

Análisis del uso del agua del acuífero Cuauhtémoc, Chihuahua, México

Water use analysis in the Cuauhtemoc Aquifer, Chihuahua, Mexico

Ana Laura Santos-Hernández¹

Enrique Palacios-Velez²

Enrique Mejía-Saenz³

Jaime Arturo Matus-Gardea⁴

Arturo Galvis-Spíndola⁵

David Vásquez-Soto⁶

Roberto Ascencio-Hernández⁷

Salvador Agustín Peña-Díaz⁸

¹Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales, A. C., San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México, México, alsantoshernandez@gmail.com

²Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México, epalacio@colpos.mx

³Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México, mejiasae@gmail.com

⁴Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México, matus.jaime@gmail.com

⁵Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México, galvispinola@gmail.com

⁶Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales, A.C., San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México, México, david.vsoto@gmail.com

⁷Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México, ascenciohr@gmail.com

⁸Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
México, salvadorpd@colpos.mx

Autor para correspondencia: Ana Laura Santos-Hernández,
alsantoshernandez@gmail.com

Resumen

Chihuahua es un estado árido que cuenta con pocas fuentes de agua superficial y utiliza para el riego principalmente fuentes de agua subterránea, cuyo volumen extraído tiene tendencia creciente. El acuífero Cuauhtémoc se ha explotado por varias décadas, en particular para el suministro de agua en la agricultura, y registra extracciones de volúmenes de agua mayores a la recarga, lo que ha generado sobreexplotación, con notables abatimientos de los niveles de bombeo. En las zonas de riego no ha sido posible cuantificar con regularidad la variación en superficies sembradas y regadas, así como el volumen empleado de agua. La estimación de estos volúmenes de agua se hizo a partir de la ubicación de los pozos usados para el riego y la evaluación de las superficies cultivadas. Para 2012 se ubicaron 1 317 unidades de riego abastecidas por 1 818 aprovechamientos de agua, cubriendo una superficie física de 55 555 hectáreas regadas, donde 92% del agua utilizada es subterránea; además, se cultivan de temporal poco más de 62 mil hectáreas; sin embargo, el reporte del SIAP para ese año fue de 47 792 hectáreas regadas, 7 763 menos que las detectadas. La superficie cultivada se concentra en dos cultivos: maíz (87.0%) y manzana (11.9%). Sin embargo, mediante la cuantificación de las superficies de cultivos en pie realizado para los años 2015 y 2016, se aprecia que la agricultura ha crecido por fuera de las áreas delimitadas en 2012, lo que implica un mayor consumo de agua subterránea.

Palabras clave: acuífero Cuauhtémoc, balance de agua, superficie cultivada.

Abstract

Chihuahua is an arid state that have few sources of surface water and uses mainly underground water for irrigation. The volume extracted of these sources has an increasing tendency. The Cuauhtémoc aquifer was overexploited for several decades mainly for the water supply for

irrigation and usually the extraction of water volume is much greater than the recharge, which has generated overexploitation with wide abatements of the static levels. In the irrigated areas, it has not been possible to quantify regularly the variation of the irrigated area as well the volume of water used. The estimation of the water volume used for irrigation has been based in the irrigated areas. For 2012, 1 317 irrigated units were located, supplied by 1 818 water exploitations, covering a physical area of 55 555 hectares, where 92% of the water used is underground, in addition, more than 62 000 hectares are rain fed agriculture. The cultivated area is concentrated in two crops: corn (87.0%) and apple (11.9%). However, by quantifying the areas of standing crops carried out for the years 2015 and 2016, it is show that the agriculture has grown outside the areas defined in 2012, which implies a greater consumption of groundwater.

Keywords: Acuífer Cuauhtemoc, water balance, cultivated area.

Recibido: 18/01/2018

Aceptado: 24/11/2018

Introducción

El estado de Chihuahua cuenta con fuentes de agua superficial y subterránea. Dado que las precipitaciones son reducidas en estas zonas, el mayor aprovechamiento de agua es de origen subterráneo.

El acuífero Cuauhtémoc se ha explotado desde hace varias décadas, sobre todo para el suministro de agua empleada en la agricultura y, en menor proporción, es utilizado para dotar de agua a la población.

En las zonas de riego no ha sido posible cuantificar con regularidad la variación en superficie sembrada ni volumen de agua de riego; asimismo, se desconoce el grado de eficiencia en el uso del agua. En este acuífero, las lluvias juegan un papel importante en la producción agrícola, al aportar una cantidad de agua considerable al requerimiento

de los cultivos, en particular en el ciclo de primavera-verano y en segundos cultivos, requiriendo láminas de riego menores que las utilizadas en cultivos de otoño-invierno. Con la amplia superficie regada con agua del acuífero han sido extraídos volúmenes mayores a los de recarga, lo cual ha provocado sobreexplotación severa, que en muchos sitios se traduce en notables abatimientos de los niveles estáticos, que a su vez generan problemas de tipo social y económico.

Pineda-Pastrana (2011) señala que para analizar el cambio de uso de suelo se requiere de herramientas precisas y consistentes. Los sensores remotos y los sistemas de información geográfica son una opción para cuantificar los cambios ocurridos en un territorio, los cuales son difíciles de comprender y es necesario estudiarlos de manera holística.

Así, el área agrícola no puede verse como un sistema apartado de procesos sociales, se debe concebir como conjunto integrado por una parte natural y una social, dinámicos y sujetos a transformaciones a través del tiempo.

Por otro lado, mapear los usos del suelo ha sido una práctica aceptada desde 1940 mediante el uso de fotografías aéreas. Los cambios físicos en el uso del suelo han sido identificados a través de los mapas obtenidos por estos métodos y han permitido hacer inferencias sobre las razones económicas y sociales involucradas en dichos cambios. Una forma de evaluar los cambios en el uso del suelo es a partir de la medición de los cambios en la cobertura vegetal del mismo. De forma tradicional, la medición de cambios de cobertura vegetal y uso de suelo se realiza con base en información generada a partir de percepción remota (por lo general con fotografías aéreas e imágenes de satélite). Entender las causas que originan el cambio de uso y cobertura del terreno significa estudiar factores ambientales y socioeconómicos que afecta su uso.

Por su parte, Ponvert y Lau (2013) señalan que muchos de los impactos del empleo de las tecnologías agrícolas son susceptibles de ser detectados por la huella que producen al medio ambiente a través de sistemas de sensores, como fotografías aéreas e imágenes de satélite, al igual que mediante la observación directa "in situ" utilizando técnicas de relevamiento en campo. También las distintas variables espaciales pueden convertirse en capas de información que son almacenadas, procesadas y analizadas mediante sistemas de información geográfica (SIG).

Los avances en el monitoreo de cultivos agrícolas y mediante las metodologías de la agricultura de precisión (AP) en la producción primaria y la cartografía de la cubierta terrestre hacen posible el monitoreo. Como un ejemplo se tiene la estimación del estado en que se encuentra un cultivo como el de la caña de azúcar en una región determinada a escala predio o unidad productiva debido a la longevidad del cultivo, el bajo costo de adquisición de imágenes, cobertura espacial y posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang, Anderson, Huang, & Myneni, 2005).

Aguilar, Galindo, Fortanelli y Contreras (2010) señalan que las técnicas de percepción remota (PR) con imágenes Landsat y los sistemas de información geográfica (SIG), así como con los sistemas de geo posicionamiento (GPS) son herramientas útiles en la identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas; estimación de la producción; detección de enfermedades y estrés a través del análisis de la distribución espacial; el mapeo de las diversas zonas productivas; direccionamiento del muestreo, y observación en campo, promoviendo una mayor evaluación del potencial productivo de las áreas sembradas dentro de la agricultura de precisión o de sitio específico, con base en la variabilidad espacial del suelo y parámetros de campo de los cultivos.

Hatfield, Gitelson, Schepers y Walthall (2008) señalan que los sistemas de información geográfica brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos es posible obtener información sobre las características de las coberturas vegetales, utilizando diferentes técnicas de procesamiento de imágenes, como el cálculo de índices de vegetación a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda; se pretende extraer información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de otros factores externos en la toma de decisiones.

Como indica Pineda-Pastrana (2011), el uso de los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota representan una visión clara para dar seguimiento temporal en las zonas agrícolas durante las fases de desarrollo de los cultivos.

En el acuífero Cuauhtémoc, las dependencias federales han llevado a cabo diversos estudios. En 1973, la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) acordó un estudio desde el punto de vista geohidrológico, cuyo objetivo fue levantar un censo de aprovechamientos de aguas

subterráneas y conocer las condiciones de explotación existentes en acuíferos regionales (SRH, 1973).

En 1982, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) contrató un estudio que incluía el acuífero Cuauhtémoc, que buscaba conocer el grado de explotación de los acuíferos; determinar el comportamiento y evolución de los niveles del agua; evaluar la potencialidad del acuífero para determinar los volúmenes disponibles de agua; definir la calidad del agua, y efectuar recomendaciones de zonas con buena calidad a fin de planear su aprovechamiento racional (SARH, 1982).

A partir de la creación de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) se han realizado diversos estudios contratados a empresas o instituciones públicas, como el hecho en 1991 para la actualización del estudio geohidrológico. También se analizaron las políticas de operación. Además de elaborar un proyecto de manejo del acuífero, se trató de un estudio de actualización geohidrológica y modelación, contratado por la necesidad de tener los elementos técnicos para tomar decisiones ante los evidentes síntomas de sobreexplotación del acuífero.

En 1998 se trabajó en la formación del modelo de simulación hidrodinámica del acuífero Cuauhtémoc. En 2000 se realizó un estudio para conocer la magnitud y distribución espacial de las extracciones del acuífero; identificar sitios propicios donde implementar acciones específicas de desarrollo o preservación, así como proponer y planear estrategias futuras sobre el manejo del acuífero.

En 2001 se realizó el estudio de actualización de mediciones piezométricas en varios acuíferos. En 2002 se determinó la disponibilidad de agua en el acuífero Cuauhtémoc. En 2005 se delimitó el acuífero con base en la recopilación y análisis de los estudios previos, para definir la situación del conocimiento hidrogeológico en dicho momento.

En 2009 se reportó la actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. En este documento se indica que el acuífero presenta un déficit de 207.1 hm³/año, lo cual señala la gravedad de la situación; además reporta que la extracción es de 190.9 hm³/año y el volumen concesionado es de 322.3 hm³/año.

En 2010 se realizó un estudio y medición de eficiencias electromecánicas en 63 equipos de bombeo dentro del acuífero, especialmente en pozos para suministro de agua potable.

Objetivos

El objetivo de este trabajo fue analizar el uso del agua en las zonas agrícolas de riego del acuífero Cuauhtémoc, tomando como referencia el balance del acuífero, y la estimación de superficies sembradas y de volúmenes de agua utilizados. Lo anterior, a partir del uso de técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica.

Características generales del acuífero Cuauhtémoc

El acuífero Valle de Cuauhtémoc, denominado con el número 0805 por la Comisión Nacional del Agua (DOF, 2001), se ubica en la parte central del estado de Chihuahua entre los paralelos $28^{\circ} 15'$ y $28^{\circ} 57'$, así como entre los meridianos $106^{\circ} 30'$ y $107^{\circ} 11'$ de longitud oeste (DOF, 2009), y abarca un área de $3\,411\text{ km}^2$ (Figura 1). Este acuífero abarca casi la totalidad del municipio de Cuauhtémoc; de forma parcial los municipios de Riva Palacio, Cusihuirachi, Bachiniva, y un área muy reducida de los municipios de Chihuahua y Guerrero.

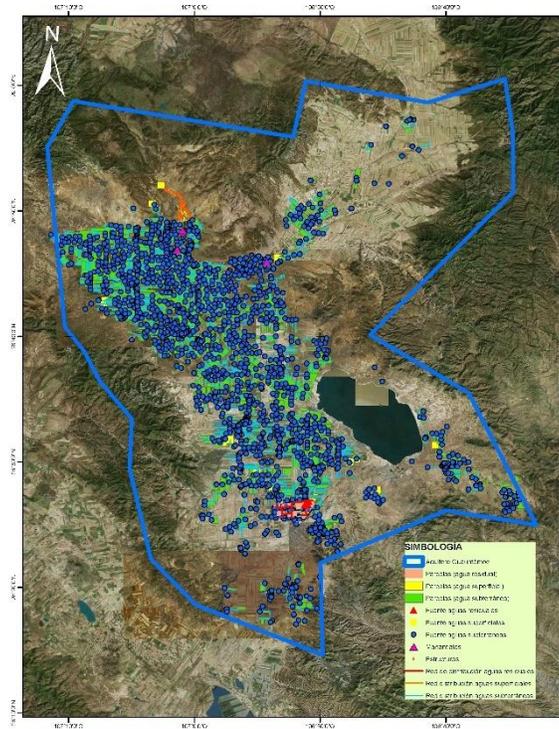


Figura 1. Aprovechamientos de agua y zona agrícola dentro de la poligonal oficial del acuífero de Cuauhtémoc. Fuente: elaboración propia con información de campo.

Análisis de la situación actual de los aprovechamientos de agua subterráneos y superficiales en el acuífero Cuauhtémoc

Para el análisis del uso del agua en el acuífero Cuauhtémoc, en 2012 se realizó el levantamiento de infraestructura hidroagrícola en unidades de riego, que de acuerdo con el DOF (2016) son "áreas agrícolas que cuenta con infraestructura y sistemas de riego, distinta de un distrito de riego y comúnmente de menor superficie que aquél; puede integrarse por asociaciones de usuarios u otras figuras de productores organizados

que se asocian entre sí libremente para prestar el servicio de riego con sistemas de gestión autónoma y operar las obras de infraestructura hidráulica para la captación, derivación, conducción, regulación, distribución y desalojo de las aguas nacionales destinadas al riego agrícola". En dichas unidades de riego se identificaron aprovechamientos de agua superficiales y subterráneos, superficie de riego (delimitación de predios), red de conducción y estructuras, sistemas de riego y tipo de cultivo; también se ubicaron los aprovechamientos de uso público urbano y uso residual existentes.

Uso agrícola

Dentro del acuífero se ubicaron 1 317 unidades de riego (Tabla 1), mientras que la clasificación de dichos aprovechamientos por tipo de uso y volumen concesionado se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Censo de aprovechamientos el acuífero Cuauhtémoc. Fuente: elaboración propia con datos de campo.

Tipo de aprovechamiento	Número de aprovechamientos		Superficie física (ha)	Número de unidades de riego
	Total	Inactivos		
Superficial	30	3	801	
Residual	1		573	
Subterráneo agrícola	1 783	82	54 133	
Subterráneo público urbano	142	5		
Manantial	4		48	
Total	1 960	90	55 555	1 317

Tabla 2. Uso de los recursos en unidades de riego del acuífero Cuauhtémoc. Fuente: elaboración propia con datos de campo.

Año	Uso	Número de	Volumen	Superficie
-----	-----	-----------	---------	------------

		aprovechamientos activos	(hm³)	agrícola (ha)
2012	Subterráneo agrícola	1 701	352.7	54 133
	Subterráneo público urbano	137	18.6	
	Subterránea pecuario		5.0	
	Manantiales agrícolas	4	0.3	48
	Superficial agrícola	27	4.8	801
	Residual agrícola	1	3.6	573
	Total	1 870	385.0	55 555

Otros resultados del levantamiento de infraestructura en unidades de riego muestran la superficie sembrada y su patrón de cultivos con el tipo de aprovechamiento correspondiente (Tabla 3), mientras que en la Tabla 4 se presentan los sistemas de riego encontrados en las unidades de riego con su respectivo cultivo.

Tabla 3. Superficie sembrada y patrón de cultivos. Fuente: elaboración propia con datos de campo.

Cultivo	Superficie por tipo de aprovechamiento (ha)			
	Subterráneo	Superficial	Residual	Total
Maíz	47 106.83	670.75		47 777.58
Manzana	6 459.17	168.25	572.88	7 200.30
Frijol	218.60	10.00		228.60
Avena	215.00			215.00
Asociación de cultivos*	51.00			51.00
Otros cultivos**	82.80			82.80
Total	54 133.40	849.00	572.88	55 555.28

*Dos cultivos sembrados de manera conjunta.

**Otro cultivo: cerezo, durazno, frijol, hortalizas, jitomate, sorgo, tomate, uva.

Tabla 4. Superficie sembrada por tipo de cultivo y sistema de riego.
Fuente: elaboración propia con datos de campo y del Sistema de Información Geográfica del acuífero Cuauhtémoc, 2012.

Cultivo	Multicompuertas		Microaspersión		Pivote central		**Otro tipo de riego		Total	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Maíz	44,554.73	80.20	45.50	0.08	1,722.70	3.10	1,317.45	2.37	47,640.39	85.75
Manzana	776.13	1.40	5,810.66	10.46	0.00	0.00	613.50	1.10	7,200.29	12.96
*Otro cultivo	383.60	0.69	10.00	0.02	81.00	0.15	240.00	0.43	714.60	1.29
Total	45,714.46	82.29	5,866.16	10.56	1,803.70	3.25	2,170.95	3.90	55,555.28	100.00

* Otro cultivo: alfalfa, avena, avena y trigo, cerezo, durazno, frijol, hortalizas, jitomate, maíz elotero, maíz forrajero, maíz y avena, maíz y frijol, sorgo, tomate, uva.

** Otro tipo de riego: aspersión; aspersión y tubería multicompuertas; avance frontal; goteo, gravedad, microaspersión y tubería multicompuertas; pivote central y tubería multicompuertas.

Dado que el principal y mayor usuario de agua en el acuífero Cuauhtémoc es el sector agrícola, se estimó el volumen de agua extraído a partir de láminas brutas de riego determinadas en el trabajo de Conagua (2000) y considerando los actuales sistemas de riego. En el caso del maíz, se consideró una eficiencia total de riego de 55% y en otros cultivos de 49%, por lo que la Tabla 5 muestra los volúmenes de extracción en el sector agrícola utilizados en el cálculo de volúmenes empleados en 2012.

Tabla 5. Láminas de riego y volúmenes estimados. Fuente: elaboración propia con datos de Conagua (2000).

Cultivo	Maíz	Otros cultivos	Manzana
Número de riegos	6	5	21
Requerimiento de riego (cm)*	34.4	26.8	74.0
Eficiencia total de riego**	55%	49%	90%
Lámina bruta de riego (cm)***	63	53	82
Superficie (ha)	47 107	567	6 459

Volumen (hm ³ /año)	296.7	3.0	53.0
Volumen total extraído (hm ³ /año)	352.7		

* El requerimiento de riego es la cantidad de agua que necesita el cultivo para sobrevivir; varía con los factores ambientales, climáticos y de suelo.

** La eficiencia total de riego es igual al producto de la eficiencia de conducción y eficiencia de aplicación.

***La lámina bruta de riego es la lámina neta de riego afectada por la eficiencia total de riego.

Uso público urbano

Respecto al uso público urbano se ubicaron 142 aprovechamientos, de los cuales 76 tienen título de concesión, lo que ampara un volumen de unos 11 hm³/año. Sin embargo, se ha estimado que la extracción para este uso (que incluye 5 hm³/año para uso pecuario) es de 23 hm³/año estimados como extracción.

Vedas para el aprovechamiento de aguas del subsuelo

Un aspecto relevante es que prácticamente todo el acuífero Cuauhtémoc está vedado para el alumbramiento de aguas subterráneas y sólo una pequeña parte en la zona noreste no lo está, lo que hace posible la implementación de un reglamento específico del uso del agua en esta zona o simplemente un acuerdo con los usuarios.

Disponibilidad media anual de agua subterránea

De acuerdo con la actualización de disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero Cuauhtémoc (0805), publicada en 2009, no se tiene disponibilidad para el otorgamiento de nuevas concesiones para la explotación de este recurso en el acuífero mencionado (DOF, 2009).

En dicha publicación se menciona una recarga total de 115.2 hm³/año, un volumen comprometido nulo y un volumen concesionado de 322.3 hm³/año, lo que arroja un déficit de 207.1 hm³/año, según la norma; además de un volumen de extracción consignado en estudios técnicos de 190.9 hm³/año (Conagua, 2002).

Integración y análisis de un modelo de balance hídrico en el acuífero Cuauhtémoc

La extracción de aguas del subsuelo en acuífero Cuauhtémoc ha tenido un incremento considerable. Tomando en cuenta que la información disponible para analizar el desarrollo histórico de las extracciones corresponde al periodo 1973-2000, se determinó que la extracción pasa de 97.9 hm³/año a 381.3 hm³/año y actualmente hasta 352.7 hm³/año.

Las profundidades medias del nivel estático presentan un abatimiento creciente de 1973 a la fecha. El comportamiento de las profundidades del nivel estático entre 1973 y 2012 se presenta en la Figura 2.

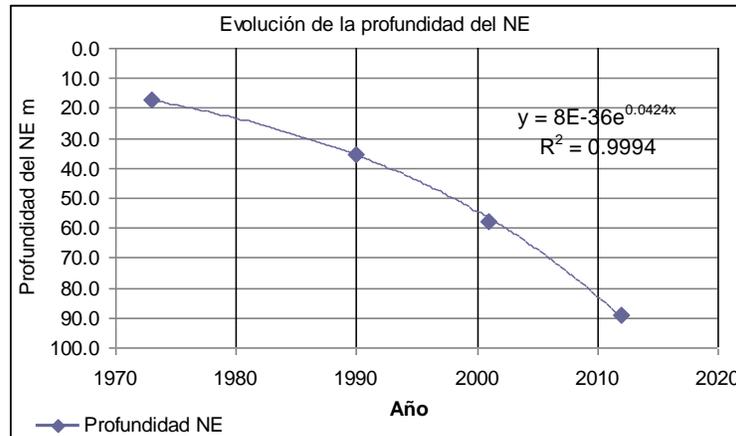


Figura 2. Profundidad media del nivel estático observado en Cuauhtémoc. Fuente: elaboración propia con datos del estudio.

Actualmente el acuífero presenta profundidades de sus niveles estáticos muy variables, pues van desde los 20 m hasta valores cercanos a 200 m. Las profundidades de 20 m se encuentran en las cercanías de la laguna Bustillos, mientras que al noreste del poblado Reforma se observan las mayores profundidades del nivel estático, que oscilan de 130 a 210 m.

Balance de aguas subterráneas del acuífero Cuauhtémoc

Como parte del análisis del acuífero Cuauhtémoc se elaboró el modelo conceptual del acuífero. Para conocer el orden de los volúmenes de agua que recargan al acuífero es fundamental señalar que las precipitaciones medias anuales en la región son del orden de 492 mm/año y que la temperatura media anual es de 13.2 °C, por lo que se estima que la infiltración es de unos 100 hm³/año, que corresponden a 6% de los volúmenes precipitados. Dicha información se incorpora en el balance de aguas subterráneas.

En el área de balance de aguas subterráneas se consideran tanto las partes altas, con un área de 1 649 km², como las de valle (1 762 km²), que están comprendidas dentro de la poligonal del acuífero, por tanto, el área total es 3 411 km². El balance de aguas subterráneas incluye los escenarios correspondientes a los años 1973, 1991, 2000 y 2012, ya que se contó con la información de los estudios correspondientes a tales años (Tabla 6).

Tabla 6. Balances de aguas subterráneas. Fuente: elaboración propias con datos de diversos estudios.

Año		1973 ⁽¹⁾	1991 ⁽²⁾	2000 ⁽³⁾	2012 ⁽⁴⁾
Área total del acuífero	km ²	3 411	3 411	3,411	3 411
Recarga natural por lluvia	hm ³ /año	52.7	52.7	52.7	52.7
Entradas horizontales	hm ³ /año	51.5	51.5	51.5	51.5
Recarga natural total	hm³/año	104.2	104.2	104.2	104.2
Retorno total	hm ³ /año	17.5	25.1	67.6	55.5
Entradas totales	hm³/año	121.7	129.3	171.8	159.7
Manantiales	hm ³ /año				0.3
Evapotranspiración	hm ³ /año	34.6	34.61	6.20	3.5
Salidas horizontales	hm ³ /año				0.0
Extracción total bruta	hm³/año	97.9	151.2	381.3	376.2
Agrícola	hm ³ /año	61.6	111.6	324.2	352.7
Público urbano	hm ³ /año	5.1	15.4	15.4	18.6
Industrial	hm ³ /año	25.0	18.0	35.4	
Otros	hm ³ /año	6.2	6.3	6.3	5.0
Descarga total	hm³/año	132.5	185.8	387.5	380.0
Minado	hm³/año	-10.9	-56.5	-215.7	-220.3
Extracción total neta	hm³/año	115.0	160.7	319.8	324.5
Recarga natural	hm³/año	104.2	104.2 (65%)	104.2 (33%)	104.2 (32%)
Minado del acuífero	hm³/año	-10.9	-56.5 (35%)	-215.7 (67%)	-220.3 (68%)
Abatimiento en el periodo		1.07	2.06	2.81	

⁽¹⁾ SRH, 1973.

⁽²⁾ Conagua, 1991.

⁽³⁾ Conagua, 2000.

(4) Datos de estudio.

Alternativas de solución a las problemáticas del acuífero Cuauhtémoc

Dada la problemática del acuífero Cuauhtémoc es necesario realizar el análisis de la productividad del riego, lo que permitirá generar alternativas de manejo del agua de riego que permitan utilizarla eficientemente y propiciar el incremento en la productividad de dicho recurso.

Las opciones de manejo de los recursos hídricos se enfocan sobre todo a los recursos provenientes del subsuelo y para el uso agrícola los que representan 92% del total de los recursos hídricos utilizados en la región. Durante los trabajos de campo se obtuvo el costo y valor de la producción mediante entrevistas que se realizaron a los productores. La Tabla 7 presenta el valor de la producción en cultivos irrigados en exclusivo dentro de los límites del acuífero.

Tabla 7. Cultivos irrigados con aprovechamientos de agua subterránea.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Costo de producción (millones \$)	Valor de la producción (millones \$)	Volumen (hm ³ /año)	Beneficio (\$/ha)	Beneficio (\$/m ³)
Maíz	47 107	87	755.2	1 446.9	296.7	14 684	2.33
Manzana	6 459	12	515.3	1 065.5	53.0	85 183	10.39
Otros cultivos	567	1	9.2	21.5	3.0	21 693	4.09
Total	54 133	100	1 279.7	2 533.9	352.7	23 169	3.56

De continuar las condiciones de sobreexplotación actual, los abatimientos del nivel estático seguirán a un ritmo importante. En 30 años la profundidad media del nivel estático se duplicará, al pasar de 90

a 170 metros en promedio dentro la zona de explotación del acuífero (Figura 3).

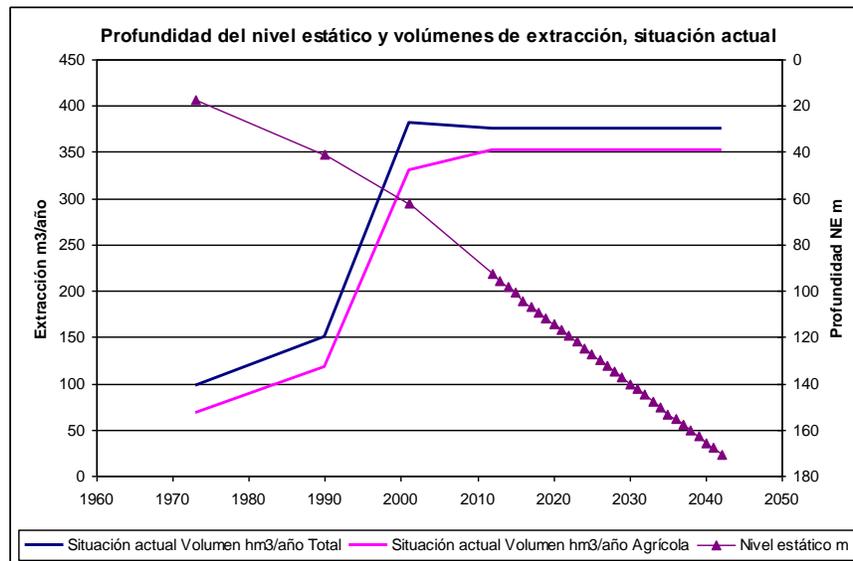


Figura 3. Extracción del agua subterránea bajo la situación actual y proyección del nivel estático. Fuente: elaboración propia con datos del estudio.

Ajuste de concesiones al volumen de extracción

Para modificar los abatimientos señalados, la extracción actual de 352.7 hm³/año se deberá disminuir hasta 189.4 hm³/año, al ajustar los volúmenes de extracción al volumen concesionado de 206.1 hm³/año, menos 16.7 hm³/año, por concepto de volúmenes concesionados que no se usan.

Para lograr este propósito se deberán realizar una serie de acciones para demostrar a los usuarios, a través de mediciones, que el volumen que usan se excede en relación con lo concesionado. Las mediciones pueden ser de forma directa con medidores, o de manera indirecta, como con láminas de riego o consumos de energía eléctrica, con el apoyo de

técnicas de percepción remota y utilizando la plataforma de sistemas de información geográfica.

En el segundo caso, necesariamente se tendrán que aforar todos los pozos y obtener una constante de proporcionalidad entre el consumo de energía y la extracción; constante que deberá corregirse cada año por lo menos debido al deterioro del pozo y/o equipo de bombeo, así como del incremento del nivel de bombeo; además, se requiere demostrar que el medidor de energía funciona de modo correcto.

Asimismo, deberán corregirse en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) las anomalías ya mencionadas. En este ejercicio de planeación se ha considerado un tiempo de cinco años para lograr tal ajuste y ordenar el sistema administrativo de la Comisión Nacional del Agua.

Estabilización del acuífero

Después se intentará estabilizar el acuífero, lo que significa igualar la recarga con la extracción; es decir, llevar la extracción hasta un valor cercano a los 100 hm³/año, que corresponde a la recarga natural. Para esto se han considerado otros cinco años más.

Efectos económicos

En la primera etapa, consistente en ajustar las concesiones al volumen de extracción, el valor de la producción disminuiría de 2 534 a 1 392 millones pesos anuales, con la consecuente disminución en los beneficios de los agricultores. En este caso el volumen de extracción disminuiría de 352.7 a 189.4 hm³/año.

En una segunda etapa se propone la estabilización del acuífero, donde el volumen bruto utilizado disminuiría hasta 86.6 hm³/año. En este caso, la superficie de maíz pasaría de 25 100 a 8 860 ha; la superficie sembrada de manzana se conserva.

Ambas etapas afectarían sólo al sector agrícola, lo que significa respetar los volúmenes de agua utilizado en el uso público urbano. La cuantificación de los costos y beneficios se presentan en la Tabla 8.

Cuadro 8. Propuesta de estabilización. Fuente: elaboración propia con datos del estudio.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje superficie (%)	Volumen bruto (hm ³ /año)	Costo de producción (millones de \$)	Valor de la producción (millones de \$)	Beneficio (millones de \$)	Beneficio (\$/m ³)
Situación (2012)							
Maíz	47 107	87	296.7	755.2	1,446.9	691.7	2.3
Manzana	6 459	12	53.0	515.3	1,065.5	550.2	10.4
Otros Cultivos	567	1	3.0	9.2	21.5	12.3	4.1
Total	54 133		352.7	1 279.7	2,533.9	1 254.2	3.6
Ajuste de concesiones (2013-2017)							
Maíz	25 100	87	158.2	404.2	770.7	366.5	2.3
Manzana	3,650	13	29.9	298.5	607.7	309.2	10.3
Otros Cultivos	250	1	1.3	6.1	14.0	7.9	5.9
Total	29 000		189.4	708.8	1 392.4	683.6	3.6
Estabilización recarga = extracción (2018-2022)							
Maíz	8 860	70	55.9	145.6	272.1	126.5	2.3
Manzana	3 650	29	29.9	298.5	607.8	309.3	10.3
Otros Cultivos	160	1	0.8	2.2	5.9	3.7	4.4
Total	12 670		86.6	446.3	885.8	439.5	5.1

Sin embargo, en la segunda etapa se requiere la cancelación de concesiones (103 hm³/año), lo que representa disminuir el beneficio

neto de los agricultores en un monto del orden de 240 millones de pesos anuales, cifra que deberá pagarse, pues legalmente existen concesiones.

Análisis del uso del agua en la agricultura del acuífero Cuauhtémoc

A partir de la actualización del modelo y el balance del acuífero se realizó el análisis del cambio en la superficie sembrada en el acuífero Cuauhtémoc. Se utilizaron herramientas de análisis, como las técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica e imágenes de satélite Landsat 8 para varias fechas de los años 2015 y 2016, tal como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Imágenes Landsat 8 utilizadas en la cuantificación de superficie sembrada en el acuífero Cuauhtémoc. Fuente: elaboración propia.

ID	Clave	Nombre	Fecha
1	LC80330402015163LGN00	LC0803304020150612	12/06/15
2	LC80330402015243LGN00	LC0803304020150831	31/08/15
3	LC80330402015307LGN00	LC0803304020151103	03/11/15
4	LC80330402016054LGN00	LC0803304020160223	23/02/16
5	LC80330402016166LGN00	LC0803304020160614	14/06/16
6	LC80330402016198LGN00	LC0803304020160716	16/07/16
7	LC80330402016294LGN00	LC0803304020161020	20/10/16
8	LC80330402017056LGN00	LC0803304020170225	25/02/17

Las imágenes de satélite Landsat 8 se procesaron mediante la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), a fin de cuantificar la superficie que fue sembrada en las zonas de cultivo delimitadas a través del modelo de sistema de información geográfica. Se realizó la corrección atmosférica de las imágenes de satélite y la orto-rectificación de las imágenes de satélite, utilizando como referencia

ortofotos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

La integración de la información de las unidades de riego en el modelo de SIG permitió detectar que durante la época de primavera verano existe una gran superficie que es susceptible de sembrar y que es adicional a la contenida en el SIG. Utilizando la imagen falso color y de una imagen Spot 5 con resolución de 2.5 m se digitalizaron todas las parcelas que se ubican dentro de la poligonal del acuífero Cuauhtémoc. Esto permitió conocer el dato de superficie física total susceptible de cultivo.

El cálculo del NDVI se realizó a partir de los valores de reflectancia en las bandas roja e infrarroja cercana, empleando un filtro de 0 para valores de NDVI menores a 0.25. Posteriormente, se cuantificó la cantidad de píxeles en cada uno de los polígonos correspondientes a parcelas mediante el *software ERDAS* y la asignación de la suma de píxeles de NDVI a la base de datos de parcelas.

La estimación de área sembrada se realizó a partir de la multiplicación del número de píxeles de cada parcela por el área del píxel (0.09 ha); posteriormente se hizo un filtro para evitar que el área sembrada fuera mayor que el área física. Una vez hecho esto se calculó el porcentaje entre ambas áreas y se filtran valores menores al 30% de área sembrada, a los cuales se les asigna un valor de cero. Por último, se realizó la suma del área de cada parcela para obtener el área sembrada total.

Para el análisis de la agricultura en los ciclos 2012, 2013 y 2014, las imágenes correspondientes al periodo primavera verano (junio-agosto), contaban con gran cobertura con nube, por lo cual se omitieron en la cuantificación de superficie.

Para 2015 y 2016, durante el periodo primavera verano (junio-agosto) se localizaron imágenes de satélite Landsat 8 con baja nubosidad que permitió cuantificar la superficie sembrada. Para estos ciclos se observó una superficie sembrada con mayor cobertura a la utilizada por las unidades de riego ubicadas en 2012 con trabajo de campo. Por esta razón se requirió generar una capa de información adicional en el modelo de sistema de información geográfica que incluyera las zonas cultivadas en el periodo verano, aun cuando en gran parte de esta superficie el tipo de cultivo desarrollado sea de temporal, y no se pueda cuantificar o diferenciar la superficie regada. Esta capa de información

servió de referencia para cuantificar posteriormente la superficie cultivada a través de técnicas de percepción remota con imágenes de satélite y el cálculo del NDVI. Para los años 2015 y 2016 se determinó que existe una superficie adicional fuera de la perimetral de las unidades de riego consideradas, sin embargo, no se conoce con exactitud el tipo de cultivo y los volúmenes de agua utilizados. En este caso se estimó la cobertura vegetal que existe dentro de predios localizados y visibles en el área agrícola del acuífero. Lo anterior se muestra en la Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11, y los resultados en la Tabla 10.

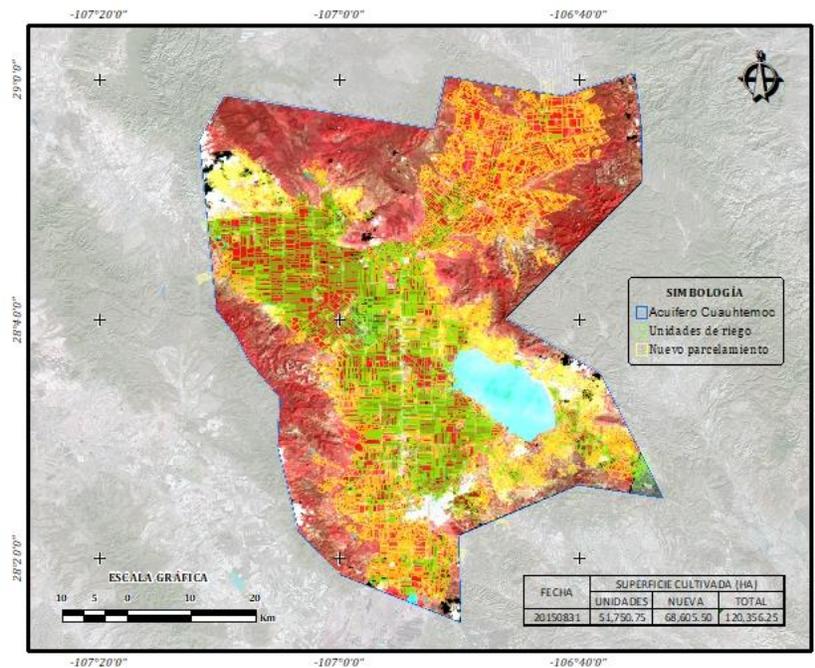


Figura 4. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (31/08/2015): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

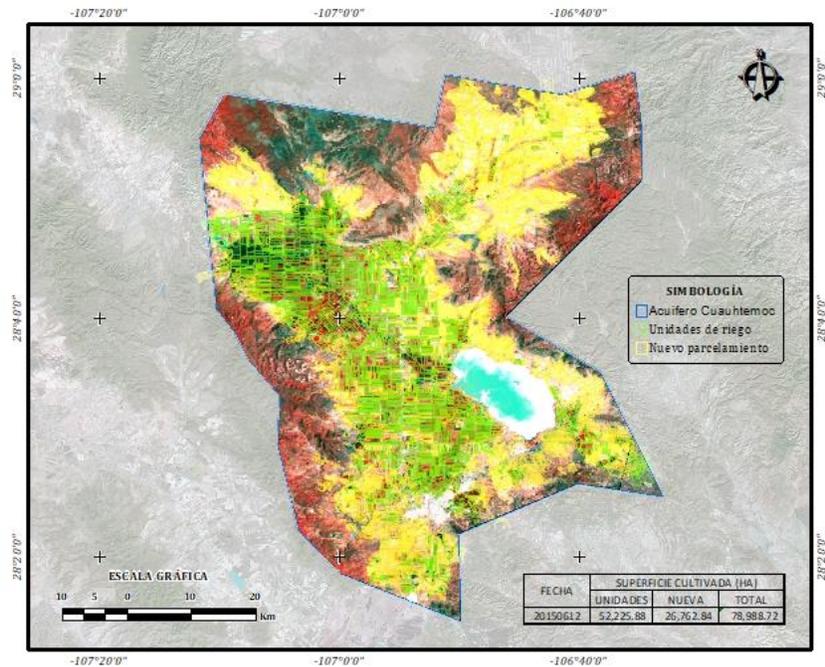


Figura 5. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (12/06/2015): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

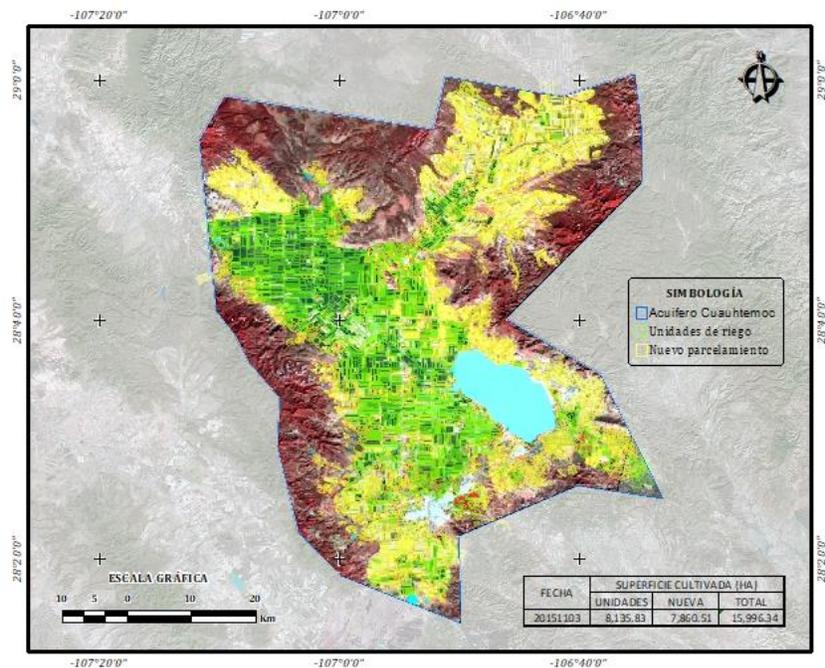


Figura 6. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (03/11/2015): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

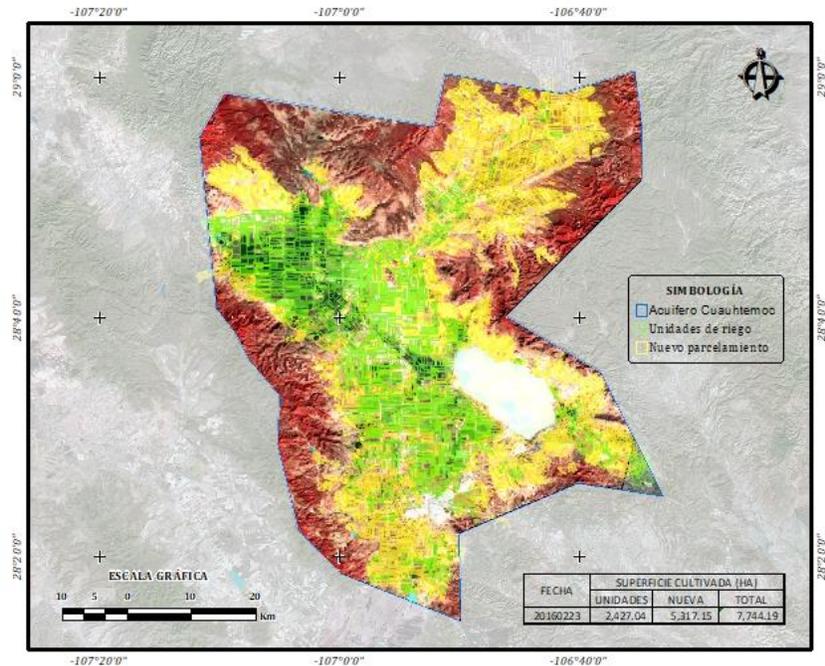


Figura 7. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (23/02/2016): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

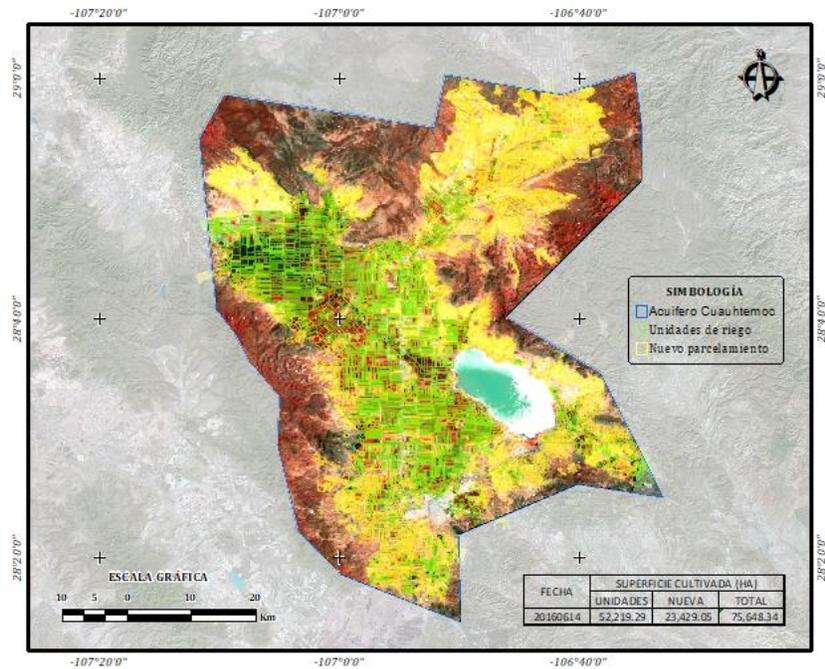


Figura 8. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (14/06/2016): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

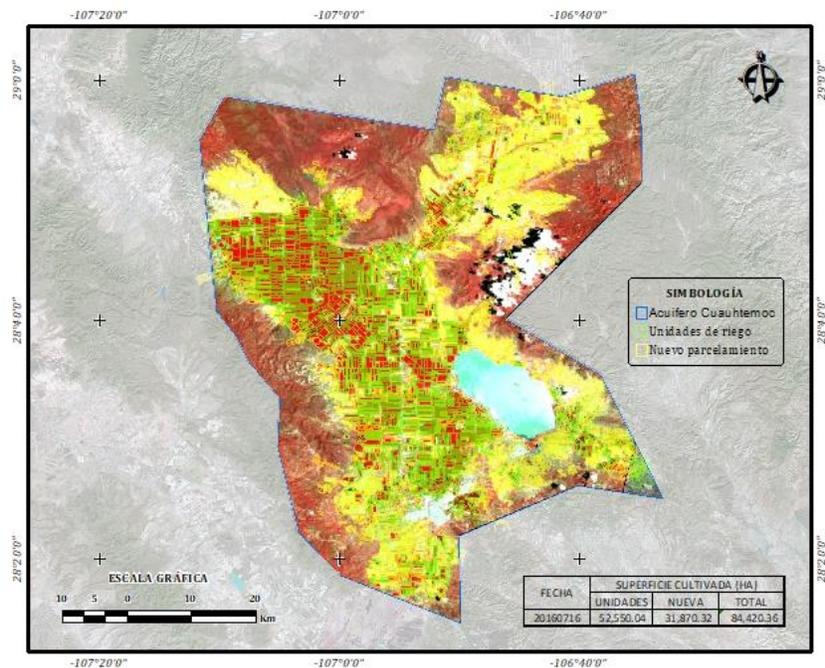


Figura 9. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (16/07/2016): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

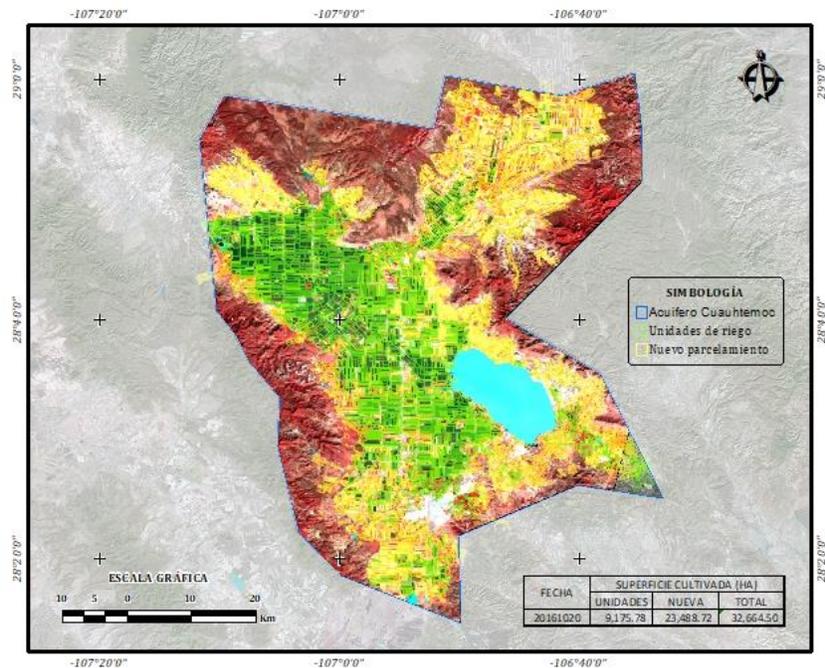


Figura 10. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (20/10/2016): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

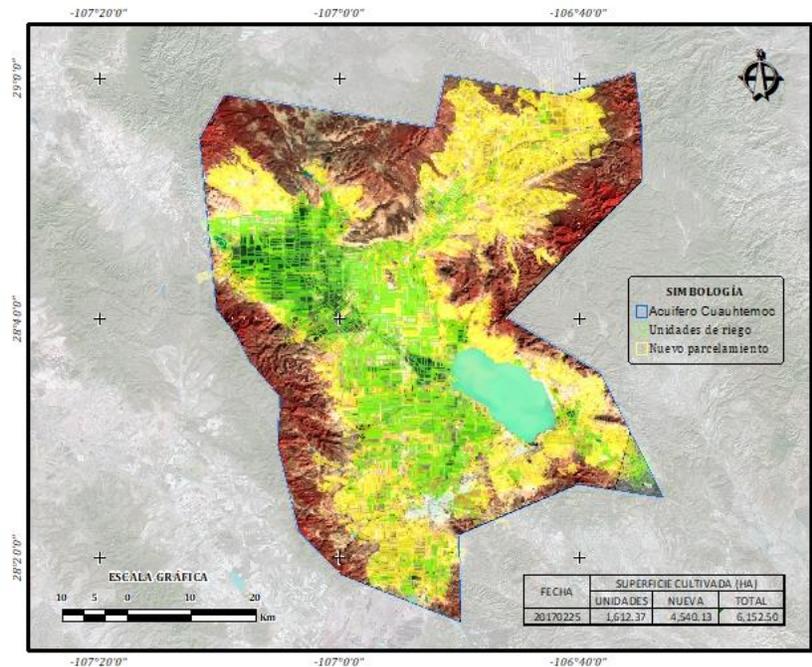


Figura 11. Imagen compuesta NDVI Landsat 8 (25/02/2017): parcelamiento en zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados generados se presentan la Tabla 10 y la Figura 12.

Tabla 10. Estimación de superficie con cultivo en el acuífero Cuauhtémoc, para diferentes fechas en 2015 y 2016. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Superficie cultivada				Total (ha)
	Unidades de riego		Fuera de la zona de riego		
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	
2015/06/12	52 225.88	66.12	26 762.84	33.88	78 988.72
2015/08/31	51 750.75	43.00	68 605.50	57.00	120 356.25
2015/11/03	8 135.83	50.86	7 860.51	49.14	15 996.34
2016/02/23	5 317.15	68.66	2 427.04	31.34	7 744.19
2016/06/14	52 219.29	69.03	23 429.05	30.97	75 648.34

2016/07/16	52 550.04	62.25	31 870.32	37.75	84 420.36
2016/10/20	9 175.78	28.09	23 488.72	71.91	32 664.50
2017/02/25	4 540.13	73.79	1 612.37	26.21	6 152.50

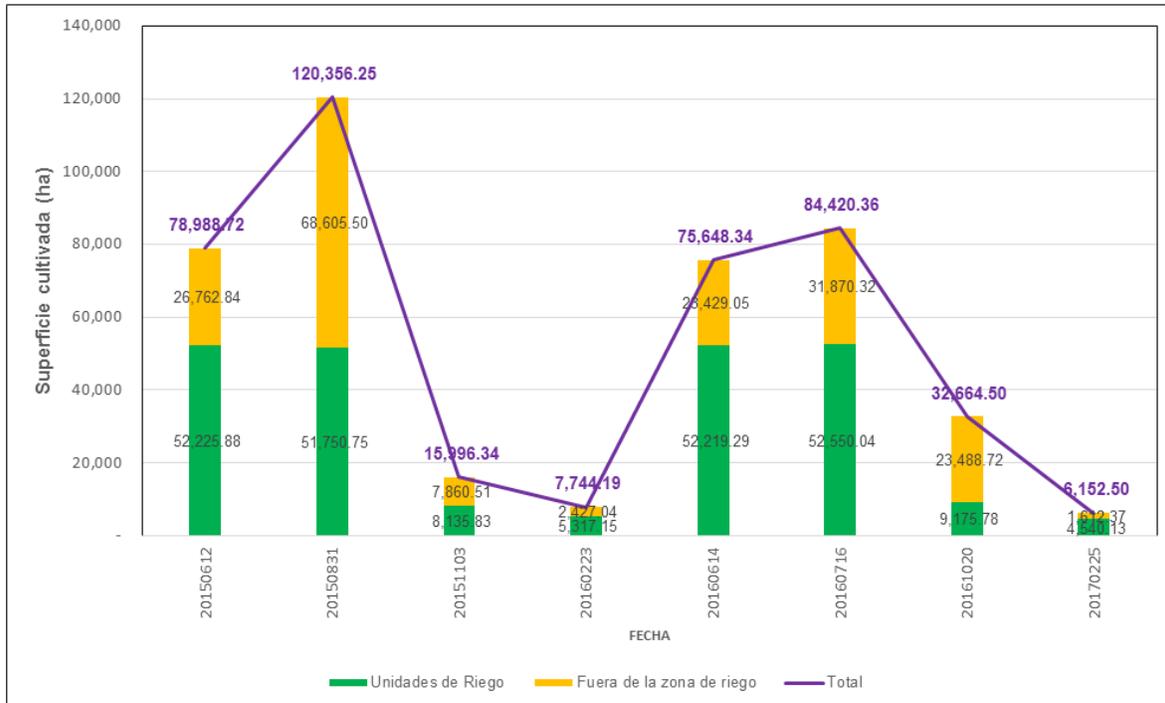


Figura 12. Superficie sembrada determinada a través del NDVI para diferentes fechas en la zona de riego (2012) y fuera de la zona de riego. Fuente: elaboración propia con resultados del estudio.

Debido a que la imagen con mayor visibilidad para la estimación de superficie se presenta para las imágenes del 31 de agosto de 2015 y del 16 de julio de 2016, los resultados correspondientes a dicha fecha se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Superficie sembrada y patrón de cultivos en 2015 y 2016. Fuente: elaboración propia con datos estimados de imagen de satélite Landsat 8.

Cultivo	Superficie cultivada (ha)	
	2015 ⁽¹⁾	2016 ⁽²⁾

Maíz	44 897.11	45 653.13
Manzana	6 377.58	6 449.82
Frijol	202.41	176.16
Avena	165.75	157.25
Asociación de cultivos*	40.66	43.27
Otros cultivos**	67.24	70.41
Total	51 750.75	52 550.04
Superficie detectada fuera de las UR ***	68 605.50	31 870.32
Superficie total cultivada	120 356.25	84 420.36

(1) Superficie estimada con imagen de satélite Landsat 8 del 31 de agosto de 2015.

(2) Superficie estimada con imagen de satélite Landsat 8 del 16 de julio de 2016.

* Dos cultivos sembrados de manera conjunta.

** Otro cultivo: cerezo, durazno, hortalizas, jitomate, sorgo, tomate, uva.

*** Superficie sembrada fuera de las poligonales de parcela del modelo de SIG del acuífero.

Es posible determinar que en el acuífero se siembran más de 120 000 hectáreas para el ciclo primavera-verano. El 43% de la superficie sembrada en el acuífero se cultiva dentro de zonas de unidades de riego previamente definidas. Mientras que 57% de la superficie sembrada se cultiva en zonas donde resulta difícil cuantificar el efecto riego-temporal, ya que probablemente se parte de que esta superficie presente riego de auxilio, considerando la época en la cual es sembrada y dado que los cultivos de la región y las condiciones climáticas el riego resulta imperativo para la instalación de cultivos en mayo-junio.

Por otra parte, las estadísticas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) para el municipio de Cuauhtémoc se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Estadísticas agrícolas del municipio Cuauhtémoc, ciclo 2015.

Fuente: elaboración propia con datos de Sagarpa (2017),

http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp

Cultivo	Superficie (ha)		Producción (ton)	Valor de la producción (miles de pesos)
	Sembrada	Cosechada		
Modalidad: riego				
Avena forrajera	332.00	332.00	11 365.00	4 724.06
Avena grano	50.00	50.00	225.00	787.50
Avena grano semilla	45.00	45.00	171.00	837.90
Cereza	12.00	12.00	48.00	4 560.00
Durazno	13.00	9.50	152.00	1 216.00
Elote	118.21	118.21	2 646.92	17 352.88
Fresa	1.75	1.75	52.75	1 751.38
Frijol	100.25	100.25	150.00	1 252.50
Manzana	8 311.71	7 948.71	190 892.00	1 086 689.40
Maíz grano	37 740.00	36 651.00	378 735.90	1 108 342.64
Pastos	25.00	25.00	630.00	201.60
Tomate rojo (jitomate)	9.75	9.75	3 855.00	64 144.44
Trigo grano	339.00	339.00	1 974.00	6 281.40
Viveros de manzana	4.00	4.00	180 000.00	6 480.00
Subtotal, riego	47 101.67	45 646.17	770 897.57	2 304 621.70
	41.51%	41.59%	50.81%	86.54%
Modalidad: temporal				
Avena forrajera en verde	41 300.00	41 294.00	683 195.00	219 873.50
Frijol	16 827.00	14 592.00	12 204.17	105 137.83
Maíz forrajero en verde	3 000.00	3 000.00	33 000.00	17 487.03
Maíz grano	4 200.00	4 180.00	3 822.00	11 092.50
Sorgo forrajero en verde	1 051.00	1 051.00	14 240.00	4 969.14
Subtotal, temporal	66 378.00	64 117.00	746 461.17	358 560.00
	58.49%	58.41%	49.19%	13.46%
Total	113 479.67	109 763.17	1 517 358.74	2 663 181.70

El comparativo de las superficies reportadas por Sagarpa en 2015 y la estimación de superficie por medio de imágenes de satélite de ese mismo año se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Comparativo de estadísticas agrícolas de Sagarpa y resultados de la cuantificación de superficie sembrada con imágenes de satélite, en el año 2015. Fuente: elaboración propia con datos de Sagarpa y resultados de la cuantificación de superficie utilizando imágenes de satélite Landsat 8 del 31 de agosto de 2015.

Concepto		Superficie sembrada					
		Datos reportados por Sagarpa, año 2015			Cuantificación con imágenes de satélite del 31 de agosto de 2015		
		Riego	Temporal	Total	Unidades de riego	Fuera de la zona de riego	Total
Superficie	(ha)	47 101.67	66 378.00	113 479.67	51 750.75	68 605.50	120 356.25
	(%)	41.5%	58.5%	100.0%	43.0%	57.0%	100.0%

De acuerdo con los resultados de la Tabla 13, hay una diferencia de 6 900 ha en la superficie sembrada en la zona del acuífero Cuauhtémoc, y la mayor parte de esta superficie corresponde a la zona de riego, ya que la diferencia entre las estadísticas de Sagarpa y la cuantificación realizada es un poco mayor a las 4 600 ha, que representa 9% de superficie de riego que falta por considerar en las estadísticas de Sagarpa. En lo global, en las estadísticas de Sagarpa falta por considerar un 5.7% adicional de superficie sembrada.

Es pertinente señalar que la superficie cuantificada como regada, a través del uso de imágenes de satélite, es de 2012, en estricta relación con la superficie considerada como riego a partir de las capas de información del modelo de sistema de información geográfica del acuífero Cuauhtémoc. Sin embargo, puede existir superficie sembrada fuera de dichos polígonos, que sería susceptible de estarse sembrando con riego.

Conclusiones

El uso de tecnologías de la información, tanto sistemas de información geográfica como técnicas de percepción remota, actualmente son una herramienta fundamental en la integración y análisis de la información para la realización de diversos estudios. Sin embargo, es fundamental que dicha plataforma cuente con datos de campo debidamente validados.

En el acuífero Cuauhtémoc, el trabajo de campo desarrollado para identificar los aprovechamientos de agua permitió integrar información de usuarios, tipo de uso y, en el caso de usuarios de tipo agrícola, superficie, producción y valor de producción; esto permitió conocer el estado actual de la producción agrícola y el uso de agua en el acuífero.

La cuantificación de superficies cosechadas dentro de la zona del acuífero Cuauhtémoc mostró que la superficie reportada por las estadísticas de Sagarpa para el acuífero Cuauhtémoc son menores en al menos 10% en la zona de riego respecto de la superficie sembrada y cuantificada a través del uso de imágenes de satélite. En cuanto a la superficie total sembrada en el acuífero que incluye riego y temporal, se encontró que la superficie es un 6% menor que la cuantificada con percepción remota.

La superficie dominada por las unidades de riego dentro del acuífero Cuauhtémoc (del modelo de SIG de 2012) es menor a la superficie cuantificada a través de imágenes de satélite Landsat 8 para los años 2015 y 2016. Sin embargo, la superficie total no es cuantificable en su totalidad por la falta de información total de las zonas potenciales de riego.

La elaboración de la propuesta de manejo para el acuífero Cuauhtémoc debe considerar el estado actual del mismo, pues se ubica en una zona de veda para el alumbramiento de aguas subterráneas. De acuerdo con la actualización de disponibilidad de aguas subterráneas (2009) señala que no hay disponibilidad para el otorgamiento de nuevas concesiones.

La extracción de agua del subsuelo en el acuífero Cuauhtémoc ha tenido un incremento considerable para el periodo 1973-2000. Se determinó que la extracción pasa de 97.9 a 381.3 hm³/año y actualmente hasta

352.7 hm³/año; así, los niveles del agua subterránea han pasado de profundidades medias de unos 20 m en 1973 a 90 metros hoy día, y en un futuro aumentará.

Referencias

- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(2), 49-65.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (1991). *Actualización del estudio geohidrológico, analizar las políticas de operación y elaborar el proyecto de manejo del acuífero del valle de Cuauhtémoc, Chih.* México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2000). *Cuantificación de la extracción de agua subterránea en el Acuífero Cuauhtémoc, Chih.* México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cuauhtémoc, estado de Chihuahua.* México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). *Determinación de eficiencias electromecánicas para implementar medición indirecta en el acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua.* México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2009). *Diario Oficial de la Federación*, 28 de agosto, México.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2001). *Diario Oficial de la Federación*, 5 de diciembre, México.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2016). Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, 24 de marzo, México.
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., & Walthall, C. L. (2008). Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, 100(3), 117-131.
- Pineda-Pastrana, O. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago* (tesis de maestría). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A. C., México, DF, México.

- Ponvert, D., & Lau, A. (2013). Uso de las imágenes de satélites y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(octubre-diciembre). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93231386013>
- Sagarpa, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Anuario Estadístico de Producción Agrícola, 2015*. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1982). *Estudio geohidrológico cuantitativo de la zona Laguna de Mexicanos, estado de Chihuahua*. México, DF, México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1973). *Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Cuauhtémoc, Chih.* México, DF, México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Zhang, P., Anderson, B., Huang, D., & Myneni, R. (2005). Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. *Agricultural and Forest Meteorology* 132(4), 344-358.