

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Producción de un bien medioambiental en el lago de Chapala y abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guadalajara: un análisis de simulación con un modelo de redes.
<i>Autor / Adscripción</i>	Héctor Manuel Bravo Pérez Universidad Nacional Autónoma de México Juan Carlos Castro Ramírez Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Miguel Ángel Gutiérrez Andrade Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 23(2): 135-145
<i>Fecha de publicación</i>	2008
<i>Resumen</i>	En este trabajo se presenta una evaluación ex-ante beneficio-costos de un proyecto en donde se contempla la posible transferencia de agua de la agricultura de riego en el estado de Guanajuato, México, hacia el lago de Chapala, mediante el funcionamiento de un banco de agua. Este trabajo se divide en cuatro secciones; en la primera se presentan los antecedentes tanto teóricos como empíricos; en la segunda se describen los beneficios y costos que intervienen en el análisis, así como los escenarios que se construyen para cubrir las distintas posibilidades de funcionamiento del banco de agua; en tercer término se presentan los resultados de la evaluación y, finalmente, en la cuarta parte se muestran las conclusiones.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1183

Producción de un bien medioambiental en el lago de Chapala y abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guadalajara: un análisis de simulación con un modelo de redes

Héctor Manuel Bravo-Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Carlos Castro-Ramírez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Miguel Ángel Gutiérrez-Andrade

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México

En este trabajo se presenta una evaluación ex-ante beneficio-costo de un proyecto en donde se contempla la posible transferencia de agua de la agricultura de riego en el estado de Guanajuato, México, hacia el lago de Chapala, mediante el funcionamiento de un banco de agua. Los beneficios y costos se calculan con base en dos modelos: un modelo matemático de redes y un modelo económico para la determinación del precio del agua en la agricultura. Tanto los beneficios como los costos se calculan tomando en consideración los efectos medioambientales, por un lado, y los efectos económicos en la producción agrícola, por el otro. El agua almacenada en el banco de agua tiene dos usos: un uso medioambiental mientras permanece almacenada, no consuntivo y uso potable, así como uso consuntivo cuando posteriormente se vende al Organismo Operador de Guadalajara, a fin de coadyuvar en el suministro de agua potable a esa ciudad. Este trabajo se divide en cuatro secciones; en la primera se presentan los antecedentes tanto teóricos como empíricos que dan lugar a la realización de este trabajo; en la segunda parte se describen los beneficios y costos que intervienen en el análisis, así como los escenarios que se construyen para cubrir las distintas posibilidades de funcionamiento del banco de agua; en tercer término se presentan los resultados de la evaluación y, finalmente, en la cuarta parte se muestran las conclusiones. En un anexo se describe detalladamente el modelo de redes con el que se simuló el comportamiento del lago de Chapala.

Palabras clave: demanda ecológica, optimización, flujo en redes, asignación eficiente del agua, precio del agua, valoración contingente y planeación hidráulica.

Antecedentes

La literatura relevante sobre el tema de la regulación ambiental del agua se enfoca principalmente a revisar los instrumentos económicos de control de la contaminación o del funcionamiento de las distintas instituciones para

aplicar las políticas de internalización de las externalidades (Cropper y Oates, 1992). El origen de la producción excesiva de contaminación es la falta de mercados por contaminación. El caso que ahora nos ocupa es distinto, la ineficiencia en la asignación surge por la falta de un mercado que no tiene que ver con la calidad sino con la

cantidad del agua (Freebairn, 2003; De Azevedo y Baltar, 2005). La inexistencia de ese mercado y, por ende, la asignación ineficiente del recurso entre los agentes en la cuenca se debe a distintas razones: 1) la ambigüedad en la definición de los derechos de propiedad del agua en la legislación mexicana, 2) la gratuidad del agua en el uso agrícola y, sobre todo, 3) la falta de representación institucional de un agente que defienda los intereses del lago de Chapala, México, en las decisiones del Consejo de Cuenca Lerma-Chapala.

En el año 2002, un grupo de economistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) propuso la aplicación de un banco de agua para asegurar una dotación mínima de agua al lago de Chapala (para una mayor claridad del funcionamiento de un banco de agua, véase Department of Water Resources, 1991). Un año después, continuando con esta línea de trabajo, Bravo *et al.* (2005) establecen la posibilidad de aplicar un banco de agua al estilo de California, Estados Unidos, para rescatar el lago de Chapala; dicho trabajo pionero es el antecedente inmediato del presente.

El proceso de asignación del agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala se ha hecho siguiendo las pautas marcadas en el Convenio de Asignación de Aguas Superficiales para la Cuenca. Tal convenio se aplica cada año y toma en consideración tanto la oferta —precipitación y evaporación— como la demanda, principalmente del sector agrícola.

Una dificultad adicional surge del hecho de que el agua puede tener distintos tipos de uso; algunos de ellos, como el medioambiental, bien puede considerarse un bien público en el sentido de Samuelson (1954). En otros casos —la mayoría—, cuando el agua tiene un uso consuntivo positivo, la exclusión y rivalidad que se presentan en su utilización le da características de bien privado.

Las condiciones de asignación eficiente varían para cada caso. Si se trata de un bien privado, la máxima eficiencia se logra cuando los beneficios marginales entre todos los usos y todos los agentes se igualan entre sí y, a su vez, entre los precios relativos. Al tratarse de un bien público, la suma de los beneficios marginales de los distintos agentes es la que se debe igualar a los costos marginales de producción para obtener una asignación eficiente.

En el caso que nos ocupa, compiten por el agua dos usos con características económicas distintas: el agua como factor de la producción en la agricultura de Guanajuato, México, y el agua como generador de un bien medioambiental cuando se deposita en el lago de Chapala.

Al igual que en el resto del país, en esta cuenca el principal usuario de las aguas nacionales es el sector

agrícola; por tanto, discutir cómo se asigna el agua entre los estados de la república mexicana que forman la cuenca define en gran medida cuánta agua se asigna a la agricultura en cada ciclo. Por otro lado, los agricultores sólo pagan parcialmente por la operación y el mantenimiento de las obras de infraestructura que utilizan, generándose grandes problemas de ineficiencia en la asignación del recurso, al ser la agricultura el mayor usuario de las aguas nacionales.

El agua para consumo humano enfrenta una problemática muy distinta. Los gobiernos municipales o estatales son los que se encargan de proporcionar el servicio, para lo cual crean empresas privadas, públicas o mixtas, con mayor o menor independencia en su operación. Tanto las tarifas como las políticas que fijan estas empresas no están determinadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA), a pesar de lo cual tienen la obligación de pagar un derecho por el agua que utilizan como insumo en su proceso productivo.

En el año 2006, un organismo operador como el que proporciona agua a la ciudad de Guadalajara, México, tendría que pagar a la CNA 290.61 pesos por cada mil metros cúbicos si se consumen, en promedio, menos de trescientos litros por habitante al día y 581.22 pesos por cada mil metros cúbicos si se excede este volumen. Mientras que el Organismo Operador de Agua Potable de Guadalajara cobra a los habitantes de esa ciudad 34.00 pesos si consumen menos de 17 metros cúbicos al mes y a partir de este volumen marca una tarifa creciente con el volumen, llegando a ser de 18.80 pesos por metro cúbico cuando se exceden los 250 metros cúbicos (Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, 2006).

Por otro lado, dado que no hay un mercado para intercambiar el bien medioambiental que produce el lago, no existen incentivos para asignar, a través del mecanismo del mercado, agua al lago (Oster y Wichelns, 2003). La existencia de un banco del agua se justifica a partir del hecho de que el mercado de agua desregulado no puede resolver el problema de asignación de agua al lago de Chapala. Es decir, se asume que un planificador central (CNA) interviene, asignando agua al lago de Chapala para producir un bien medioambiental, comprándosela a los agricultores en épocas de abundancia y vendiéndola al organismo operador de Guadalajara en tiempo de escasez.

En este trabajo se analizan tres posibles escenarios en el funcionamiento del banco. En los tres, la estructura burocrática propuesta es mínima y contingente a la pertinencia del banco. Para determinar los niveles de agua en el lago resultantes de cada escenario, se desarrolló un modelo de redes que se muestra en el anexo.

Identificación de beneficios y costos. Elaboración de escenarios

Se aproximó el precio del agua en la agricultura a través de su costo de oportunidad, para lo cual se utilizó el algoritmo desarrollado por Bravo *et al.* (2005). Se presentan dos clases de beneficio en este proyecto: el derivado de la producción del bien medio ambiental generado al almacenar agua en el lago de Chapala y el derivado de asegurar agua potable para la ciudad de Guadalajara. Esto se logra a partir del hecho de disminuir el agua en el riego agrícola, lo cual constituye el principal costo económico, con fines de evaluación; a éste se le adicionan los costos de administración. Los costos de bombeo del lago de Chapala a la ciudad de Guadalajara no se incorporan en el análisis, ya que son los mismos en los tres escenarios debido a que el volumen bombeado a Guadalajara está determinado por la capacidad del acueducto a través del cual se conduce agua del lago de Chapala a dicha urbe.

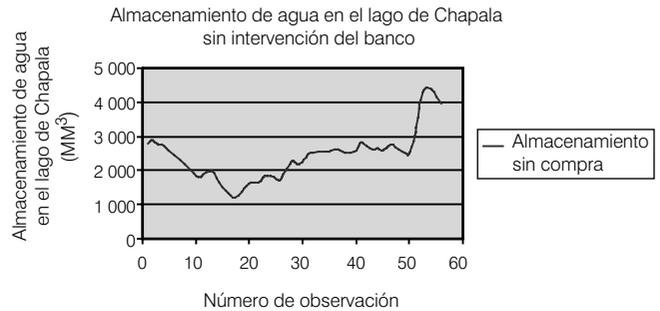
Los beneficios medioambientales se calculan a través de un estudio de valoración contingente, para lo cual se retoman los resultados del estudio *Evaluación económica y valoración social de los escenarios de manejo del agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala*, IMTA de Olaiz (2003), en el cual, a partir de una encuesta diseñada ex profeso, se calculó la disposición a pagar por los bienes medioambientales que producen el lago de Chapala y el río Lerma.

Los beneficios derivados de la venta de agua al organismo operador de agua potable de Guadalajara se calculan con el auxilio de un modelo de flujo en redes (véase el anexo).

En la ilustración 1 se muestra el comportamiento histórico del nivel del almacenamiento de agua en el lago de Chapala. En todos los escenarios se considera la compra de agua de derechos temporales a los agricultores de Guanajuato, mantener durante un cierto tiempo el agua en el lago y después venderla a la ciudad de Guadalajara, para asegurar el abastecimiento de agua potable a dicha ciudad. Bajo la premisa de buscar los costos de administración más bajos, con el mínimo personal empleado, considerando que hay sólo un gerente y un ayudante, se calcula un presupuesto de operación anual de 5.264 millones de pesos.

Se sabe también que existen oferentes netos de derechos de agua: agricultores que sufren pérdidas económicas, principalmente aquellos que se dedican a la producción de maíz y trigo; por otra parte, existen demandantes netos de agua que, independientemente del ciclo hidrológico, están dispuestos a adquirir derechos: agricultores cuyo volumen demandado es

Ilustración 1. Almacenamiento de agua en el lago de Chapala sin intervención del banco.



superior al volumen concesionado por la CNA y ciudades cuyo crecimiento demográfico les exige contar con volúmenes de agua mayores a los concesionados. Al finalizar el ciclo de abundancia y al comenzar la escasez, el banco vendería el agua acumulada durante el periodo húmedo. Los volúmenes de agua acumulados durante el periodo de compra servirán para asegurar la cantidad mínima para arrancar el banco en el primer año del nuevo periodo de humedad y el remanente se mandará al lago. Durante este periodo, el banco suspenderá sus funciones.

Dado el carácter positivo del presente análisis, se construyen tres escenarios de funcionamiento posible del lago, estos escenarios cubren los comportamientos más extremos del banco.

Escenario 1

El volumen total de agua que se propone comprar para el banco de agua es de 34.2 millones de metros cúbicos al año, cantidad que se puede ahorrar al sustituir la tecnología actual, muy consumidora de agua, por sistemas de riego ahorradores de agua (véase cuadro 1). En este escenario no se reduce la producción agrícola, por tanto, los costos en los que se incurre son sólo por la inversión en el cambio de la tecnología de riego.

Utilizando el algoritmo presentado en Bravo *et al.* (2005), con el cual se calcula el precio de oportunidad del agua en la agricultura, se determina que este volumen sería susceptible de ser vendido por los agricultores al banco a un precio de 0.03 pesos por metro cúbico, por lo que en total se requeriría de 1.03 millones de pesos para la adquisición del agua; por otra parte, se necesita una inversión de 46 000.00 pesos por hectárea para modificar la tecnología, misma que será depreciada en veinte años, es decir, se demandaría una inversión para el cambio tecnológico de 81 millones de pesos anuales. Si se agrega esta cantidad al presupuesto anual de operación del banco, que es de 5.3 millones

Cuadro 1. Estimación de los volúmenes de agua susceptible de venderse en el banco de agua de la región Lerma-Chapala, escenario 1.

**Estimación de los volúmenes de agua que se emplean para el cultivo de hortalizas y frutas
y que se pueden ahorrar empleando sistemas de riego tecnificado.
Volumen total**

Distrito de riego	Superficie regada (ha)	Volumen bruto total (m³)	Volumen neto total (m³)	Volumen necesitado o aprovechado (m³)	Volumen ahorrado y susceptible de venderse (m³)
Alto río Lerma	10 821.00	99 141 400.83	82 750 213.37	70 337 681.36	12 412 532.01
Morelia	204.00	3 742 905.06	1 971 047.06	1 675 390.00	295 657.06
Ciénega	1 541.00	13 296 788.47	7 382 583.45	6 275 195.93	1 107 387.52
Edo. de México	8.00	18 500.00	18 500.00	15 725.00	2 775.00
Tuxpan-Maravatío	1 546.00	34 125 202.00	18 673 133.33	15 872 163.33	2 800 970.00
Zamora	4 918.00	124 276 912.54	86 791 210.72	73 772 529.12	13 018 681.61
La Begoña	1 006.00	7 997 584.61	5 843 946.15	4 967 354.23	876 591.92
Rosario	4 866.00	28 867 982.73	24 364 208.91	20 709 577.58	3 654 631.34
Total*	24 910.00	311 467 276.24	227 794 842.99	193 625 616.55	34 169 226.46

Fuente: IMTA.

Nota: *volumen de agua que se puede ahorrar en cultivos de hortalizas y frutas, empleando sistemas de riego tecnificado, como los sistemas por aspersión, microaspersión y goteo que cuentan con eficiencias de aplicación del 85 y 95%.

de pesos, se necesitaría de 87.3 millones de pesos por año para que el banco funcionara y adquiriera los volúmenes de agua programadas. Este proceso se repetiría durante cinco años, lo que en promedio dura el ciclo hidrológico de abundancia; al sexto año, el primer año de secas, se habrían acumulado en el banco 1 229 Mm³ si se suministraran a Guadalajara los 250 Mm³ que solicita al lago, vendiéndolo al organismo operador de Guadalajara en 0.29 pesos por metro cúbico, cantidad que el organismo operador debe pagar a la CNA. Obtendríamos los resultados mostrados en el cuadro 2.

Aplicando el algoritmo de redes descrito anteriormente, puede observarse en la ilustración 2 el resultado de operar el banco con la regla definida en el escenario

1; nótese que el volumen mínimo, que se da alrededor de la observación veinte, es de aproximadamente 1 700 MM³, mientras que el mínimo sin banco es de alrededor de 1 200 MM³.

Como puede observarse, la relación beneficio/costo es menor que 1, con lo cual puede concluirse que en la política propuesta en este escenario no es financiable con la venta de agua a la ciudad de Guadalajara.

Escenario 2

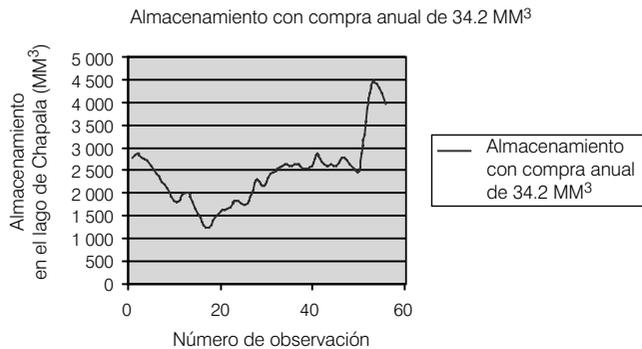
El agua que se puede vender es el total del líquido asignado al uso agrícola en los distritos de riego, es decir, 1 628 Mm³. El precio al que se comprarían los

Cuadro 2. Cálculo de la relación beneficio/costo, escenario 1.

Año	Costos de inversión	Gasto administrativo	Costos de adquisición de agua	Beneficio medioambiental	Venta a Guadalajara
0	81	5.3	1.03	0	
1	81	4.6429	1.03	27.6786	
2	81	4.1454	1.03	22.3214	
3	81	3.7013	1.03	41.995	
4	81	3.3047	1.03	58.4677	
5	81	2.9506	1.03	52.2033	
6					36.7308
Total	486	24.0449	6.18	202.666	36.7308
B/C	0.4637452				

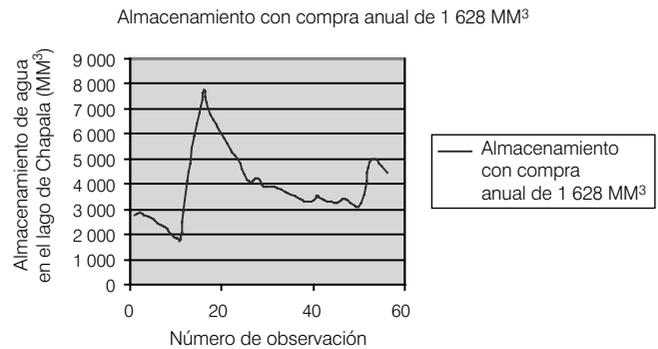
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 2. Almacenamiento con compra anual de 171.8 MM³.



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 3. Almacenamiento con compra anual de 1 628 MM³.



Fuente: elaboración propia.

derechos sería de 3.16 pesos por metro cúbico, por lo que se requerirían 5 135 millones de pesos anuales, que aunados al presupuesto anual de operación del banco, dan un total de 5 141 millones de pesos anuales. En este caso no hay inversión para modificar la tecnología. Al igual que en el caso anterior, el banco compraría agua durante cinco años, que es lo que se espera dure el ciclo hidrológico de abundancia, por lo que se necesitaría en total la cantidad de 25 704 millones de pesos para financiar las actividades del banco de agua durante los primeros cinco años. Al sexto año, cada metro cúbico se vendería en 94.69 pesos por metro cúbico, habiéndose acumulado un total de 6 288 Mm³ y se colocaría en el mercado de agua un total 4 070 Mm³.

De esta manera, durante el periodo de sequía, el lago de Chapala tendría asegurada dicha cantidad, que se podría distribuir como convenga en los años secos. En este escenario se garantizaría el límite mínimo de aportación al lago de Chapala para asegurar su sustentabilidad, a costa de acabar con la agricultura de la cuenca.

El efecto de la aplicación de esta política modifica totalmente el patrón resultante del ciclo hidrológico, como puede observarse en la ilustración 3.

El mínimo, que se da alrededor del año veinte, ahora es un máximo, que alcanza cerca de 7 500 MM³ de volumen almacenado en el lago; el volumen mínimo se alcanza alrededor de la observación 12, con un nivel de agua en el lago de poco menos de 2 000 MM³. La relación beneficio/costo de este escenario es de apenas 0.1012, por lo que se concluye que este escenario no es socialmente conveniente. Para que la relación beneficio/costo fuera igual a la unidad, se debería vender el agua a Guadalajara a un precio de 189 pesos por metro cúbico, lo cual lo hace evidentemente inviable (véase cuadro 3).

Escenario 3

En este escenario se considera que los usuarios tienen concesiones que amparan volúmenes superiores o inferiores a los realmente demandados (utilizados) y que el banco puede adquirir los volúmenes que no estén

Cuadro 3. Cálculo de la relación beneficio/costo, escenario 2.

Año	Pérdida en agricultura	Gasto administrativo	Beneficio medioambiental	Venta a Guadalajara
0	5 135.0000	5.2000	0.0000	0.0000
1	4 584.8214	4.6429	418.9821	
2	4 093.5906	4.1454	499.3144	
3	3 654.9916	3.7013	477.2914	
4	3 263.3853	3.3047	485.2943	
5	2 913.7369	2.9506	477.8642	
6				36.7308
Total	23 645.5258	23.9448	2 358.7464	36.7308
B/C	0.1012			

Fuente: elaboración propia.

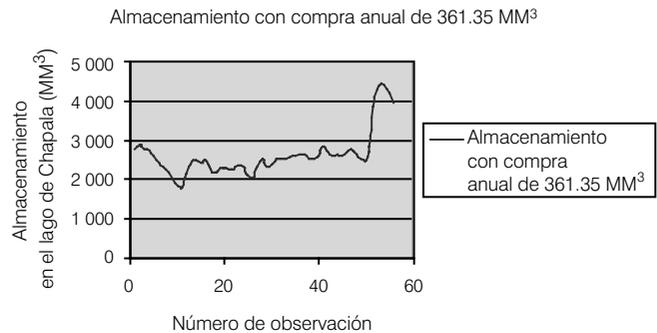
concesionados o aquellos que, estando concesionados, no se utilicen (demanden) en la producción. En el cuadro 4 puede observarse que en algunos distritos, como en el alto río Lerma, el volumen bruto total (demandado) es superior al volumen total concesionado en 137.9 Mm³, mientras que en el distrito de Zamora, el agua que no se utiliza, del total de volumen concesionado, es de 44.1 Mm³.

El volumen total susceptible de venta en toda la cuenca Lerma-Chapala es de 361.35 millones de m³, el precio al que el banco debe comprar es de 0.15 pesos por m³, por lo que el costo total anual de compra de agua es de 54.2 millones de pesos que, agregado al costo de operación del banco, da un total de 59.464 millones de pesos anualmente. El banco compraría el volumen mencionado en el párrafo anterior durante el periodo de abundancia, que se supone dura cinco años, por lo que se necesitaría de un total de 297.32 millones de pesos para financiar las actividades del banco de agua durante el periodo inicial de cinco años.

Al sexto año, cada metro cúbico se vendería en 0.29 pesos y se colocarían en el mercado de agua los 250 Mm³ que demanda Guadalajara. De esta manera, durante el periodo de sequía, el lago de Chapala tendría asegurada dicha cantidad, que podría distribuirse como conviniera en los años secos, con lo cual se coadyuvaría a la supervivencia del lago y a asegurar su sustentabilidad.

El resultado de esta política se observa en la ilustración 4. Como era de esperarse, es una solución intermedia entre los otros dos escenarios y logra mantener el nivel del lago de Chapala en un nivel de alrededor de los 2 000 MM³, durante todo el periodo estudiado. Al mantener el precio del agua a Guadalajara

Ilustración 4. Almacenamiento con compra anual de 361.35 MM³.



en 0.29 pesos por metro cúbico, la relación beneficio/costo que se obtiene es de 0.54, como se muestra en el cuadro 5; para obtener una relación beneficio/costo igual a la unidad, se tendría que vender el agua a Guadalajara a seis pesos por metro cúbico.

Conclusiones

Tomando como base el funcionamiento del Banco de Agua de California, se ha propuesto un mecanismo similar, que en este caso sirva para evitar el continuo deterioro del lago de Chapala. Se propusieron tres escenarios alternativos para la compra de agua; para cada uno de esos escenarios se determinan las posibles comisiones que financiarían las operaciones del banco. Es conveniente reiterar que la estimación de estas operaciones es muy conservadora, ya que se refiere a la comercialización de volúmenes en distritos de riego; faltaría incluir las unidades de riego y otras posibles

Cuadro 4. Volumen de agua para riego concesionada y volumen realmente empleado en los distritos de riego que conforman la región "Lerma Chapala".

Distrito de riego	Superficie regada (ha)	Volumen bruto total del D.R. (m ³)	Volumen neto total del D.R. (m ³)	Volumen total concesionado (m ³)	Diferencia entre volumen concesionado y empleado
Alto río Lerma	161 838	1 036 219 100	746 279 800	898 270 000	137 949 100
Morelia	20 893	111 753 900	70 988 300	99 080 000	12 673 900
Ciénega	15 536	93 119 700	58 488 600	122 880 000	29 760 300
Edo. de México	7 386	23 275 600	14 360 000	6 658 000	16 617 600
Tuxpan-Maravatío	8 245	67 013 600	37 120 500	100 595 000	33 581 400
Zamora	10 455	185 195 300	127 879 500	217 930 000	32 734 700
La Begoña	7 736	68 476 200	41 630 900	112 610 000	44 133 800
Rosario	55 251	303 850 900	263 374 300	357 746 000	53 895 100
Total	287 339	1 888 904 300	1 360 121 900	1 915 769 000	361 345 900

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cuadro 5. Cálculo de la relación beneficio/costo, escenario 3.

Año	Pérdida en agricultura	Gasto administrativo	Beneficio medioambiental	Venta a Guadalajara
0	297.3200	5.2000	0.0000	0.0000
1	265.4643	4.6429	183.9286	
2	237.0217	4.1454	141.9005	
3	211.6265	3.7013	121.7144	
4	188.9522	3.3047	124.5615	
5	168.7074	2.9506	144.1264	
6				36.7308
Total	1 369.0921	23.9448	716.2315	36.7308
B/C	0.5405			

Fuente: elaboración propia.

operaciones que realizarían otros usuarios potenciales importantes, como la comercialización de agua residual proveniente de centros de población a industrias, o de estos usuarios a riego.

Los costos de proporcionar agua al lago, de acuerdo con esta metodología, aumentan más que proporcionalmente con el volumen de agua transferida de los agricultores al lago. Esto se debe al hecho de que el precio al que hay que pagar el agua implica igualar los beneficios medios esperados de los agricultores. Cuando se compran los primeros metros cúbicos se debe pagar poco, porque se compran a los agricultores más ineficientes; cuando se compran los últimos metros cúbicos, se compra caro, porque se compra a los más eficientes.

Si bien se mostró que no es posible bajo ningún escenario sostener el banco vendiendo agua al organismo operador de la ciudad de Guadalajara, puede considerarse como una medida coadyuvante para asegurar un mínimo de agua al lago, es decir, dotar al lago a través de este mecanismo de 1 628 Mm³, lo que implicaría asegurar su existencia.

Se puede concluir que la operación del banco de agua no es una solución definitiva para el problema del abastecimiento de agua al lago de Chapala bajo el actual sistema de precios.

Anexo. El modelo de asignación de recursos hidráulicos

El modelo de asignación de recursos hidráulicos tiene como base un modelo de redes de flujo asociado con la descripción del sistema de recursos hidráulicos. En dicho modelo se resuelve el problema de suministro de flujo en la red a costo mínimo.

Representación espacial

La estructura del modelo en general es como sigue: el sistema físico está representado en el espacio por una configuración nodos-arcos, en donde los nodos representan vasos o confluencias, y los arcos canales o ríos. Todos los vasos deben tener una salida para derramar cualquier exceso de agua que entra en ellos.

Representación temporal

En el caso de sistemas multiperiodicos, a cada representación en el espacio se le asocia con una representación en el tiempo. Las redes espaciales se conectan por medio de arcos que representan cambios de almacenamiento en los vasos en periodos consecutivos. A éstos se les llama arcos de almacenamiento. De esta manera, la representación espacio-tiempo del problema puede ser visualizada como una red compuesta por capas, donde cada capa representa un periodo de tiempo, con arcos de almacenamiento que conectan las capas.

Definición de la red esquemática

El sistema debe, además, tener inicialmente agua almacenada en los vasos, establecidas las entradas y las demandas, al igual que los derrames en el sistema. Los almacenamientos iniciales en los vasos se establecen en la red por medio de un conjunto de arcos, denominados arcos de almacenamiento inicial, que se conectan a los vasos en el primer periodo.

En el modelo de redes que se plantea existen arcos de flujo variable, representado por arcos de demanda, derrames y almacenamiento final. Las demandas del sistema son representadas a través de un conjunto de

arcos de demanda. Las confluencias tienen un arco de salida en cada periodo para los derrames. Finalmente, los almacenamientos finales del último periodo dejan el sistema por medio de un conjunto de arcos. Los arcos de flujo fijo y variable se conectan con siete nodos y cinco arcos adicionales. En suma, hay ocho diferentes tipos de nodos dentro de la red: un nodo fuente, un nodo de entradas, un nodo de demandas, un nodo de derrames, un nodo de almacenamiento final, un nodo sumidero, nodos que representan vasos y nodos de unión.

El número total de nodos en la red es $N = L * n_n + 7$

Donde L es el número de periodos de tiempo, n es el número de nodos en la representación espacial y 7 es el número de nodos especiales en el problema.

Para conectar estos ocho nodos existen diez diferentes tipos de arcos. El flujo en los arcos que representan ríos está acotado por cero y la máxima capacidad en el río. Cuando existen requerimientos de flujo mínimo para control de calidad de agua u otros propósitos, el límite inferior puede ser distinto de cero y fijarse de tal forma que se satisfagan estas necesidades. El flujo a través de canales y almacenamiento en los vasos está restringido entre un nivel mínimo y la capacidad de diseño del mismo. El límite superior puede ser variado en las distintas etapas de tiempo del sistema.

Los arcos de almacenamiento inicial y de entrada tienen igual cota inferior y superior. Esto obliga al almacenamiento inicial y a las entradas del sistema a ser constantes. Las demandas o requerimientos de agua salen del sistema a través de arcos, cuyas capacidades de tránsito tienen como límites una cota inferior que permite una escasez tolerable y una cota superior que es igual al máximo requerido. El flujo en los arcos de derrame puede variar entre cero y un valor arbitrariamente grande que no será alcanzado.

Un arco adicional, llamado arco de flujo auxiliar, se inserta en la red entre el nodo fuente y el nodo sumidero, pues la técnica usada en la solución del modelo de asignación requiere que un flujo fijo sea suministrado en el sumidero. El arco auxiliar abastece cualquier cantidad de agua requerida en el nodo sumidero que no pueda proveerse a través del sistema. El número total de arcos en la red viene dado por:

$$\text{Número de arcos} = (n_L + 2n_r + 2n_n + n_s) * L + 6 + n_r$$

Donde n_L es el número de ligas (i.e., canales más ríos); n_r , el número de vasos; n_n , el número de vasos de almacenamiento y confluencias; n_s , el número de nodos donde pueden ocurrir derrames; L , el número de

periodos de tiempo en el problema, y 6 representa el número de arcos de balance neto.

Curvas de evaporación

El factor de ganancia en los arcos de almacenamiento dependerá de la evaporación en los vasos. El complemento de este factor de ganancia representará la pérdida neta por unidad de flujo. Conviene señalar que la evaporación es proporcional al área superficial y no al volumen almacenado. Sin embargo, podemos expresar esta pérdida de agua en forma proporcional al volumen almacenado por medio de la curva capacidad contra área superficial aproximada por dos segmentos lineales. La función de evaporación denotada por $A(V)$ y definida como:

$$A(V) = \begin{cases} C_1 V & , \text{ si } 0 \leq V \leq BND \\ C_2(V - BND) + C_1 BND & , \text{ si } BND \leq V \end{cases}$$

Donde $A(V)$ es el área superficial en millones de metros cuadrados (Mm^2); V , el volumen de agua almacenada en millones de metros cúbicos (Mm^3); C_1 , pendiente del primer segmento lineal; y C_2 , pendiente del segundo segmento lineal.

Si separamos la variable V en dos componentes, una correspondiente al almacenamiento abajo de BND Mm^3 (V_1) y otra arriba de BND Mm^3 (V_2), la evaporación es razonablemente aproximada por una proporción del almacenamiento. La evaporación E , por lo tanto, queda expresada en la forma:

$$E = e(C_1 V_1 + C_2 V_2)$$

Donde e es la lámina de evaporación. Asimismo, el porcentaje de pérdidas debido a la evaporación en cada uno de los arcos de almacenamiento por donde pasan los volúmenes V_1 y V_2 son eC_1 y eC_2 , respectivamente. Los factores de ganancia sobre estos arcos se determinan restando a la unidad cada uno de los porcentajes de pérdida (eC_1 , eC_2). Esta ganancia puede variar periódicamente haciendo variar el factor e .

Un beneficio de una unidad se asigna al arco de almacenamiento del rango inferior de almacenamiento V_1 y no se asigna beneficio al arco asociado con el rango superior de almacenamiento V_2 . Esto ayuda a que el flujo pase primero por el arco de rango inferior hasta saturarlo (en caso necesario) y después el resto del flujo pase por el arco de rango superior.

Supuestos del modelo

1. Todas las demandas de agua deben especificarse de antemano.
2. Se maneja en forma conjunta la función objetivo de mínimo costo y la función de penalización
3. El sistema físico se representa por un conjunto de nodos y arcos interconectados. Los arcos corresponden a ríos, canales, tuberías; los nodos representan vasos y puntos de unión.
4. Todas las demandas se realizan en los nodos.
5. Las evaporaciones en los canales se calculan como un porcentaje de flujo que pasa a través de ellos.

Descripción matemática

Las proposiciones matemáticas del problema de asignación pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N q_{ij} C_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N (q_{ij} - q'_{ij}) = 0, \quad j = 1, \dots, N \quad (\text{balance en los nodos})$$

$$q'_{ij} - (1 - \gamma_{ij}) q_{ij} = 0, \quad \text{para toda } i \text{ y } j \quad (\text{pérdidas en los arcos})$$

y los límites en los arcos deben cumplirse:

$$L_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij}, \quad \text{para toda } i \text{ y } j$$

en donde:

- q_{ij} = es el flujo que entra al arco que va del nodo i al j .
- q'_{ij} = es el flujo que sale del arco que va del nodo i al j .
- L_{ij} = es el límite inferior del flujo en el arco que va del nodo i al j .
- U_{ij} = es el límite superior del flujo en el arco que va del nodo i al j .
- N = es el número de nodos en la red.
- C_{ij} = es el costo por transportar el gasto q_{ij} .
- γ_{ij} = es el factor de pérdidas en el arco que va del nodo i al j .

La estructura matemática se describe por cuatro conjuntos de restricciones y una función objetivo. Un conjunto de las ecuaciones de restricción obliga al cumplimiento de continuidad en todos los nodos de la red, con excepción de un nodo fuente y un sumidero. El segundo conjunto de restricciones indica el volumen de agua perdida por las conducciones a través de cada uno de los arcos. Los otros dos conjuntos de restricciones

describen los límites superior e inferior del flujo en los arcos de la red. Por lo anterior, existe una ecuación para cada nodo y tres para cada arco.

Las ecuaciones de continuidad para cada nodo pueden expresarse de la siguiente manera:

1. Nodo de entrada: $\sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^n \alpha_{jk} = X_i$
2. Nodo de demanda: $\sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^n D_{jk} = X_d$
3. Nodo de derrame: $\sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^n \theta_j P_{jk} = X_s$
4. Nodo de almacenamiento final: $\sum_{j=1}^{n_r} \frac{S_{j,L+1}}{\Delta t} = X_f$
5. Nodos que representan vasos:

$$\sum_{i=1}^N Q'_{ijk} - \sum_{i=1}^N Q_{ijk} - \theta_j P_{jk} - \frac{S_{j,k+1}}{\Delta t} + \frac{S_{j,k}}{\Delta t}$$

$$+ \alpha_{jk} - D_{jk} - \beta_{ij} = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, n_r \quad k = 1, 2, \dots, L$$

6. Nodos de unión:

$$\sum_{i=1}^N Q'_{ijk} - \sum_{i=1}^N Q_{ijk} - \theta_j P_{jk} + \alpha_{jk} - D_{jk} = 0$$

$$j = n_r + 1, n_r + 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, L$$

en donde:

- Q'_{ijk} = flujo de entrada al vaso o nodo de unión i del vaso o nodo de unión j en el periodo k .
- Q_{ijk} = flujo de salida del vaso o nodo de unión i del vaso o nodo de unión j en el periodo k .
- P_{jk} = nivel de derrame del vaso j en el periodo k .
- S_{jk} = almacenamiento en el vaso j al inicio del periodo k .
- D_{jk} = demanda en el nodo j en el periodo k .
- α_{jk} = flujo de entrada al nodo j en el periodo k .
- β_{jk} = pérdidas debidas a evaporación en el vaso j en el periodo k .
- θ_{jk} = 1, si j es un nodo de derrame; 0, si j no es un nodo de derrame.
- i, j = designación numérica de los nodos.
- n_r = número de vasos.
- n = número de vasos más número de nodos de unión.
- k = periodo de tiempo.
- L = número de periodos de tiempo.

Todas las ecuaciones pueden reducirse a la forma común:

$$\sum_{i=1}^N q'_{ij} - \sum_{i=1}^N q_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n.$$

El flujo de entrada al nodo j , de salida del nodo i , debe cumplir la restricción:

$$q_{ij} \geq L_{ij} \quad \text{y} \quad q_{ij} \leq U_{ij}$$

En esta red, los arcos que representan canales, demanda, almacenamiento y derrame son tipos de arco que tienen asociado un costo. Además, en los canales se maneja el costo asociado con la energía requerida para los bombeos del agua en cuanto a los traslados de ésta a las zonas de demanda.

Recibido: 10/11/2006
Aprobado: 25/07/2007

Referencias

- BRAVO, H., CASTRO, J. y GUTIÉRREZ, M. El banco del agua: una propuesta para salvar al lago de Chapala. *Gestión y política pública*. México, D.F.: CIDE, 2005.
- CROPPER, M.L. and OATES, W.E. Environmental economics; a survey. *Journal of Economic Literature*. Vol. 30, 1992, pp. 675-740.
- Department of Water Resources. *The 1991 Drought Water Bank*. Sacramento, USA: Department of Water Resources, 1991.
- FREEBAIRN, J. Policy Forum: Water Pricing and Availability. Principles for the Allocation of Scarce Water. *The Australian Economic Review*. Vol. 16, no. 2, 2003, pp. 203-212.
- OSTER, J.D. and WICHELNS, D. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrig. Sci.* Vol. 22, 2003, pp. 107-120.
- CNA. *Ley de Agua Nacionales*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2004.
- CNA. *Ley de Derechos en Materia de Agua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2006.
- DE AZEVEDO, L.G.T. and BALTAR, A.M. Water Pricing Reforms: Issues and Challenges of Implementation. *Water Resources Development*. Vol. 21, no. 1, March 2005, pp. 19-29.
- OLAIZ, A. *Evaluación económica y valoración social de los escenarios de manejo del agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2003.
- SAMUELSON, P. The pure theory of public expenditure. *Collected Scientific papers of Paul Samuelson*. Stiglitz, J. (editor). Cambridge: MIT Press, 1954.

Abstract

BRAVO-PÉREZ, H.M., CASTRO-RAMÍREZ, J.C. & GUTIÉRREZ-ANDRADE, M.A. Production of an environmental good in Lake Chapala and drinking water supply to the city of Guadalajara: a simulation analysis using a network model. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 2, April-June, 2008, pp. 135-145.

This paper presents an ex ante benefit-cost evaluation of the possible water transfer from irrigation agriculture in the state of Guanajuato to Lake Chapala. Benefits and costs are calculated using two models: a mathematical network flow and an economic model for agriculture water price determination. The benefits and costs are calculated considering the environmental and economic effects in agricultural production. The water stored in the water bank has two purposes: An environmental use while it remains stored and a potable use when it is sold to Guadalajara's water utility in order to complement the supply of water to this city. This paper is divided in four sections; the first one presents the theoretical and empirical antecedents that support this paper. The second part describes the benefits and costs involved in the analysis. The third section presents the evaluation results. Finally, the fourth section presents the conclusions. An annex describes the network flow model used to simulate the behavior of Lake Chapala.

Keywords: ecological flow, optimization, network flows, efficient water allocation, water price, contingent valuation, hydraulic planning.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Héctor Manuel Bravo-Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Economía
Avenida Universidad 3000
Edificio oficinas administrativas 2, primer piso
Colonia Copilco el Bajo
Coyoacán, 04510 México D.F., México
teléfonos: + (52) (55) 5622 2344, 5622 2347
hectorb@economia.unam.mx

Dr. Juan Carlos Castro-Ramírez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos
telefono: + (52) (777) 329 3675
fax: + (52) (777) 329 3675
jccastro@tlaloc.imta.mx

Dr. Miguel Ángel Gutiérrez-Andrade

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
Avenida San Rafael Atlixco 186
Colonia Vicentina
09340 México, D.F., México
telefono: + (52) (55) 5804 4634, ext. 220
fax: + (52) (55) 5804 4640
gamma@xanum.uam.mx