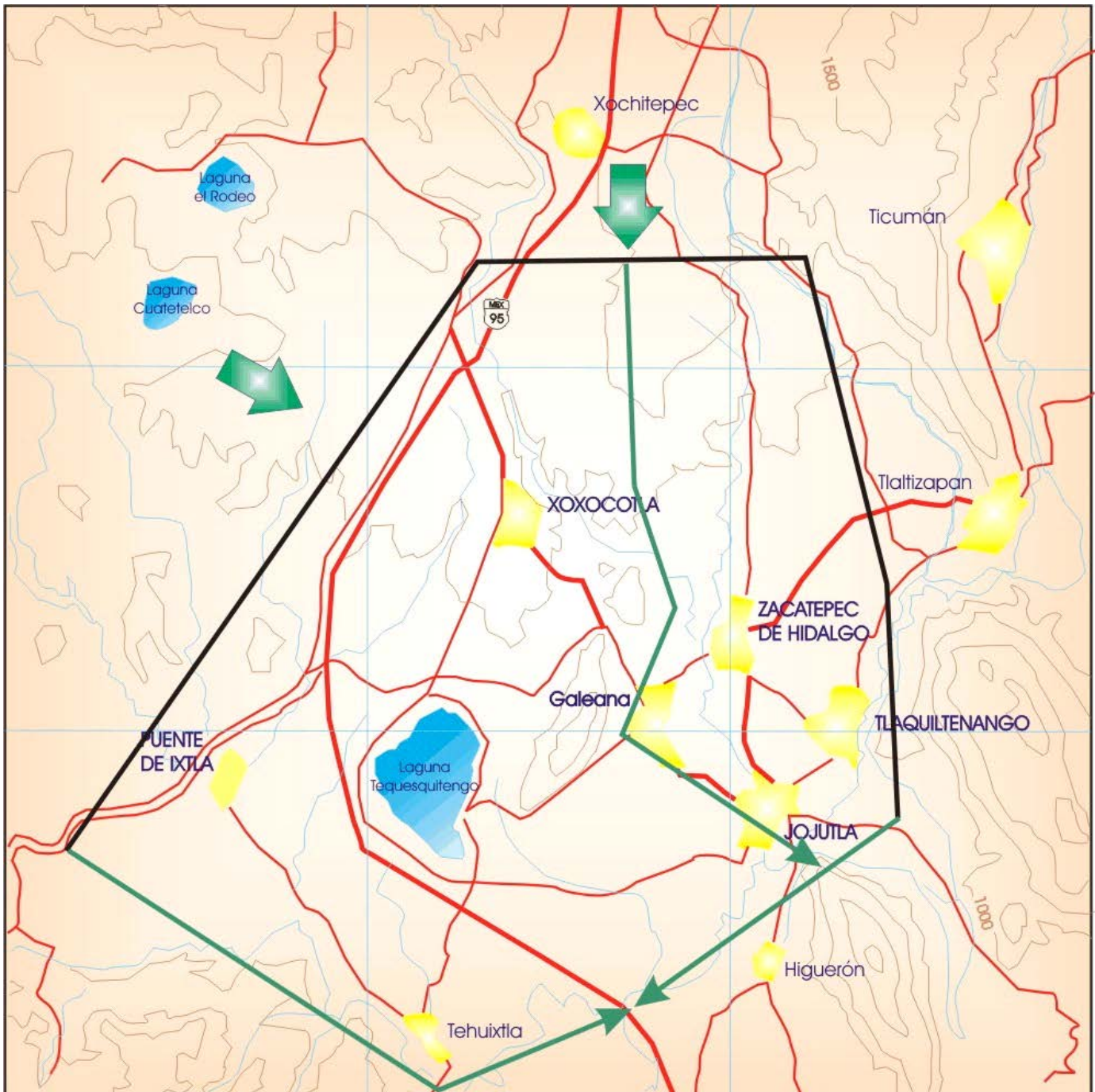
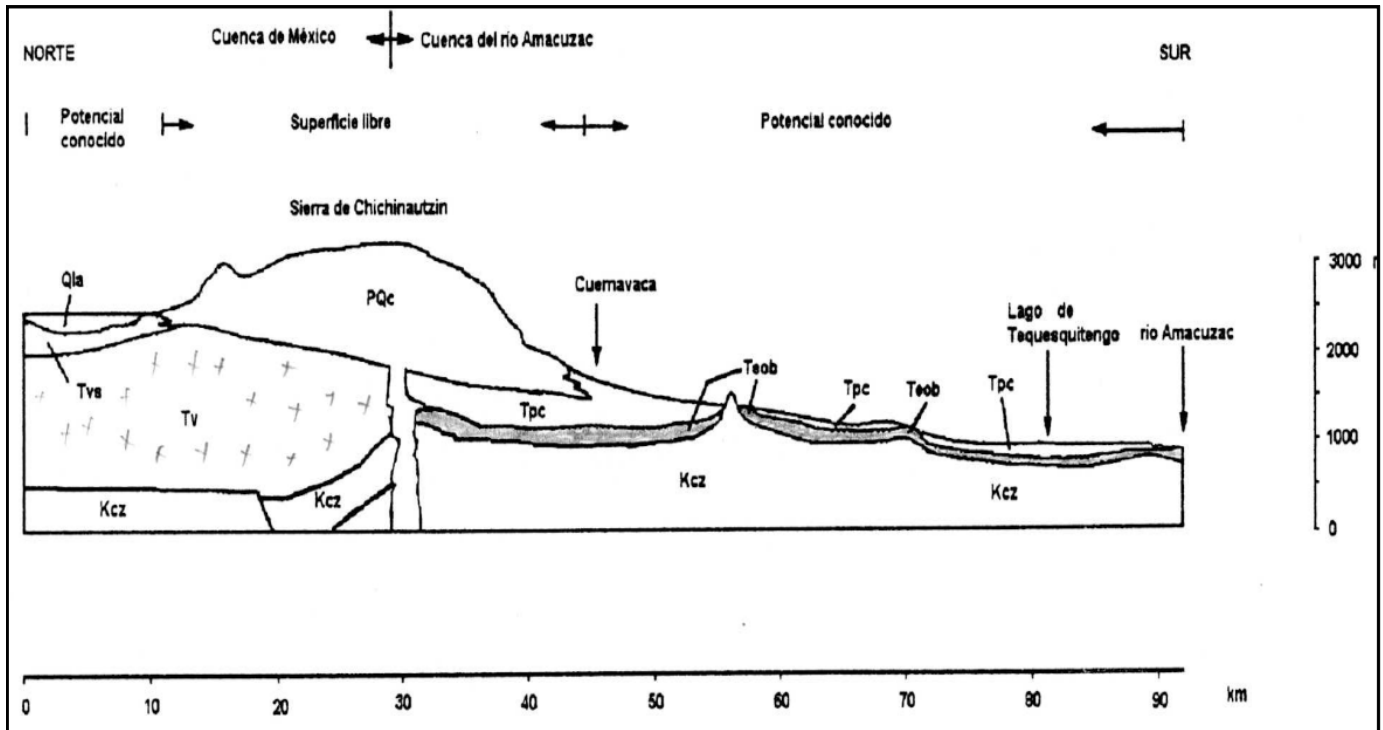


FIGURA- 2: Sección geohidrológica Norte-Sur de la zona oeste del estado de Morelos (tomada de Ortega et. al. 199816)



Leyenda:

- Tpc** – acuífero en formación Cuernavaca
- PQc** – acuífero en formación Chichinautzin
- Teob** – acuitardo formación Balsas-Mexcala
- Kcz** – acuífero en rocas carbonatadas
- Tvs** – acuífero en rocas volcano-sedimentarias
- Tv** – acuitardo en rocas volcánicas Terciarias
- Qla** – aluviones Cuaternarios

Nota:

Para mayor detalle en la descripción geológica se pueden consultar las referencias:
 TACSA 1981a TACSA 1981b

FIGURA- 3: Simulación de Condiciones Naturales en el siglo XIX.

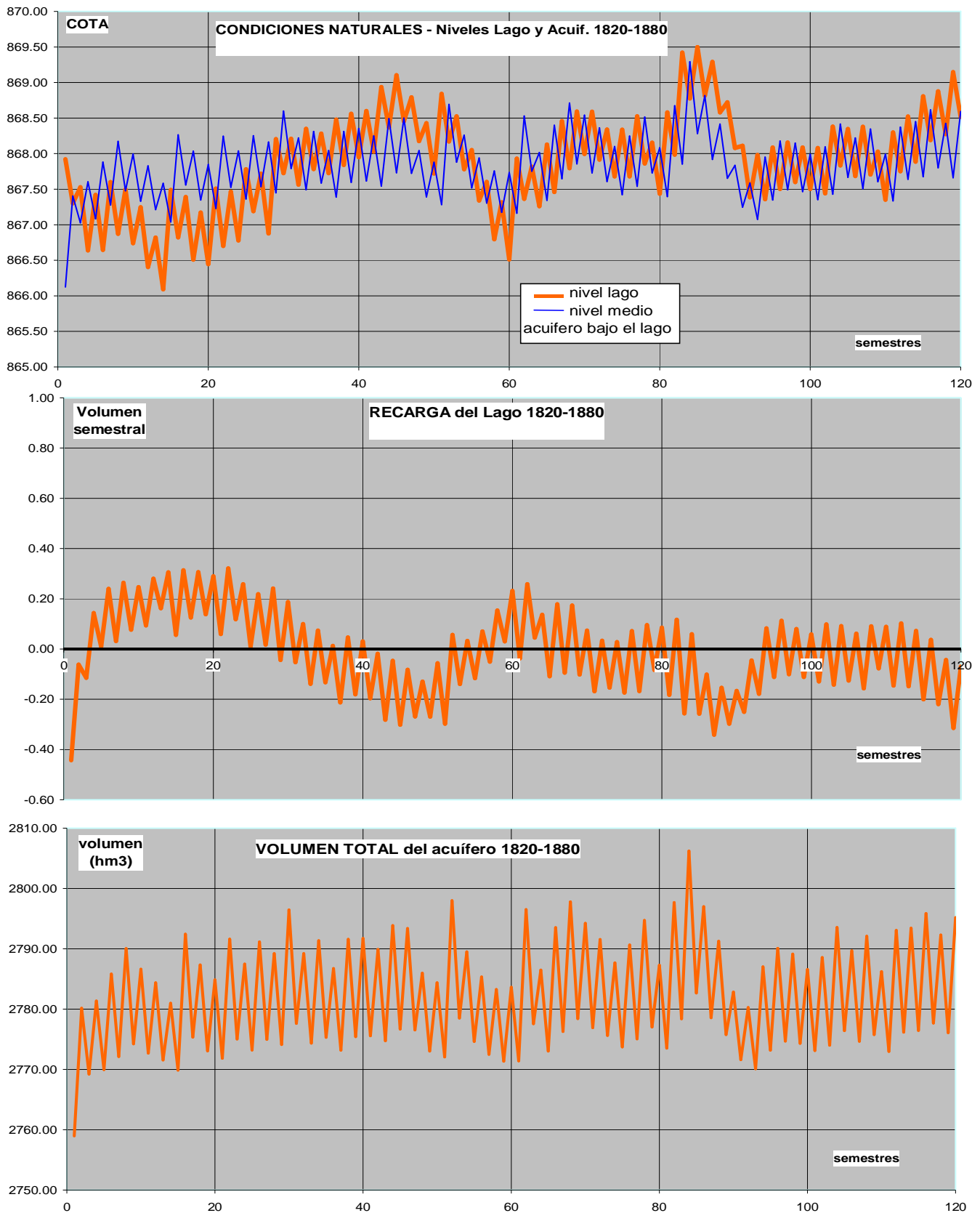


FIGURA- 4: Nivel del Lago y Recarga en variantes Riego500, Riego100 y Acuífero Profundo

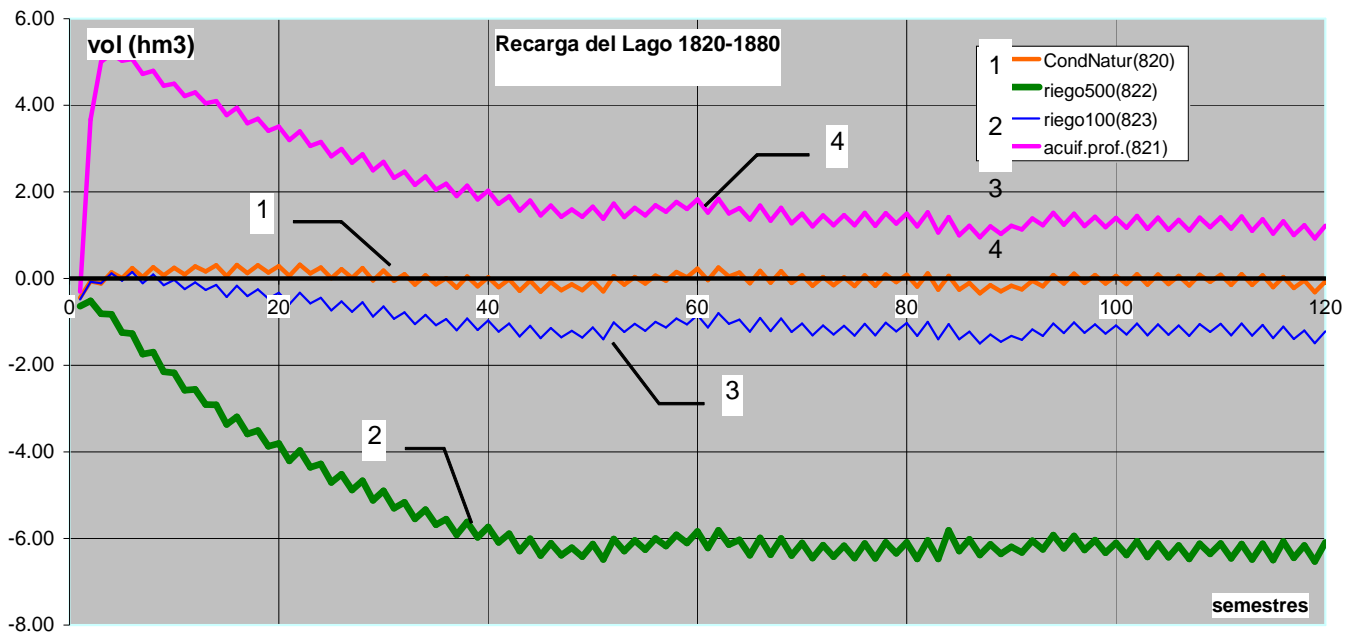
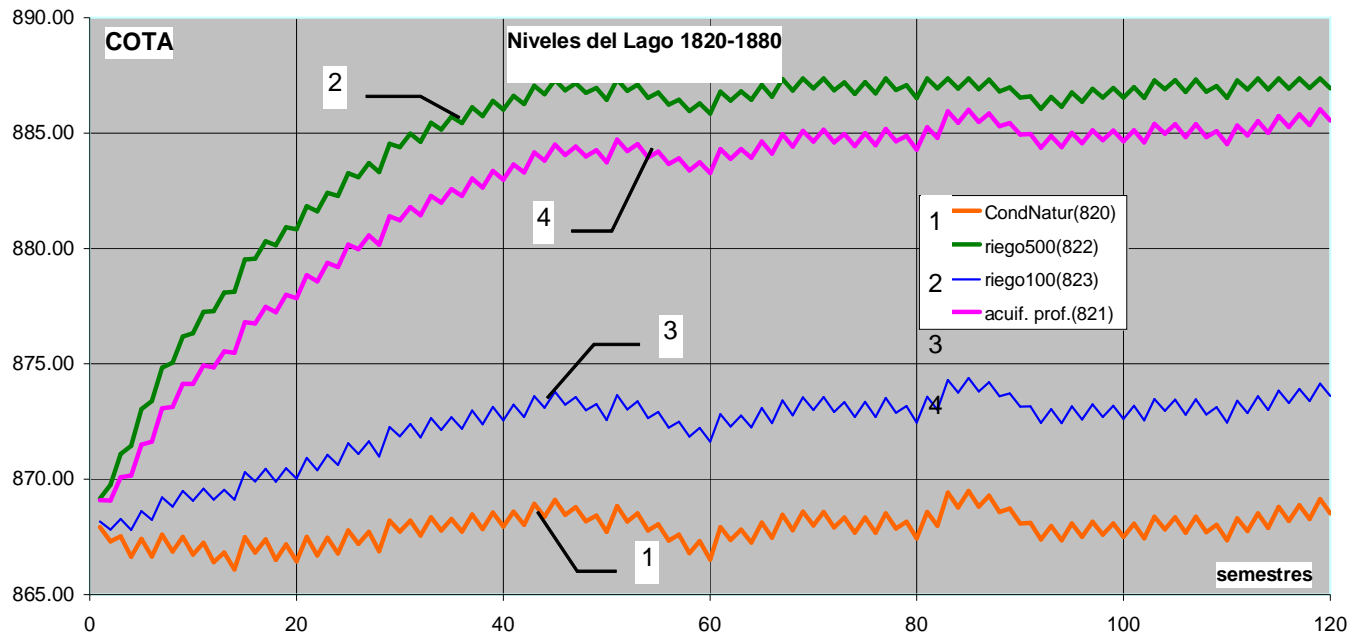


FIGURA- 5: Nivel de Acuífero y Vol.Total en variantes Riego500, Riego100 y Acuífero Profundo

