

Derechos reservados de El Colegio de Sonora, ISSN 1870-3925

Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo

Alejandro Salazar Adams*

José Luis Moreno Vázquez**

América N. Lutz Ley***

Resumen: El acuífero de la Costa de Hermosillo es uno de los más sobreexplotados de México. A pesar de ello, se sigue utilizando para cultivos de bajo valor y alto consumo de agua. En el presente artículo se estimó, mediante cuatro modelos de programación lineal, la asignación óptima de cultivos con base en la restricción que impone la recarga del acuífero; y es posible generar 90 por ciento del valor de la producción agrícola actual con alrededor de una tercera parte del volumen extraído. Los resultados permiten indicar la importancia de la eliminación de subsidios, de la reconversión agrícola y del uso de técnicas de riego eficientes, como medidas para lograr el manejo sustentable del acuífero.

Palabras clave: manejo sustentable del agua, programación lineal, acuíferos, rentabilidad agrícola, eficiencia agrícola, irrigación.

* Profesor-investigador del Programa de Estudios Políticos y de Gestión Pública de El Colegio de Sonora. Correspondencia: Obregón #54, colonia Centro, C. P. 83000. Hermosillo, Sonora, México. Teléfono: (662) 259 5300, extensión 2287. Correo electrónico: asalazar@colson.edu.mx

** Profesor-investigador del Centro de Estudios del Desarrollo de El Colegio de Sonora. Teléfono: (662) 259 5300, extensión 2288. Correo electrónico: jmoreno@colson.edu.mx

*** Asistente del Programa de Estudios Políticos y de Gestión Pública de El Colegio de Sonora. Correo electrónico: alutz@colson.edu.mx

Abstract: The Costa de Hermosillo aquifer is one of the most overexploited in Mexico. In spite of this, it is still used for the production of low value crops with high water consumption. In this article, the optimum crop pattern was estimated by means of four linear programming models, based on the restriction imposed by aquifer recharge. According to the results, it is possible to generate 90% of the current agricultural production value using one third of the water being drawn. The results also indicate the importance of subsidy elimination, agricultural reconversion and use of efficient irrigation techniques as effective measures for achieving sustainable aquifer management.

Key words: sustainable water management, linear programming, aquifers, agricultural profitability, agricultural efficiency, irrigation.

Introducción

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2007), la disponibilidad natural media per cápita de agua en México ha disminuido, de 18 035 m³/habitante/año, en 1950, a tan sólo 4 416, en 2006. Sin embargo, si bien las acciones encaminadas hacia la reducción del consumo de agua en las ciudades son importantes, es necesario considerar que las actividades agrícolas utilizan 76.8 por ciento del volumen de agua destinado a usos consuntivos y esta proporción es aún mayor en la región noroeste, donde alcanza 86 por ciento del volumen concesionado (Ibid. 2010a, 61-63), por tanto este sector es el usuario principal.

La tercera parte del agua concesionada para usos consuntivos en el país proviene de fuentes subterráneas, en específico de 653 acuíferos (Ibid., 43). En 1975, 35 de ellos estaban sobreexplotados (es decir, se extraía más agua de la que se recargaba); y para 2002, ya eran más de cien (Jiménez y Marín 2004). Uno de éstos es el de la Costa de Hermosillo, el cual dio lugar a la creación del distrito de riego 051- Costa de Hermosillo (DR051), en la década de 1950.

Con respecto al balance del acuífero, según CONAGUA et al. (2007, 59) las extracciones de agua en 2006 equivalían a 461 millones de metros cúbicos (Mm^3), cantidad que supera por mucho a la recarga natural anual, estimada en 250 Mm^3 . Aunado a esto, alrededor de 98.4 Mm^3 del volumen recargado se debe al ingreso de agua marina, lo que constituye un problema de contaminación. El abatimiento de los niveles de agua es consecuencia de una explotación, que representa casi el doble del volumen anual de recuperación, además del agravante de la intrusión salina (Moreno 2006).

El DR051 abarca entre 65 y 70 por ciento de la superficie cosechada en el distrito de desarrollo rural 144. En términos del beneficio de la aplicación de agua en la agricultura de esta zona, en un comparativo por cultivos, en el ciclo 2001-2002 los forrajes, granos y frutales (excepto la uva) representaban 71 por ciento de la superficie cosechada, utilizaban 68 por ciento del agua y 70 de los subsidios, pero contribuían sólo con 19 por ciento del valor de la producción (CONAGUA-Programa de Modernización y Manejo del Agua, PROMMA 2003, 13). Esto significa que el uso de agua agrícola es desproporcionado en relación con los beneficios que otorga en términos productivos, por ello resulta primordial proveer a las instituciones administradoras de agua en el país de instrumentos para el diseño de políticas de manejo de la demanda en este sector, por ejemplo las tarifas por el uso de agua para riego (Florencio Cruz et al. 2002).

Al considerar lo anterior, el objetivo de este artículo es determinar la asignación óptima de cultivos en la Costa de Hermosillo, sujeta a la restricción de un manejo sustentable del acuífero, es decir, que el volumen de las extracciones se mantenga igual o por debajo de la recarga media natural, y de esta manera conocer qué tanto se puede producir en la zona sin menoscabar la recarga de agua en el subsuelo, pues si bien se han realizado este tipo de estimaciones en el pasado, no han considerado la extracción limitada a un volumen sustentable, como una restricción importante en los modelos.

También se pretende proporcionar información para el establecimiento de políticas para el manejo sustentable del acuífero, sobre todo mediante tarifas con base en el precio sombra o costo de oportunidad del agua, que se obtendría como resultado de la inves-

tigación. Esto permitirá hacer un uso más eficiente de los recursos hídricos, favorecerá su conservación para las generaciones futuras y abrirá la posibilidad de destinar a otros usos de mayor valor, como el urbano, una parte del agua que actualmente se emplea en la agricultura. Ya han ocurrido transferencias de este tipo, como la venta de 20 Mm³ de agua de la Costa a la ciudad de Hermosillo en 2005, con un costo de 140 millones de pesos (Moreno 2006, 400).

En la primera parte del artículo se describen de forma breve los antecedentes del desarrollo agrícola en la región de la Costa de Hermosillo; en la segunda se presenta la situación del acuífero y su administración, aspectos que condicionan su sustentabilidad, así como de los estudios realizados en torno al aprovechamiento del agua en la zona. En la tercera se explica la metodología y los criterios utilizados en los modelos de programación; después se discuten los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones.

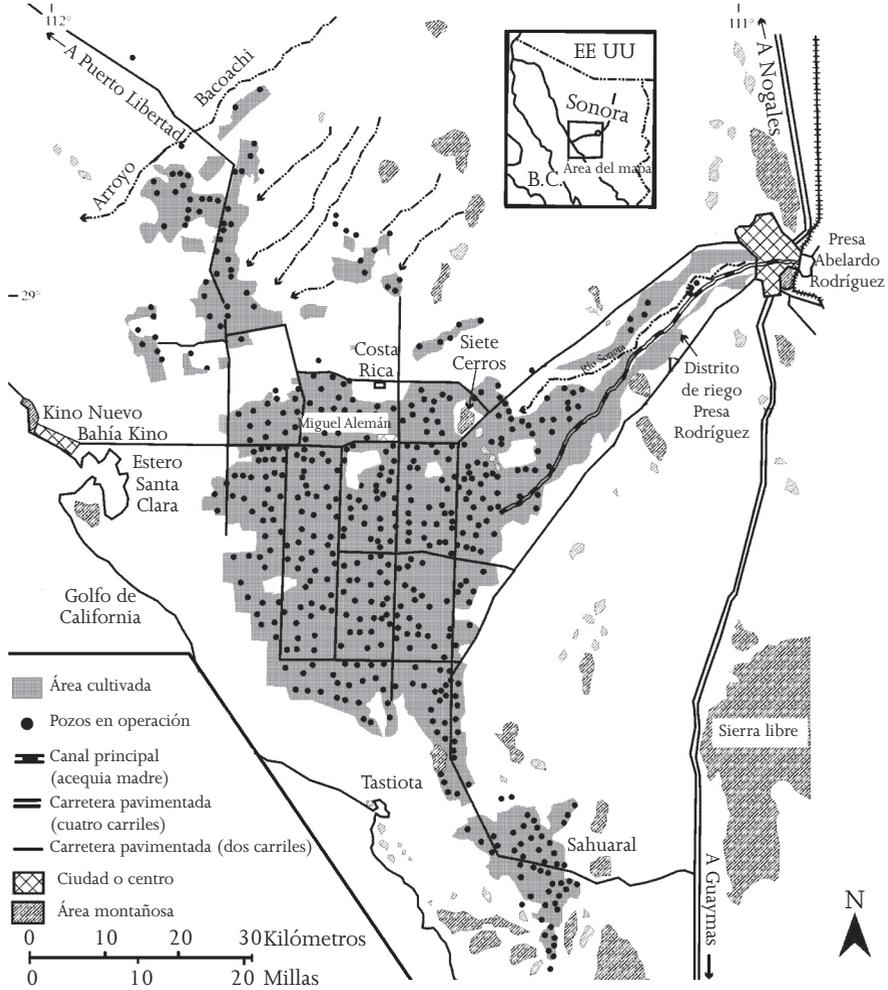
El desarrollo agrícola en la Costa de Hermosillo

La Costa de Hermosillo se encuentra en el centro-poniente del estado de Sonora, frente al golfo de California, como se observa en la figura 1. Una de las actividades económicas primordiales en el último siglo ha sido la agricultura, sustentada principalmente por el agua extraída del acuífero de la Costa de Hermosillo, que se alimenta de dos escurrimientos intermitentes: el del río Sonora (que recibe agua del arroyo Zanjón y del río San Miguel) y el del río Bacoachi, cuya aportación comenzó a ser más importante después de la construcción de la presa Abelardo L. Rodríguez en los años cuarenta, porque basaba su almacenamiento en el caudal del río Sonora (Ibid., 93-102). La superficie de este acuífero y la afluencia de agua que recibe lo convierten en uno de los más importantes del estado, aunque también el que tiene el mayor déficit de los 61 existentes en Sonora (CONAGUA 2010b), y es uno de los 16 en el país con intrusión marina (Ibid. 2010a, 44).

Al igual que el resto de la región, la Costa de Hermosillo está sujeta a las condiciones características del clima semidesértico. Tiene una temperatura media anual de 24 °C, que oscila entre -3 °C como

Figura 1

Distritos de irrigación de la Costa de Hermosillo y la presa Abelardo L. Rodríguez



Fuente: Moreno (2006).

mínima y 46 °C como máxima; la precipitación media anual es de 200 milímetros (mm), con lluvias escasas que ocurren sobre todo en el verano. Asimismo, la tasa de evapotranspiración es muy alta

(en especial hacia las partes bajas de los ríos que alimentan la zona), que llega incluso a 2 560 mm (CONAGUA 2002, 4). Estas condiciones perjudican la capacidad de recarga del acuífero e influyen en el ritmo de utilización del recurso, pues al carecer de agua superficial por el clima seco y las altas tasas de evaporación, los agricultores recurren en mayor medida a las fuentes subterráneas.

El volumen de agua concesionado en el acuífero hasta 2006 era de 400 Mm³. Si se consideran las estimaciones más recientes de recarga equivalente a 250 Mm³ (Ibid. 2009, 2), habría un déficit de 150 Mm³ en la disponibilidad media anual de agua subterránea. De acuerdo con el Plan de Modernización del Riego del DR051 de CONAGUA (et al. 2007), el volumen concesionado en 2006 disminuyó a 350 Mm³, lo cual aun significaría un déficit de cerca de 100 Mm³. Por otra parte, de los 250 millones de metros cúbicos que se recargan anualmente, casi 100 Mm³ corresponden a la intrusión de agua salina del mar de Cortés (Monreal et al. 2002), por lo cual la disponibilidad de agua utilizable para el riego agrícola resulta aún menor.

Los antecedentes de la sobreexplotación del acuífero de la Costa de Hermosillo se remontan hasta mediados del siglo XIX, cuando grupos colonizadores establecieron las primeras granjas y zonas de cultivo en el área, que en sus inicios se mantenían con aguas superficiales (Moreno 2006, 107-120). A principios del siglo XX comenzó la construcción de bocatomas, para captar el agua de los escurrimientos superficiales y la extracción de agua subterránea mediante calderas de vapor, que se obtenía de los primeros 100 metros del subsuelo. La perforación de pozos profundos empezó alrededor de 1945, con lo cual se inició también la explotación intensiva del acuífero (Moreno 2006, 131). Aunado a ello, las extracciones entre 1935 y 1966 se realizaron sin conocer con certeza el potencial del reservorio de agua, y el alumbramiento de fuentes nuevas se hizo a gran escala sin cuantificaciones preliminares de los volúmenes existentes (Ibid. 2010, 83).

Estos eventos sucedieron en un contexto político, que favorecía la sobreutilización de recursos hídricos para la agricultura en Sonora. Entre 1926 y 1958, el estado destinaba en forma directa grandes sumas a las actividades relacionadas con la agricultura (ensanchamiento de superficies de cultivo e instalación de sistemas de

riego) (Hewitt 1982, 130-137). Comenzó el uso de motores eléctricos para extraer agua de los pozos profundos, y se construyeron grandes obras de infraestructura, tanto hidráulica como de transportación (Ibid.), como la presa Abelardo L. Rodríguez, entre 1944 y 1948, al oriente de Hermosillo (Moreno 2006, 131); la cual, al captar el agua proveniente de la parte media del río Sonora jugó un papel importante en la disminución de los escurrimientos superficiales de agua hacia la Costa de Hermosillo en la cuenca baja, lo cual hizo más necesaria la explotación de los reservorios subterráneos para la agricultura (Halvorson et al. 2003, 553). De esta manera, el número de pozos se incrementó de 7, en 1948, a 428, en 1955 (CONAGUA et al. 2007, 20); mientras que en 1949 se obtenían 227 Mm³ de agua de 400 pozos, para 1964 ya se alcanzaban 1 137 Mm³ (Olavarrieta et al. 2010, 146).

En estas condiciones de uso desregulado, poco sustentable y con desconocimiento del acuífero, pronto aparecieron los primeros signos de alarma. De acuerdo con Moreno et al. (2010, 82) en el Reglamento en materia de aguas del subsuelo, publicado en 1956, la Costa de Hermosillo ya figuraba en la lista de zonas de veda para alumbramientos nuevos de aguas subterráneas. Asimismo, algunos autores señalan que en 1958 la capa freática se encontraba a diez metros por debajo del nivel del mar, ocasionando la intrusión de agua marina (Halvorson et al. 2003, 553).

En correspondencia con estos sucesos, entre 1951 y 1978 se tomaron medidas para minimizar los problemas de la administración del acuífero. En 1951 un decreto presidencial restringió el área para alumbramientos nuevos a 500 mil hectáreas en la planicie costera entre Hermosillo y el mar de Cortés (Ibid.). En 1953 se estableció el distrito nacional de riego de la Costa de Hermosillo 051, que abarcaba 1.5 millones de hectáreas. Con esta medida se esperaba que hubiera monitoreo sistemático del comportamiento del acuífero, y que se manejara de forma eficiente el agua subterránea; sin embargo esto no pasó, y en el ciclo 1963-1964 la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos estableció la obligatoriedad de que los pozos se equiparan con medidores, para determinar el volumen de la extracción. Aun así, en los años siguientes se observó el pico máximo de extracción en la zona (Ibid. 2003).

Hubo otras acciones, consistentes en decretos continuos de vedas para alumbramientos de agua en extensiones cada vez más amplias, la reducción programada de extracciones entre 1963 y 1966 y la declaración del interés público para la conservación de los mantos acuíferos de Sonora en 1978 (Moreno 2006). A pesar de esto, en 1970 los abatimientos alcanzaban los 65 metros por debajo del nivel del mar, y se estima que entre 1945 y 2005 el nivel medio del acuífero descendió un metro por año en promedio (Quevedo 2007).

Al inicio de la década de 1990, dos acontecimientos modificarían las características de la producción agrícola mexicana e influyeron también en la región de estudio. Por un lado, la apertura comercial por la firma del Tratado de Libre Comercio para América del Norte, que colocó a ciertos productos en una situación de alta competitividad (primero las hortalizas y frutales, luego los granos). En segundo lugar, el programa de reconversión productiva, que buscó aumentar la productividad mediante la reconversión agrícola en función de la eficiencia de los cultivos en cada región (Bracamonte et al. 2007, 65-66).

En el caso de la Costa de Hermosillo, esto significó cambiar el cultivo de granos por la producción hortofrutícola (en especial uva, nuez, cítricos y hortalizas), proceso que ya había comenzado décadas antes, debido a la escasez de agua y a los requerimientos de mercados internacionales altamente competitivos. De esta manera, aunque ha habido contracciones en todas las áreas sembradas, entre 1996 y 2004 la superficie correspondiente a frutales, cítricos y vid se incrementó de 13 218 a 17 768 hectáreas (Ibid. 2007).

Esto ha beneficiado con el aumento en los jornales agrícolas (mayor necesidad de trabajadores), mejores ingresos para los productores (entrada de divisas) y el uso de sistemas tecnificados para el riego. Sin embargo, no se ha completado la reconversión agrícola, debido a contradicciones en las acciones implementadas (la apertura a mercados internacionales competitivos y el otorgamiento de subsidios a cultivos poco rentables en términos del consumo de agua, como el trigo y otros granos, que además no logran capitalizar al productor para efectuar la reconversión) (Ibid.).

Otros acontecimientos importantes para el desarrollo del DR051 en los años noventa fueron la transferencia, en 1994, de la administración y mantenimiento del distrito a la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 (AUDR051); y luego, en 1996, la formulación de un programa de riego que pretendía disminuir la extracción de agua para equipararla con el volumen de la recarga, pero que no se cumplió (Olavarrieta et al. 2010). Estas medidas parciales y muchas veces fallidas no han evitado que se exploten grandes volúmenes de agua, lo que ha provocado que el nivel estático medio del acuífero disminuya los valores positivos que tenía hace seis décadas, hasta casi 40 metros por debajo del nivel del mar, cuestión que ha causado problemas no sólo económicos y sociales, sino también ambientales, como la inversión del gradiente hidráulico, la intrusión salina y la afectación de alrededor de 22 mil hectáreas de tierra (Quevedo 2007, 14).

La sustentabilidad perdida

La gestión de los recursos hídricos de la Costa de Hermosillo se ha vuelto más compleja y problemática. Hay sobrados indicadores del abatimiento del acuífero, además los tipos de usuarios se han diversificado, aunque el principal continúa siendo el sector agrícola. En el municipio de Hermosillo, del total de la demanda de agua, la requerida para uso agrícola representa 92 por ciento (CONAGUA et al. 2007, 25), concentrada en particular en la Costa de Hermosillo. De acuerdo con Quevedo (2007, 28), en los últimos 16 años, más de la mitad de la superficie media sembrada en la zona ha correspondido a cultivos que no resultan rentables; además, la eficiencia del uso de agua agrícola se estimaba en 56 por ciento en 2006 (CONAGUA et al. 2007, 3). En síntesis, en esta región semidesértica, un porcentaje alto del agua se dedica a la agricultura, alrededor de la mitad de ese volumen se desperdicia o no se contabiliza y una parte se destina a cultivos no rentables.

Aunque es evidente la sobreexplotación de agua subterránea, siguen utilizándose técnicas deficientes para el riego (gravedad y

rodado); predomina el monocultivo y hay bajas eficiencias electro-mecánicas por falta de mantenimiento de los equipos de bombeo y pozos (Quevedo 2007, 16); además, persisten los subsidios a la energía eléctrica, lo cual, en palabras de Olavarrieta et al. (2010, 145) “permite gran extracción de agua y el dispendio del recurso, el uso de equipo ineficiente y cultivos no rentables”.

Los subsidios a las tarifas eléctricas significan un freno importante para lograr la sustentabilidad en la gestión de los recursos hídricos en la agricultura mexicana. De acuerdo con un reporte del Banco Mundial (2005, 19), [...] “la tarifa 09 para la electricidad y otros programas crean condiciones –vía subsidios– que promueven el uso excesivo del agua en actividades de bajo valor [...]”. Del mismo modo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE (2003, 83) señala que la CONAGUA tiene proyectos para frenar la sobreexplotación y lograr un manejo sustentable de los acuíferos, pero “[...] es poco probable que la efectividad de estos programas aumente debido a las bajas tarifas eléctricas que se aplican al riego por bombeo, que crean incentivos para desarrollar sembradíos intensivos en el uso del agua [...]”.

También hay deficiencias en cuanto a los factores institucionales que gobiernan el uso del acuífero, pues el plan anual de riego no se cumple y los usuarios extraen el agua según sus necesidades productivas, y no de acuerdo con los volúmenes planificados. Entre 1990 y 2005 se había planeado utilizar en promedio 50 314 hectáreas de riego y extraer un volumen medio de 381 Mm³; pero en la realidad fueron 57 979 hectáreas y se extrajeron 403 Mm³, lo cual supera no sólo la cantidad concesionada, sino también la recarga media anual (Quevedo 2007, 23-26).

En la Costa de Hermosillo en la actualidad existen 891 títulos de aprovechamientos registrados y distribuidos entre 1 373 pozos: 697 agrícolas, 194 urbanos, 15 industriales, 409 pecuarios, 45 domésticos y 13 de servicios (Ibid., 23), lo cual refleja la diversificación de usos mencionada. Si se toma en cuenta sólo a los usuarios agrícolas del AUDR051, en el ciclo 2006-2007 el aprovechamiento se realizaba a través de 469 pozos, 378 en operación y 91 fuera de servicio, con una extracción total de 377 Mm³, para sembrar 45 774 hectáreas (Olavarrieta et al. 2010, 149). Quevedo (2007, 17) señala que en

2005 se extrajeron 410 Mm³; mientras que CONAGUA et al. (2007, 59) reportaron 461 Mm³, en 2006. Por otra parte, según Moreno (2006), dos estudios independientes de la Universidad de Sonora y la Universidad Autónoma Chapingo estimaron extracciones incluso de entre 500 y 600 Mm³ al año.

Por consiguiente, un tema prioritario en un escenario como el de la Costa de Hermosillo es la sustentabilidad de la extracción de agua subterránea, definida por Loáiciga (2003, 313) como la que puede desarrollarse a largo plazo, que cubre ciertos usos humanos y funciones ambientales, mientras el agua conserva su calidad natural y se evitan impactos negativos. Además, dicha sustentabilidad debe considerarse en función de los límites impuestos por la recarga media natural de la reserva y por las diferencias entre ganancias y costos relacionados con su uso, aspecto que se vuelve crucial al hablar de la rentabilidad de los productos agrícolas, puesto que este sector emplea la mayor parte del agua concesionada en la Costa de Hermosillo.

De acuerdo con Moreno (2006, 375- 394), durante los últimos 40 años se han hecho estudios que abordan algunos puntos relacionados con la administración y características del recurso en la región de la Costa de Hermosillo; en especial, sobre la intrusión salina y otras formas de contaminación del agua subterránea (Andrews 1981; Puebla Menchaca 1987; Rodríguez y Pérez 1991; Steinich et al. 1997 y 1998; Castro 1998; Castillo 2000 y Rangel et al. 2003), así como sobre la disponibilidad de agua (Ariel Construcciones S. A. 1968; Vega y Saiz 1995; Monreal et al. 2002) y la relación de la escasez con el funcionamiento integral de la cuenca del río Sonora (Comunatec S.A. 1986).

Otras investigaciones han ligado variables económicas y productivas con indicadores del uso de agua en el sector agrícola, las cuales son de interés como antecedentes del presente trabajo. En este sentido, está el de Cruz (1969), quien realizó cálculos sobre las pérdidas monetarias debido al desnivel del terreno y el uso ineficiente del volumen de agua asignado; también los de Zambrano (1971), Cárdenas (1981) y Cabanillas (1985), quienes utilizaron métodos de programación lineal con distintas perspectivas temporales y varia-

bles incluidas para calcular el patrón de cultivos óptimo, haciendo énfasis en el agua como recurso escaso.

Zambrano (1971) concluyó que los cultivos más rentables en ese momento serían el algodón, sorgo forrajero, garbanzo, vid y trigo. Una década después, Cárdenas (1981) encontró que la combinación de vid, nogal y durazno constituiría un patrón óptimo para maximizar ingresos netos, número de jornales, demanda, inversión y capacidad física de los pozos en 30 mil hectáreas y con 398 Mm³; aunque su limitante fue que se consideró como restricción de la cantidad de agua el volumen disponible, el cual de antemano no corresponde a un manejo sustentable, pues es mayor a la recarga media natural estimada para ese periodo. El estudio de Cabanillas (1985) fue similar al de Cárdenas, pero el cálculo se realizó para un periodo de siete años; concluyó que los cultivos óptimos serían los cítricos, vid, durazno y nogal, y propuso además una reducción de la superficie sembrada de 70 mil a 36 mil hectáreas.

Valenzuela (1997) presentó un estudio en el cual tomó como límite de la cantidad de agua el volumen de la recarga, pero no se sustrajo de ésta el correspondiente al agua salada. Por su parte, Félix (2004) realizó un análisis sobre la rentabilidad agrícola de los productos de la región, considerando el gasto de agua en relación con los subsidios y apoyos existentes.

Con respecto a los datos disponibles para este artículo, de la última estimación de la recarga del acuífero equivalente a 250 Mm³, la de agua dulce efectiva corresponde a 151.6 Mm³ y no todo puede ser aprovechado por la agricultura, ya que 23.36 Mm³ están concesionados para uso público urbano, 1.18 Mm³ para industrial y 0.97 Mm³ para pecuario (Quevedo 2007), por lo que sólo están disponibles para la producción agrícola 126.1 Mm³. Estas consideraciones se incorporan al modelo de programación lineal, elaborado para calcular la asignación óptima de cultivos en el DR051.

Métodos y procedimientos

El modelo de programación lineal empleado para estimar la asignación óptima de cultivos es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= \sum_{j=1}^n C_j X_j \\ \text{sujeto a } z &= \sum_{i=1}^m A_{ij} X_j \leq B_i \forall i = 1, \dots, m \text{ y } j = 1, 2, \dots, n \\ X_j &\leq 0 \\ X_j &< M_j \end{aligned}$$

en donde:

X_j es la j -ésima actividad (cultivo) del productor

C_j es el precio neto de la j -ésima actividad, definido como el ingreso bruto menos costo de producción (sin incluir el del agua, tierra y mano de obra)

A_{ij} es la cantidad del i -ésimo recurso necesario para producir el cultivo j

B_i es la cantidad disponible del i -ésimo recurso

M_j es el límite de producción máximo para el cultivo j

Los cultivos analizados fueron seleccionados de acuerdo con su importancia en la superficie sembrada en el distrito de riego. Los precios, costos de producción y los coeficientes técnicos se obtuvieron de la información publicada por la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Sonora (OEI-DRUS) y de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA 2008). Los recursos restrictivos son la cantidad de agua, la tierra de riego y la mano de obra. La disponibilidad de agua se estableció como la recarga del acuífero, menos la cantidad destinada para fines distintos a la agricultura. El límite de producción máximo para cada cultivo se fijó de tal manera que el aumento en la producción de alguno no generara un incremento mayor de 5 por ciento en la oferta nacional durante el ciclo correspondiente, y que ello no repercutiera en el precio.

En la figura 2 aparecen los cuatro modelos estimados considerando restricciones diferentes. El primero es el statu quo, en el cual se dispone de 377 Mm³; es decir, se sobreexplota el acuífero (esta cifra corresponde con la señalada por Olavarrieta et al. 2010, para el

ciclo agrícola 2006-2007 sólo para los usuarios de la AUDR051). En el segundo se toma en cuenta el volumen de agua para uso agrícola sin considerar la intrusión salina, por lo que la cantidad disponible fue de 224.5 Mm³; tres millones de jornales como mano de obra y 45 mil hectáreas de siembra (correspondientes a la superficie disponible en 2007) (Ibid.). En el tercer modelo se considera la intrusión salina, por lo que se contó con 126.1 Mm³ de agua, con las mismas restricciones de mano de obra y superficie disponible. En el cuarto se plantea como restricción sembrar en la superficie que cuenta con riego presurizado, con lo cual se modificaría la lámina de riego a su nivel óptimo para cada cultivo.

Figura 2

Restricciones para los modelos de programación lineal

Modelo	Restricciones		
	Agua (Mm ³)	Tierra (miles de has)	Jornales (millones)
1	377.0	45	3
2	224.5	45	3
3	126.1	45	3
4	126.1	11.6	3

El interés aquí es determinar la combinación de superficies de cada cultivo, que ofrecería el mayor valor neto de producción dentro de los límites impuestos por las restricciones señaladas. El precio sombra estimado por metro cúbico de agua indica el grado en que cambiaría el valor óptimo de la función objetivo, si se aumentara la cantidad de agua disponible en un metro cúbico; es decir, señala cuánto agregaría al valor neto un metro cúbico adicional en los cultivos incluidos. Esta información tiene repercusiones importantes, pues el precio sombra serviría para estimar los beneficios derivados de la obtención de agua adicional para la agricultura; así como el costo de oportunidad que tendría para los agricultores vender sus derechos de agua a otros o para uso urbano.

Resultados y discusión

Los cultivos seleccionados para el estudio se enlistan en la figura 3; representan 80 por ciento de la superficie sembrada, 85 del valor total de la producción y 92 del consumo de agua en la región. Y en la figura 4 aparecen las diferencias en la productividad entre ellos.

Figura 3

Principales cultivos en la Costa de Hermosillo

Cultivos	Superficie sembrada		Valor de la producción		Consumo de agua	
	Hectáreas	%	Millones de pesos	%	Millones de m ³	%
Trigo	19 907	36	363	13	129.4	32
Uva	8 696	16	1 560	54	104.4	25
Naranja	4 621	8	161	6	60.1	15
Garbanzo	4 488	8	56	2	24.7	6
Calabaza	2 635	5	105	4	13.2	3
Nuez	2 405	4	108	4	36.1	9
Sandía	1 860	3	119	4	8.4	2
Suma	44 612	80	2 472	85	376	92

Fuente: elaboración propia, con datos de SAGARPA (2008).

Los principales cultivos anuales en la Costa de Hermosillo son el trigo, el garbanzo y las hortalizas, entre las que destacan la calabaza y la sandía. De éstos, el de mayor precio es el garbanzo; sin embargo, también es el que más agua consume por tonelada producida y el que genera menor rendimiento. La calabaza y la sandía rinden más y consumen menos agua por tonelada que el garbanzo y el trigo. Después de sacar los costos se obtiene el precio neto como se define en la metodología; el mayor beneficio por metro cúbico de agua lo proporciona la uva, nuez y calabaza, que equivale a 30 veces el precio neto del trigo. Los resultados para los modelos se resumen en la figura 5.

Figura 4

Costos y recursos necesarios para la producción de cultivos

Cultivo	Agua (miles de m ³ /ha)	Jornales por ha	Rendimiento (ton/ha)	Precio medio rural (\$/ton)	Costo por tonelada (\$/ton)*	Precio neto (\$/ton)	Consumo de agua (m ³ /ton)	Precio neto por volumen de agua (\$/m ³)
Uva	12	332	16	18 330	8 575	9 755	0.8	13.0
Naranja	13	37	20	3 200	8 545	2 655	0.6	4.1
Nuez	15	31	3	38 000	7 985	30 015	6.0	5.0
Garbanzo	6	5	2	9 130	4 795	4 335	2.9	1.5
Calabaza	5	95	19	4 186	1 234	2 952	0.3	11.5
Sandía	5	89	34	1 608	796	812	0.1	6.2
Trigo	7	3	6	2 200	1 794	406	1.1	0.4

* No incluye costos de tierra, agua ni mano de obra.

Fuente: elaboración propia, con datos de SAGARPA (2008).

Figura 5

Resultados para los modelos de programación lineal

Modelo	Valor neto de la producción (millones de pesos)	Producción (toneladas)					Precio sombra del agua (\$/m ³)
		Superficie sembrada (hectáreas)					
		Uva	Naranja	Nuez	Calabaza	Garbanzo	
1	2 316	97 209 (6 076)	302 094 (15 105)	12 983 (6 492)	51 270 (2 698)	5 858 (976)	1.10
2	1 885	118 415 (7 401)	71208 (3 560)	12 983 (6 492)	51 270 (2 698)	-	3.07
3	1 502	131 022 (8 189)	-	2 442 (1 221)	51 270 (2 698)	-	4.35
4	1 564	139 191 (8 699)	-	6 225 (3 113)	6 812 (359)	-	3.87

De acuerdo con los resultados para el primer modelo (statu quo), el valor máximo de la función objetivo sería de 2 316 millones de pesos como el neto de la producción agrícola. La asignación óptima de los cultivos estaría dada por 97 209 toneladas de uva en 6 076 hectáreas; 30 2094 de naranja, en 15 105 ha; 12 983 de nuez, en 6 492 ha; 51 270 de calabaza, en 2 698 ha y 5 858 de garbanzo,

en 976 hectáreas, con un precio sombra del agua estimado en 1.10 pesos por metro cúbico. En la figura 5 también se incluyen los resultados del segundo modelo. Aquí la estimación del precio sombra del agua de 3.07 pesos por metro cúbico es casi tres veces más que en el de statu quo, lo que refleja la escasez del recurso una vez que se considera sólo la recarga del acuífero.

En la misma figura 5 aparecen las cifras del tercer modelo. En cuanto al precio sombra del agua estimado, de 4.35 pesos por metro cúbico, muestra la condición de escasez del agua de manera más realista, pues se ha considerado que la disponibilidad se reduce a 60 por ciento de la recarga estimada, una vez tomada en cuenta la intrusión salina. Y, por último, la figura contiene las características del cuarto modelo. En este caso, mediante el riego presurizado se produce uva con 10 mil m³ por hectárea en lugar de 12 mil m³, lo cual permite obtener un resultado óptimo más alto. Aquí, el precio sombra del agua estimado es de 3.87 pesos por metro cúbico.

Como se esperaba, los cultivos de mayor valor aparecen dentro de la asignación óptima, a diferencia de los de baja rentabilidad como el trigo. Los cultivos sugeridos por el modelo son además una importante fuente de divisas, ya que su exportación representa una gran ventaja por la localización geográfica de Hermosillo, cerca de la frontera norte del país. Tan sólo en el ciclo 2007-2008, las exportaciones de uva significaron 247.2 millones de dólares; las de nuez casi 7.1 millones y las de calabaza 130.2 millones. Por su parte, el trigo reportó ingresos por 394.2 millones de dólares, pero el volumen de exportación fue de 876 007 toneladas, contra 95 232 de uva, 2 025 de nuez y 90 mil de calabaza (SAGARPA 2008). Es decir, mientras el precio por tonelada de estos tres últimos productos es de más de mil dólares (incluso la nuez supera los 3 000), el trigo alcanza poco menos de 500 dólares por tonelada.

El primer modelo tiene el mayor valor neto de la producción, pero no corresponde a un escenario de manejo sustentable, debido a que implica la sobreexplotación del acuífero. El valor neto ofrecido por el segundo es mayor que el tercero y cuarto, pero tampoco puede considerarse como un manejo sustentable pues, a pesar de que restringe la extracción de agua a la recarga neta del acuífero, no toma en cuenta el volumen actual de intrusión salina. Y aunque el

tercer modelo sí lo considera, tiene el menor valor neto de producción, con 1 502 millones de pesos. De este modo, el cuarto cuenta con el mayor valor neto de la producción y límites de extracción sustentables, pues bajo esta asignación de cultivos se tendría un valor de producción bruto de 2 816 millones de pesos y uno neto de 1 564.

En 2005, el valor de la producción en el DR051 fue de 2 897 millones de pesos, lo cual a precios de 2007 equivale a 3 148. Esto quiere decir que con manejo sustentable se obtendría 90 por ciento del valor actual; es decir, éste no se alteraría de manera sustancial, pero produciría 23 pesos por m³ de agua en lugar de los 7.70 de la actualidad.

Los modelos 3 y 4 arrojan un precio sombra del agua de 4.35 y 3.87 pesos por metro cúbico respectivamente, lo cual contrasta con el pagado por los agricultores de la Costa de Hermosillo; la cuota de riego para 1995-1996 fue de 3 pesos por cada mil metros cúbicos; mientras que para el ciclo 2005-2006 fue de 6.38 (Quevedo 2007, 19). Cabe destacar que esta cuota no es un cobro por concepto del agua extraída, sino que es para cubrir los costos del funcionamiento y administración del DR051 y de la AUDR051. En términos prácticos, los agricultores no pagan el agua que utilizan en la producción, pues el único cobro existente es de 13 centavos por metro cúbico sólo si se excede el volumen total concesionado (CONAGUA 2010a, 128), lo cual además es difícil de determinar porque sólo la mitad de los pozos del DR051 cuenta con medidor volumétrico funcionando (Ibid. 2007, 12). Por otro lado, el precio estimado por bombeo es de 0.25 pesos por m³ con base en una tarifa promedio de 0.32 pesos por kW (Olavarrieta et al. 2010). Según estos datos, el costo del agua en el distrito se encuentra muy por debajo del valor del recurso, y no refleja la escasez característica de la región.

Conclusiones

Los cultivos más rentables en el distrito de riego de la Costa de Hermosillo son la uva, calabaza y nuez, esto debido a la escasez de

agua dulce, el número de hectáreas en funcionamiento y la fuerza de trabajo disponible. La siembra recomendada, según el patrón de asignación óptima, reduciría 10 por ciento el valor de la producción actual, al mismo tiempo permitiría la explotación sustentable del acuífero, al considerar su recarga media natural. En otras palabras, se produciría 90 por ciento del valor actual con 33.4 del agua extraída por los usuarios agrícolas de la AUDR051 en la última estimación (377 Mm³) (Olavarrieta et al. 2010). Además, dichos cultivos también son de exportación, por lo que representan una fuente importante de divisas (SAGARPA 2008).

De acuerdo con los resultados de este estudio, la política de administración de agua agrícola debe estar orientada hacia: a) la eliminación de subsidios que distorsionan el verdadero valor del agua empleada en la agricultura; b) la aplicación de medidas que faciliten la reconversión de cultivos en la zona, aprovechando su ubicación geográfica que posibilita el acceso a un mercado en crecimiento y con gran poder adquisitivo; c) la puesta en operación de mayor proporción de hectáreas con técnicas de riego más eficientes, como el sistema presurizado, que utilizará menos recursos para la producción o para aumentarla, dentro de los límites de disponibilidad y d) el establecimiento de medidas que mejoren los procesos de toma de decisiones y la administración general del acuífero, pues aunque existe normatividad no se cumple o no hay medios suficientes para vigilar y sancionar los incumplimientos en el uso del agua agrícola.

Por otra parte, con respecto a los factores sociales y administrativos que intervienen en la explotación del acuífero, es posible plantear algunas alternativas a las existentes en la Ley de Aguas Nacionales vigente, como la constitución del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) en el distrito, lo cual hasta la fecha no ha ocurrido a pesar de ser uno de los acuíferos principales del país. Esto contribuiría a ampliar la participación de todos los actores sociales involucrados en la producción agrícola, tomar acuerdos por consenso y adoptar las medidas más benéficas para los productores. Un ejemplo nacional relevante es el acuífero de Santo Domingo, en Baja California Sur, en donde a través de la constitución y operación del COTAS se igualaron los volúmenes de extracción de agua con la recarga natural (Cisneros 2008).

La constitución del COTAS permitiría también concretizar asuntos necesarios para la administración sustentable del agua en el distrito, como la elaboración y aprobación del reglamento (pendiente desde la transferencia de 1994, que sustituiría al de 1963), y la instalación de medidores volumétricos que funcionen en todos los pozos, que en la actualidad representa 50 por ciento del total. Otros caminos son la creación, dentro de los COTAS, de espacios de interacción social que reconozcan la heterogeneidad de actores, percepciones y posiciones respecto a los usos del agua, y el apoyo a programas de ahorro que no pasan necesariamente por la tecnificación con riego presurizado, como ha ocurrido en Guanajuato (Moreno et al. 2010).

Otro camino viable es la mayor promoción y difusión del Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua en la cuenca baja del río Sonora, que busca reconvertir a productores que utilizan la mayor parte del agua en la siembra de granos y forrajes a la de hortalizas, en módulos de alrededor de 110 hectáreas con sistemas modernos de riego, cuya inversión puede provenir de la venta de una parte de sus derechos de agua.

Además, un tema importante que surge de este trabajo es la competencia entre los usuarios agrícolas y el público urbano en la distribución del agua disponible en el municipio. El organismo operador Agua de Hermosillo ya compró derechos de extracción, para dotar del recurso a la ciudad; pero el precio sombra estimado en este análisis puede ser el referente para tomar decisiones de política pública, si en un futuro se desean adquirir de nuevo derechos de extracción en la zona de la Costa de Hermosillo.

Por último, se recomienda el desarrollo de modelos que incluyan indicadores ambientales asociados a la recarga del acuífero (volumen ambiental, clima y factores hidrológicos, entre otros); pues aunque pueden resultar difíciles de cuantificar, su inclusión significará una mejor representación de la realidad y, por consiguiente, podría mejorar la precisión de las estimaciones. De igual manera, es pertinente la inclusión de variables del contexto social y político-institucional en el análisis de las características económicas y administrativas del distrito de riego 051, aspectos sobre los que no se ha profundizado en el presente estudio.

Bibliografía

- Andrews, Robert. 1981. Salt-water Intrusion in the Costa de Hermosillo, Mexico: A Numerical Analysis of Water Management Proposals. *Ground Water* 19 (6): 635-647.
- Ariel Construcciones S. A. 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora, México. Hermosillo.
- Banco Mundial. 2005. Implementation Completion Report on a Loan/Credit/Grant in the Amount of us \$186.5 Million to the Federal Republic of Mexico for a Water Resources Management Project. Reporte no. 34697. Banco Mundial.
- Bracamonte, Álvaro, Norma Valle y Rosana Méndez. 2007. La nueva agricultura sonorense: historia reciente de un viejo negocio. *región y sociedad* XIX (número especial): 51-70.
- Cabanillas, Cecilia. 1985. Determinación de patrones óptimos de cultivos para la región agrícola de la Costa de Hermosillo. Tesis de ingeniero industrial administrador, Universidad de Sonora.
- Cárdenas, Efraín. 1981. Determinación de un patrón de cultivos óptimo que satisfaga la disponibilidad de agua existente en la Costa de Hermosillo. Tesis de maestría en administración, Universidad de Sonora.
- Castillo, José. 2000. La intrusión salina en la Costa de Hermosillo, Sonora, México. En *Quinto seminario. Acuíferos costeros de Sonora*, 50-60. Hermosillo: Universidad de Sonora.
- Castro, José Arturo. 1998. Modelo numérico de intrusión salina en la Costa de Hermosillo, Son., con base en estudios geofísicos. Tesis de maestría en ciencias, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Cisneros, Olga Xóchitl. 2008. La gestión del agua a través de los cotas en México. Análisis de su gestión en cuatro estudios de caso. En *La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas*, tomo 1, editado por Denise Soares, Sergio Vargas y María Rosa Nuño, 257-280. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CONAGUA. 2010a. *Estadísticas del agua en México*, edición 2010. México: CONAGUA.
- _____. 2010b. Disponibilidad de agua subterránea. Estado de Sonora. [http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?id=Disponibilidad por acuifero|Agua subterránea|0|62|0|0|0](http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?id=Disponibilidad%20por%20acuifero|Agua%20subterranea|0|62|0|0|0) (11 de abril de 2011).
- _____. 2009. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2619) Costa de Hermosillo, estado de Sonora. México: Subdirección General Técnica de la CONAGUA. http://www.conagua.gob.mx/aguasubterranea/pdf/DR_2619.pdf (29 de abril de 2010).
- _____. 2007. *Estadísticas del agua en México*. México: CONAGUA.
- _____, Organismo de Cuenca Noroeste y Colegio de Postgraduados. 2007. *Plan director para la modernización integral del riego del distrito de riego 051, Costa de Hermosillo, Sonora*. México: CONAGUA y Colegio de Postgraduados.
- _____, PROMMA. 2003. *Manejo sostenible del agua con protección de su calidad en la Costa de Hermosillo y la cuenca del río Sonora*. México: CONAGUA-PROMMA.
- _____. 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Costa de Hermosillo, estado de Sonora*. México: Subdirección General Técnica de la CONAGUA.
- Comunatec, S. A. 1986. *Proyecto ejecutivo para el aprovechamiento integral de la presa Abelardo L. Rodríguez y el ordenamiento ecológico del distrito de riego Costa de Hermosillo*. Hermosillo.

- Cruz, Miguel. 1969. El proceso administrativo en la agricultura de la Costa de Hermosillo. Tesis de ingeniero agrónomo, Universidad de Sonora.
- Félix Sánchez, José Ángel. 2004. Subsidios y rentabilidad de la agricultura en el distrito de riego 051, Costa de Hermosillo, Sonora. Trabajo presentado en Foro del Agua, tercera reunión. Universidad de Sonora, Hermosillo.
- Florencio Cruz, Valentín, Ramón Valdivia Alcalá y Christopher A. Scott. 2002. Productividad del agua en el distrito de riego 011, alto río Lerma. *Agrociencia* 36 (4): 483-493.
- Halvorson, William, Alejandro E. Castellanos y Joaquín Murrieta Saldivar. 2003. Sustainable Land Use Requires Attention to Ecological Signals. *Environmental Management* 32 (5): 551-558.
- Hewitt, Cynthia. 1982. *La modernización de la agricultura mexicana 1940-1970*. México: Siglo XXI.
- Jiménez, B., y L. Marín (editores). 2004. *El agua en México vista desde la academia*. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Loáiciga, Hugo. 2003. Sustainability and Ground Water. En *Water Resources Systems. Hydrological Risk, Management and Development*, editado por Günter Blöschl, Stewart Franks, Michio Kumagai, Katumi Musiaka y Dan Rosbjerg, 313- 321. Oxfordshire: International Association of Hydrological Sciences.
- Monreal, R., M. Rangel, J. Castillo y M. Morales. 2002. *Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero de la Costa de Hermosillo, municipio de Hermosillo, Sonora, México*. Hermosillo: Universidad de Sonora.
- Moreno Vázquez, José Luis. 2006. *Por debajo del agua. Sobreexplotación y agotamiento del acuífero de la Costa de Hermosillo, 1945-2005*. Hermosillo: El Colegio de Sonora.

- _____, Boris Marañón Pimentel y Dania López Córdova. 2010. Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social. En *El agua en México: cauces y encauces*, editado por Blanca Jiménez Cisneros, María Luisa Torregrosa y Armentia y Luis Aboites Aguilar, 79-115. México: Academia Mexicana de Ciencias y CONAGUA.
- Olavarrieta, María Victoria, Christopher J. Watts y Juan A. Saiz Hernández. 2010. Beneficios de la cuota energética. Estudio de caso de la Costa de Hermosillo, Sonora, México, 2006-2007. *región y sociedad* xxii (47): 145-164.
- OCDE. 2003. *Evaluación del desempeño ambiental México*. París: OCDE y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Puebla Menchaca, Víctor Manuel. 1987. Estudio geo-hidrológico de la Costa de Hermosillo. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Quevedo, José Luis. 2007. Propuesta de acción para la gestión integrada en la Costa de Hermosillo, Sonora. Tesina de la especialidad en gestión integrada de cuencas hidrológicas, El Colegio de Sonora.
- Rangel, M., R. Monreal, M. Morales y J. Castillo. 2003. Caracterización geoquímica e isotópica del agua subterránea y determinación de la migración de la intrusión marina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora. En *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*, editado por J. A. López Geta, J. de Dios Gómez, J. A. de la Orden, G. Ramos y L. Rodríguez, 325-335. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Rodríguez, Beatriz y María Elvira Pérez. 1991. Estudio hidrogeoquímico de la Costa de Hermosillo y el valle de Guaymas en el estado de Sonora. Tesis de ingeniero geólogo, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.

- SAGARPA. 2008. Ruta: "OEIDRUS- Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Sonora" > "Estadística Agrícola." http://www.oeidrus-portal.gob.mx/oeidrus_son/ (22 de junio de 2010).
- Steinich, Birgit, Isabel Simón, Andrés Chavarría y Luis E. Marín. 1997. Geophysical Investigations of the Vadose Zone in the Valley of Hermosillo Aquifer, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional* 36 (3): 191-200.
- _____, Oscar Escolero y Luis E. Marín. 1998. Salt-water Intrusion, and Nitrate Contamination in the Valley of Hermosillo and El Sahuaral Coastal Aquifers, Sonora, Mexico. *Hydrogeology Journal* 6: 518-526.
- Valenzuela, Erasmo. 1997. *Barriers, and Opportunities for Sustainable Development: A Case Study in Western Central Sonora*. Tucson: University of Arizona.
- Vega, Lourdes y Juan Saiz. 1995. Estudio del balance de agua de la zona agrícola de la Costa de Hermosillo. *Boletín del Departamento de Geología*. Universidad de Sonora 12 (2): 93-104.
- Zambrano, Ovidio. 1971. Análisis económico del uso de agua, mano de obra y maquinaria agrícola en la Costa de Hermosillo. Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados, Centro de Economía Agrícola, Chapingo.