

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/313749864>

BALANCE HÍDRICO EN ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS BASADO EN PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL

Conference Paper · February 2017

CITATIONS

2

READS

980

4 authors, including:



Saul Arciniega-Esparza

Universidad Nacional Autónoma de México

34 PUBLICATIONS 87 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Antonio Hernández-Espriú

Universidad Nacional Autónoma de México

57 PUBLICATIONS 277 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Adrián Pedrozo-Acuña

Mexican Institute of Water Technology (IMTA)

214 PUBLICATIONS 1,316 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Monitor de Sequía Multivariado de México [Multivariate Drought Monitor of Mexico] [View project](#)



About drought propagation in Mexico: the role of weather and physiographic features of territory [View project](#)

BALANCE HÍDRICO EN ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS BASADO EN PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL

¹Arciniega Esparza Saúl, ²Breña Naranjo Agustín, ³Hernández Espriú Antonio,
⁴Pedrozo Acuña Adrián

¹Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

^{1,2,4}Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México. Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510. Teléfono +52 55 56233600, ext. 8626.

³Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, México

¹sarciniegae@iingen.unam.mx, ²jbrenan@iingen.unam.mx, ³ahespriu@unam.mx, ⁴apedrozoa@iingen.unam.mx

Introducción

La región norte de México se encuentra catalogada como una zona árida-semiárida con escasez física de agua, es decir, no existe el recurso hídrico suficiente para satisfacer las demandas de los ecosistemas junto con las humanas (IWMI, 2007). Esta condición se ha empeorado debido al constante crecimiento poblacional y el incremento de las actividades agrícolas e industriales, que han propiciado la disminución de la disponibilidad del agua en la región norte de México (Spring, 2011).

En la última década, la extracción adicional de agua en ríos y acuíferos para la producción de recursos no convencionales de gas y aceite, contenidos en estratos profundos de lutitas mediante fracturamiento hidráulico (FH), han generado desconcierto en cuanto al futuro de la seguridad hídrica, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Scanlon et al., 2014b; Vengosh et al., 2014).

Tan solo en E.U.A. se han perforado más de 263 859 pozos para la extracción de gas y aceite mediante FH durante el periodo 2011-2014 (Gallegos et al., 2015), de los cuales, cerca de la mitad se localizan en regiones con alto estrés hídrico, con ocurrencia de sequías y con sobreexplotación de los acuíferos (CERES, 2014). A pesar de que el FH se asocia con un alto consumo de agua, algunos autores aseguran que los volúmenes utilizados por otras actividades energéticas generan un mayor consumo de agua por energía producida (Scanlon et al., 2014a; Yang et al., 2014) pero debido a la rápida expansión y producción de gas y aceite de lutitas, el consumo acumulado de agua se ha incrementado durante los últimos años (Gallegos et al., 2015; Nicot and Scanlon, 2012; Scanlon et al., 2014b; Soeder and Kappel, 2009).

Vengosh et al. (2014) sugiere que el principal riesgo en las fuentes hídricas con respecto a la extracción de agua para FH (además de todos los efectos ambientales asociados) consiste en inducir una sobreexplotación que puede llegar a generar competencia y conflictos entre los distintos usuarios del recurso, especialmente en regiones con poca disponibilidad y alto estrés hídrico.

México se encuentra en el 6to lugar dentro de los 10 países con mayor disponibilidad de recursos técnicamente recuperables de gas y aceite de lutitas, y se encuentra dentro de los 3 con mayor estrés hídrico (EIA, 2013), con un volumen de gas no convencional que puede variar de los 7 431 a los 44 630 mil millones de pies cúbicos, distribuidos en 5 cuencas sedimentarias, de las cuales el 66 % se localiza en la

cuenca Burgos, 25 % en la cuenca Sabinas y el 9 % en la cuenca Tampico-Misantla (USGS, 2014).

A partir de los cambios en la Reforma Energética (DOF, 2013), la Secretaría de Energía (SENER) a través de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) promulgó las áreas de exploración y explotación de recursos no convencionales para PEMEX en las rondas cero y uno, cuyos objetivos principales son el play (formación geológica que almacena hidrocarburos y que es económicamente factible de explotar) del Eagle Ford en territorio Mexicano, el cual es continuación del play del mismo nombre que se extiende en la región sur de Texas y que es reconocido como uno de los más grandes productores de gas y aceite de lutitas a nivel mundial (Scanlon et al., 2014b).

En este sentido, el actual estrés hídrico que experimenta la región noreste del país podría ser mayor en los próximos años si no se llevan a cabo estrategias de gestión. En particular, los almacenamientos subterráneos se podrían ver comprometidos ya que estos suelen ser la principal fuente de agua en zonas áridas y semiáridas, como es el caso en el play Eagle Ford en Texas (Nicot y Scanlon, 2012).

El objetivo de este estudio es evaluar la disponibilidad hídrica de la región noreste de México perteneciente al play Eagle Ford de la cuenca sedimentaria Sabinas y Burgos mediante un balance hídrico utilizando datos de percepción remota y derivados de modelos globales, esto debido a la falta de información in situ. En la última década se han tenido avances significativos en percepción remota (PR) con lo cual se ha llegado a estimar las principales componentes del balance hídrico a gran escala, por lo que el uso de PR se ha convertido en una herramienta fundamental para el manejo del recurso hídrico en todo el mundo (Anderson et al., 2012; Armanios y Fisher, 2014).

La metodología planteada a continuación permitirá identificar zonas con poca o nula disponibilidad hídrica, con lo cual se pueden establecer estrategias de gestión para el manejo del recurso hídrico ante escenarios de explotación de gas y aceite de lutitas.

Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio fue delimitada a partir de la ubicación de los polígonos asignados por la CNH para la explotación de recursos no convencionales en las rondas cero y uno (Figura 1.a) y abarca parte de la cuenca sedimentaria Burgos (que se extiende en el noroeste a lo largo del Río Bravo) y que

comprende a los plays Eagle Ford del Medio Superior Cretácico y del Superior Cretácico. La zona abarca parte del estado de Coahuila y de la cuenca sedimentaria Sabinas, la cual se ha identificado como una zona menos propensa a la explotación de gas y aceite de lutitas debido a una estructura geológica más compleja (Stevens y Moodhe, 2015).

La zona presenta una climatología altamente variable tanto espacial como temporalmente, con una precipitación media anual que va de los 150 mm, en el centro y norte de Coahuila, hasta los 1100 mm/año al sureste de Nuevo León. La temperatura media anual varía entre los 19 y los 24 °C, con temperaturas menores en las zonas altas (entre los 13 y 16 °C). El índice de aridez (IA=evaporación potencial/precipitación) de la región oscila entre 3 y 5 (definido como zona árida según la clasificación de la UNESCO (1979)), y de 1.5 a 2 al sureste de Nuevo León (definida como zona seca-subhúmeda).

Las cuencas de interés (Figura 1.b) fueron obtenidas a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) V3 con resolución de 90 m proporcionado por INEGI, y se utilizaron herramientas hidrológicas de QGIS y SAGA GIS para determinar los parteaguas de las cuencas. Las cuencas delimitadas pertenecen a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) VI Río Bravo la cual tiene carácter internacional y su administración se contempla en el Tratado Internacional de Aguas de 1944 (TIA) (SEMARNAT, 2012).

Dentro de las corrientes superficiales de importancia dentro de la zona de estudio se encuentra el Río Salado, que es regulado por la presa Venustiano Carranza en la bifurcación con el Río Sabinas (Figura 1.b); el Río Pesquería, que es regulado por la presa Marte R. Gómez. Ambas corrientes son de suma importancia para el régimen hidrológico del Río Bravo, en particular el Río Salado aporta importantes volúmenes de escurrimiento a la Presa Internacional Falcón.

La superficie de la zona de estudio se compone en su mayoría

de 5 tipos de uso de suelo (Figura 1.c). El más representativo es el matorral que abarca cerca del 64 % de la superficie de las cuencas y abunda hacia el suroeste de la región. Los pastizales representan cerca del 13.4 % de la totalidad del área y se localizan principalmente en las inmediaciones del Río Bravo. El 7.5 % tiene propósitos agrícolas en las que destacan las zonas de cultivo cercanas a Monterrey, Saltillo, en el acuífero Allende-Piedras Negras (APN) y los distritos de riego Don Martín, Acuña Falcó, Las Lajas y Bajo Río San Juan.

A pesar de que las corrientes de las cuencas que conforman la zona de estudio se catalogan como corrientes intermitentes y en algunos casos efímeras, existe aportación importante de flujo base principalmente de cuencas aledañas al Río Bravo, como es el caso de las cuencas del acuífero APN, que puede llegar a aportar hasta 140 hm³/año al régimen del Río Bravo (González, 2013).

La zona de estudio pertenece a dos provincias fisiográficas. La más importante es la Llanuras de Coahuila y Nuevo León la cual se compone principalmente de depósitos aluviales de alta permeabilidad, de la era del Pleistoceno, de areniscas y conglomerados de permeabilidad variable de la era del Terciario Marino, así como de arcillas del Cretácico Superior (Figura 1.d). La segunda provincia es la Sierra y Llanuras Coahuilenses, que predomina en el área del Eagle Ford, en la cuenca sedimentaria Sabinas, y se compone principalmente de rocas sedimentarias calcáreas marinas de alta permeabilidad de la era del Cretácico medio y de depósitos aluviales de permeabilidad media a alta de la era del Pleistoceno.

La hidrogeología de la zona de estudio es compleja hacia el acuífero Bajo Río Bravo, que actúa como confinado y semiconfinado en ciertas regiones, sin embargo, en general los acuíferos se comportan como libres con flujo en la dirección SW-NE, siguiendo las formaciones de depósitos aluviales.

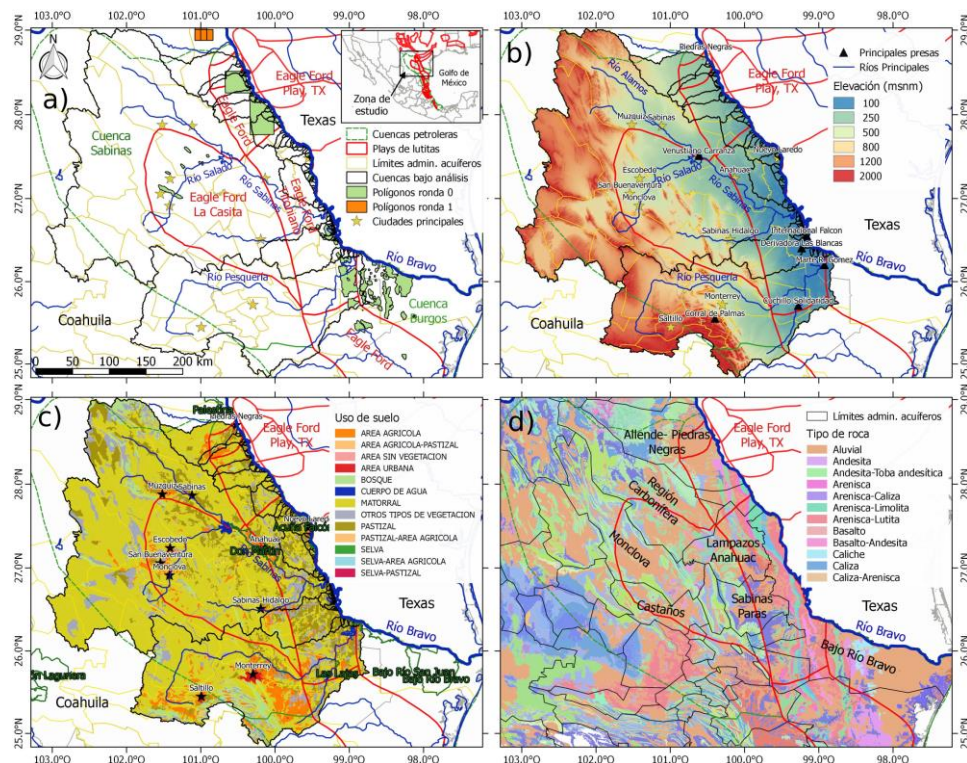


Figura 1. Zona de estudio a) ubicación de los polígonos de licitación para explotación de gas y aceite de lutitas, b) elevación del terreno, c) uso de suelo y d) tipos de roca y acuíferos.

Balance hídrico

El balance de agua se define como el cambio en la cantidad de agua para un volumen específico en el tiempo (Dingman, 2002). A escala de un volumen de control (Figura 2), los cambios en el almacenamiento total se pueden escribir en función de los cambios en el almacenamiento superficial, subsuperficial y subterráneo (Anderson et al., 2012) dados por la ecuación:

$$\Delta TWS = \Delta SW + \Delta SM + \Delta GW \quad (1)$$

en donde ΔTWS es el cambio de almacenamiento total; ΔSW es el cambio en el almacenamiento superficial, ΔSM es el cambio en la humedad del suelo y ΔGW es el cambio en el almacenamiento subterráneo. Todas estas variables se expresan frecuentemente en mm por año o por mes, dependiendo de la escala temporal del análisis. Así mismo, es común encontrar que la ecuación del balance (ec (1)) se expresa con respecto a las anomalías.

En función de las componentes hidrológicas superficiales, subsuperficiales y subterráneas, se asume que los cambios en los tres almacenamientos están dados por:

$$\Delta SW = P + Qd_i + Q_{GW} + V_{IR} + V_i - AET - Qd_o - f - f_{IR} - R_A - V_o \quad (2)$$

$$\Delta SM = f + f_{IR} - DP \quad (3)$$

$$\Delta GW = DP + R_A + Qb_i - Q_{GW} - Qb_o \quad (4)$$

en donde; P es la precipitación; AET es la evapotranspiración que involucra la transpiración de plantas, evaporación del suelo y cuerpos de agua; Qd_i es el escurrimiento superficial de entrada al volumen de control, Qd_o es el escurrimiento superficial de salida, V_{IR} es el volumen para riego, f es la infiltración, f_{IR} es la infiltración del agua utilizada para riego, R_A es la recarga artificial inducida al acuífero (se considera cero en la ecuación (2) si proviene de otro volumen de control), V_i son entradas generales al volumen de control (conducción de agua por canales, manantiales, etc.), V_o son salidas generales del volumen de control (conducción de agua, retención para uso humano, etc.), DP es la percolación a estratos profundos, Q_{GW} es el bombeo de agua subterránea, Qb_i y Qb_o son los flujos subterráneos que si se intersectan con el lecho de un río se pueden convertir en flujo superficial.

A escala de una cuenca con fronteras cerradas (sin interacción de agua subterránea con otros acuíferos), el cambio en TWS se reduce a la ecuación siguiente:

$$\Delta TWS = P - (AET + Q) \quad (5)$$

A pesar de la facilidad para computar el balance hídrico, algunas de las componentes que intervienen son complicadas de medir (AET , f y DP), así mismo, la estimación del balance hídrico se complica cuando la red de observación es escasa o nula, como ocurre frecuentemente en regiones áridas. Por otro lado, el uso de información de sensores remotos y modelos globales ha tenido aceptación y aplicación para aproximar las componentes del balance hídrico (Anderson et al., 2012;

Armanios y Fisher, 2014; Deus et al., 2011; Gokmen et al., 2013).

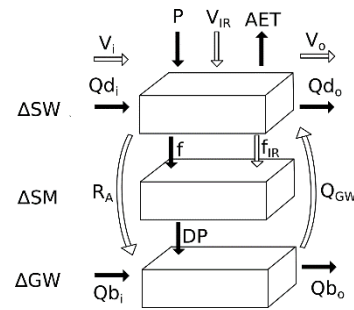


Figura 2. Elementos que intervienen en el balance hídrico a escala de un volumen de control. Las flechas negras indican procesos naturales y las blancas forzamientos humanos.

Datos derivados de percepción remota y modelos globales

Actualmente existen distintos productos de datos derivados de satélites y modelos globales que se encuentran de acceso libre al público. Para propósitos de este artículo se consideraron las bases de datos que se muestran en la Tabla 1.

Precipitación

La precipitación mensual se obtuvo del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Global Land Data Assimilation System (GLDAS) y North American Lada Data Assimilation System (NLDAS) para el periodo 1980 al 2015 (según el periodo disponible de cada base de datos). Las estaciones climatológicas en la zona de estudio han sido consideradas en la base de datos de la NOAA, ya que esta se obtuvo a partir de la interpolación de los datos de las estaciones de CLICOM.

Evapotranspiración actual

La evapotranspiración actual (AET) es una de las variables más complejas de medir y frecuentemente se deriva de la ecuación publicada en FAO-56 (Allen et al., 1998), la cual requiere de datos del crecimiento de los cultivos (asociados al factor de cultivo Kc), parámetros climatológicos y prácticas de manejo, por lo que AET es altamente variable y difícil de estimar (Payán et al., 2011).

Para este trabajo, la evapotranspiración mensual se obtuvo del producto GLDAS, NLDAS y de los resultados del modelo de infiltración variable (VIC) obtenidos por Livneh et al. (2015).

Escurrimiento y humedad del suelo

Los datos mensuales del escurrimiento superficial Qd , gasto base Qb y el contenido de humedad del suelo se obtuvieron de los productos GLDAS, NLDAS y de los resultados del modelo VIC para el mismo periodo que la precipitación. El contenido de humedad del suelo para los tres productos mencionados contempla una capa con un espesor de 2 m de profundidad a partir de la superficie terrestre.

Tabla 1. Bases de datos derivados de sensores remotos y modelos globales

Base de datos	Descripción	Escala	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo	Referencia
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) producto 3B42	Global	1/4 grado	Diario Mensual	1998-2016	Huffman et al. (2010)
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) producto RL05	Global	1 grado	Mensual	2003-2016	Seo et al. (2006)
NOAA	Climatológica derivada a partir de la interpolación de registros de estaciones climatológicas	EUA y México	1/16 grado	Diaria	1950-2013	Livneh et al. (2013)
VIC	Productos del modelo hidrológico VIC que incluye 12 variables hidrológicas.	EUA y México	1/16 grado	Diaria	1950-2013	Livneh et al. (2015)
GLDAS	Global Land Data Assimilation System (GLDAS) versión 2	Global	1/4 grado	Mensual	1948-2009	Hualan y Hiroko (2013)
NLDAS	North American Land Data Assimilation System (NLDAS) versión 2	EUA y parte de México	1/8 de grado	Mensual	1979-2016	Robles-Morua et al. (2012)
MODIS VI	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Vegetation Index (VI)	Global	1 km, 500 m, 250 m	16 días	2001-2016	Bastiaanssen y Ali (2003)

Cambios en el almacenamiento subterráneo

Basado en percepción remota, los cambios en el almacenamiento subterráneo se pueden estimar mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta GW = \Delta TWS - (\Delta SW + \Delta SM) \quad (6)$$

en donde ΔTWS se obtiene de las anomalías mensuales del almacenamiento total de agua ($TWSa$) de GRACE, que se estiman al restar la anomalía de un mes con respecto al mes anterior ($\Delta TWS(t) = TWSa(t) - TWSa(t-1)$).

En zonas áridas y semiáridas la aportación de ΔSW tiende a ser despreciable con respecto a ΔSM , por lo que se simplifica la ecuación (6).

Cobertura vegetal y uso de suelo

A través de índices de vegetación (IV) derivados de imágenes satelitales es posible obtener información acerca del uso de suelo y del desarrollo de los cultivos. El más utilizado es el índice de vegetación normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), el cual tiene alta correlación con el factor de cultivo K_c (Bastiaanssen y Ali, 2003; Castañeda-Ibáñez et al., 2015), el cual es un indicador de las prácticas de cultivo y relaciona la evapotranspiración de los cultivos (ET) con la evapotranspiración de referencia (ET_0).

El NDVI provee de información consistente, espacial y temporal acerca de las condiciones de la vegetación que pueden ser usados para el monitoreo de la fotosíntesis terrestre (Huete y Justice, 1999) y está dado por la ecuación (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (7)$$

en donde NIR es la reflectancia de la banda del infrarrojo cercano y R es la reflectancia del rojo. Para este estudio, las

imágenes mensuales del NDVI se obtuvieron de las imágenes satelitales MODIS VI para el periodo 2001-2015.

Alcances y limitaciones en la aplicación de datos derivados de PR y modelos globales

Las principales ventajas de utilizar PR son: (a) su bajo costo con respecto de tener una red de monitoreo de alta resolución espacial (Meijerink et al., 2007), (b) los datos suelen ser actualizados con mayor periodicidad que algunas bases de datos in situ, (c) proveen información a una resolución espacio-temporal constantes (por lo regular no existen huecos en información), y (d) la mayoría son de libre acceso.

Las restricciones que acompañan el uso de PR en el manejo de recursos hídricos son la variación de la escala espacial, ya que algunas bases de datos a gran escala son aplicadas indiscriminadamente para explicar fenómenos a menor escala (Landerer y Swenson, 2012). Otro inconveniente, es que la mayoría de la información satelital es reciente y no se cuenta con registros históricos lo suficientemente extensos para realizar algunos análisis estadísticos. Finalmente, algunas bases de datos (principalmente aquellas provenientes de modelos numéricos) presentan mayor incertidumbre que las observaciones in situ ya que han sido estimados de forma indirecta (Meijerink et al., 2007).

Consumos de agua

Los volúmenes concesionados de agua se obtuvieron del Registro Público de Derechos del Agua (REPD), del cual se determinó que en la zona de estudio existen cerca de 17 500 pozos de bombeo que constituyen un volumen concesionado de 1020 hm³/año, del cual, el 72 % se utiliza para riego, seguido por el uso industrial (15 %) y por el público-urbano (10 %).

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de los volúmenes concesionados acumulados en áreas de ¼ de grado (~690 km²). Como se puede apreciar, las celdas que comprenden a la zona metropolitana de Monterrey-Salttillo-Sabinas Hidalgo son las que presentan un consumo total más

elevado en la zona de estudio (en promedio 30 hm³/año). El área que abarca el acuífero APN y la zona urbana Monclova presentan también altos consumos de agua destinados principalmente para uso agrícola.

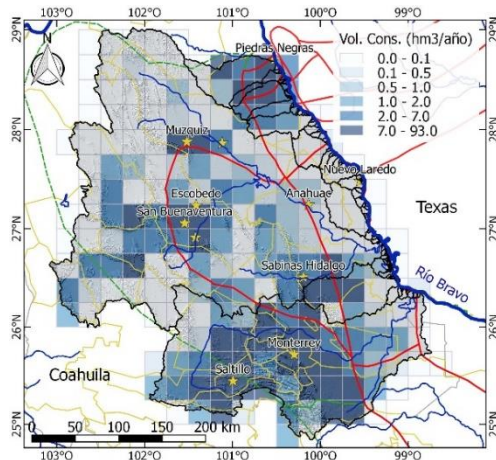


Figura 3. Distribución espacial de los volúmenes concesionados. Obtenidos del REPDA.

Debido a la falta de información temporal de las demandas de agua, se aplicó la metodología implementada por Carrera-Hernández et al. (2016) para generar una base de datos histórica de extracciones en la zona de estudio para el periodo 2001-2015 (periodo común con GRACE y las otras bases de datos). El método asume que la tasa de bombeo es proporcional al crecimiento poblacional por lo que fue necesaria la estimación del número de habitantes para los años comprendidos en el periodo de interés

Debido al tamaño del área de estudio fue necesaria su división en zonas más pequeñas para considerar cambios locales en la población y en sus consumos de agua. Se dividieron 11 zonas tomando en cuenta los centros urbanos de mayor importancia y la densidad de pozos. Finalmente, el volumen concesionado para cada pozo se aproximó usando la relación siguiente:

$$Ve(i, j, N) = \frac{P(j, N)}{P(j, 2010)} Vc(i, j) \quad (8)$$

en donde el índice N corresponde al año, j corresponde a la zona (11 en total), i al número del pozo en la zona j, Ve es el volumen anual de extracción, Vc es el volumen concesionado (que se asumió que corresponde al año 2010), P(j,N) es la población acumulada en la región j para el año N, y P(j,2010) es la población en la zona j para el año 2010. La ecuación (8) se aplicó a los pozos con uso de todo tipo, excepto agrícola y los volúmenes mensuales se supusieron constantes para cada año.

Para la estimación de los volúmenes mensuales de agua subterránea de uso agrícola se asumió que la producción de cultivos sigue un comportamiento similar a la serie de NDVI en cada región agrícola. Nuevas zonas fueron delimitadas de forma similar a las usadas para estimar los otros consumos, pero en este caso considerando zonas de cultivo. El volumen

mensual para cada pozo fue aproximado con la ecuación siguiente:

$$Ve(i, j, m, N) = \frac{NDVI(j, k, N)}{\sum_{k=1}^{12} NDVI(j, k, 2010)} Vc(i, j) \quad (9)$$

en este caso, m representa al mes de interés, $NDVI(j, k, N)$ es el índice de vegetación normalizado promedio de la región de cultivo j (11 en total) del mes m y año N; $\sum_{k=1}^{12} NDVI(j, k, 2010)$ es la suma anual del índice de vegetación de la zona j.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los consumos estimados para los censos de población elaborados por INEGI. Del año 1980 al 2010 se ha presentado un aumento del 80 % en el número de habitantes, pero del 2000 al 2010 sólo hubo un aumento del 20 %, por lo que las concesiones pueden no haber variado significativamente. Por otro lado, el uso de agua subterránea para riego se ha supuesto que depende principalmente del crecimiento de las plantas, aunque se desconocen los periodos en los que se utiliza agua superficial para su desarrollo.

Tabla 2. Crecimiento poblacional y volúmenes de extracción

Año	Población	Consumos (hm ³ /año)		
		Publico-Urbano	Industrial	Riego
1980	3,199,409			
1990	3,915,304			
1995	4,474,362			
2000	4,834,410	84.33	125.52	571.71
2005	5,297,464	91.31	133.63	664.03
2010	5,863,026	99.55	148.18	712.79

Resultados

Para corroborar los datos gravimétricos con los modelos se comparó el cambio del almacenamiento total (ΔTWS) derivado de GRACE y del balance hídrico a escala de toda la zona de estudio (Figura 4.a). El balance hídrico se estimó con la combinación de las variables (P, AET y Q) de los productos GLDAS, NLDAS, VIC y TRMM, de tal manera que se generó una banda de confianza de ΔTWS (banda negra, cuya línea corresponde a la media). Los resultados sugieren que existe correlación en las variaciones estacionales del TWS, sin embargo, la magnitud de los cambios derivados del balance hídrico tienden a ser mayores que los derivados de GRACE durante los periodos húmedos (Figura 4.c), con un ΔTWS promedio de 1.25 ± 21.75 y 1.42 ± 15.73 mm/mes, respectivamente. Los cambios en la humedad del suelo (ΔSM) presentan un comportamiento similar, de tal manera que ΔSM tiende a ser mayor que ΔTWS_{GRACE} en temporada de lluvia (Figura 4.b), en particular, el periodo excepcionalmente húmedo en la zona de estudio ocurrida en el 2010 está asociada con un incremento súbito de la humedad del suelo, que representó el doble de la magnitud de ΔTWS_{GRACE} (~100 mm contra ~50 mm). Como resultado de las variaciones en la magnitud entre SM y TWS, el cambio del almacenamiento subterráneo (ΔGW) se muestra negativo en algunos periodos de lluvia (Figura 4.b, línea azul), lo cual carece de sentido.

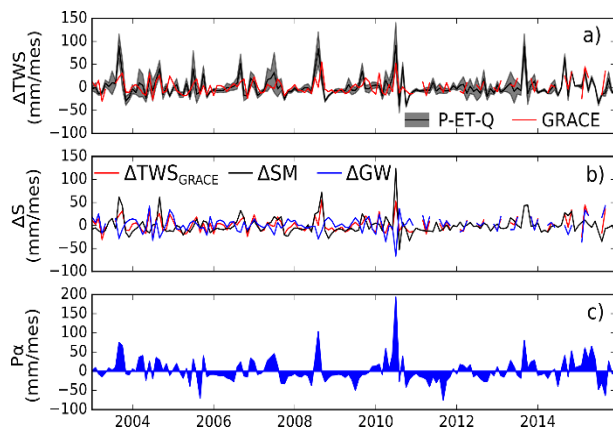


Figura 4. Cambios del almacenamiento en la totalidad de la zona de estudio (a y b) y anomalías mensuales de precipitación (c).

La zona de estudio fue dividida en 3 regiones (cuenca Río Sabinas, cuenca Río Pesquería y acuífero APN) con el fin de observar los cambios espacio-temporales del almacenamiento (Figura 5). El ΔTWS en la cuenca Sabinas varía de los -26 a los 42 mm/mes con una media de 1.06 ± 12.54 mm/mes, en la cuenca Pesquería se encuentra de los -35.37 a los 82.48 mm/mes con una media de 1.71 ± 22.15 mm/mes, mientras que en el acuífero APN se encuentra entre los -26.09 y 29.62 mm/mes con un valor medio de 0.88 ± 10.37 mm/mes. De las tres regiones, la cuenca Pesquería presenta los cambios de humedad más intensos, que pueden variar de los -65.3 a 141 mm/mes con una media de 0.45 ± 24.76 mm/mes, seguido de la cuenca Sabinas con un ΔSM promedio de 0.42 ± 16.86 mm/mes. Por su parte, el acuífero APN exhibe ΔGW negativos más severos que alcanzan los -78.96 mm/mes, precisamente en el año 2010.

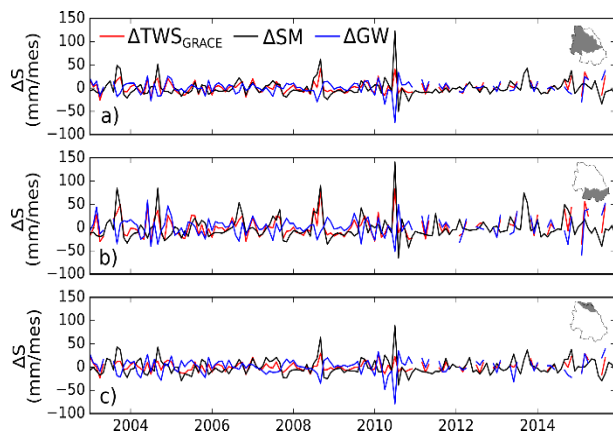


Figura 5. Cambios del almacenamiento para a) la cuenca hidrológica del Río Sabinas, b) cuenca del Río Pesquería y c) acuífero APN. La superficie que abarca cada región se muestra en la figura superior derecha de cada eje.

Las anomalías del almacenamiento terrestre ($TWS\alpha$) y del almacenamiento subsuperficial ($SM\alpha$) indican que la zona es susceptible a los periodos húmedos y secos, tal como se aprecia en la Figura 6. Se observa que TWS ha disminuido durante los últimos años debido principalmente a la sequía excepcional del 2011-2012 (Figura 6.a), cuya precipitación

media anual fue 160 mm menor a la media de largo plazo (462 ± 130 mm/año) para la totalidad de la zona de estudio. Pese a ello, la cuenca Pesquería no muestra tendencia en su TWS y se percibe un incremento en SM debido al periodo húmedo 2014-2015 (Figura 6.b). El acuífero APN muestra una menor recuperación en TWS y SM en comparación con las otras dos regiones, debido a que percibe cerca de 100 mm de precipitación por debajo de la media anual de la cuenca Pesquería, y percibe más demandas de agua subterránea que la cuenca Sabinas. Como consecuencia de los periodos húmedos y las altas tasas de extracción de agua subterránea de la zona metropolitana de Monterrey, Saltillo y las zonas de riego, las amplitudes de las anomalías de TWS y SM son mayores para la cuenca Pesquería, con desviaciones estándar de 28.83 y 57.33 mm/mes, respectivamente. Mientras que para la cuenca Sabinas y el acuífero APN, las desviaciones estándar se aproximan a 17.5 mm/mes para TWS y 42 mm/mes para SM .

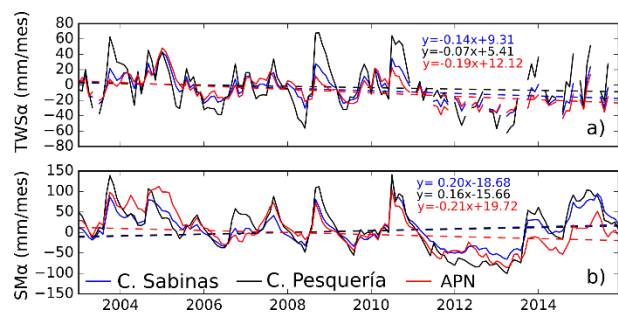


Figura 6. Anomalías mensuales (líneas sólidas) y tendencias (líneas punteadas) a) del almacenamiento terrestre derivado de GRACE y b) la humedad del suelo.

El cambio neto del almacenamiento subterráneo (GWC) se obtuvo únicamente para el periodo 2003-2009 debido a datos faltantes de las series de GRACE que se presentan a partir del año 2011 y a la sobrestimación de la humedad del suelo en el año 2010 por parte de los modelos globales. El GWC para la totalidad de la zona de estudio y para cada región se muestran en la Tabla 3, y han sido estimados como la diferencia entre los promedios de las anomalías mensuales ($GW\alpha$) del año hidrológico (mayo a abril). Para el periodo analizado, el cambio neto para los subperiodos 2003-2006 y 2006-2009 ha ido en aumento a causa de los periodos húmedos del 2003-2005 y 2007-2008. En particular, el periodo 2003-2006 generó un incremento mayor en el almacenamiento subterráneo sobre la totalidad de la zona de estudio debido a su prolongación de casi 3 años. Mientras que GWC 2006-2009 representó tan sólo el 34 % con respecto del GWC 2003-2006 para toda la zona de estudio. Para la cuenca Pesquería, el cambio neto del 2006-2009 fue 16 % mayor que el anterior, para el acuífero APN no hubo un cambio representativo del almacenamiento subterráneo del 2006 al 2009 (1.34 hm^3 que representa el 0.16 % del GWC anterior).

A partir de las series de ΔGW y las demandas estimadas, se estimó la diferencia entre las entradas y salidas naturales (ESN) del sistema a partir de la ecuación (4), cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. En este caso ESN considera la diferencia entre los flujos laterales y verticales, de tal manera que los signos positivos indican que hubo mayor recarga (ya sea vertical o lateral) que salidas (que pueden ser laterales o por capilaridad), y viceversa.

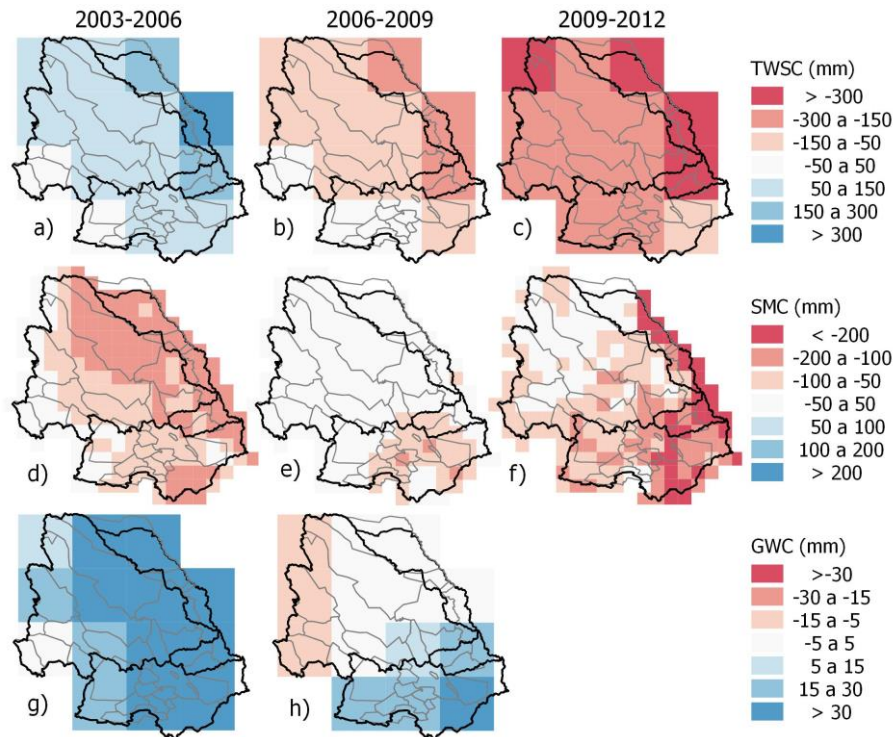


Figura 7. Cambios netos (a, b y c) del almacenamiento total TWSC, (d, e y f) humedad del suelo (SMC) y (g y h) almacenamiento subterráneo (GWC).

Tabla 3. Cambio neto del almacenamiento subterráneo (GWC)

Periodo	GWC (hm ³)			
	Total	C. Sabinas	C. Pesquería	APN
2003-2006	3626.13	1956.05	743.23	829.31
2006-2009	1245.22	300.02	865.5	1.34

Tabla 4. Promedio anual de entradas y salidas subterráneas naturales (ESN)

Año	ESN= $\Delta GW + Q_{GW} - R_a$ (hm ³ /año)			
	Toda la zona	C. Sabinas	C. Pesquería	APN
2004	1302.27	181.51	418.73	-319.06
2005	-518.94	629.91	-1482.27	413.12
2006	-191.54	466.5	-712.86	505.62
2007	355.17	137.15	483.82	-517.23
2008	-1186.72	-943.34	-273.42	-93.1
2009	2805.77	2157.14	291.99	323.34
Promedio	427.67	438.15	-212.34	52.12

De la Tabla 4 se aprecia que en general, exceptuando a la cuenca Pesquería, el promedio de las ESN ha sido positiva, es decir, para el periodo 2003-2009 se ha tenido mayor recarga que extracciones, salvo algunos años (2005 y 2006) en los que a causa de la baja tasa de precipitación la recarga vertical pudo haber sido despreciable. El promedio negativo de ESN y las altas tasas de humedad en la cuenca Pesquería podrían indicar flujos capilares del almacenamiento subterráneo al subsuperficial, fenómeno que se ha encontrado predominante en zonas áridas y semiáridas con amplios espesores no saturados, tal como comentan Richey et al. (2015). Otro

motivo que podría causar las discrepancias de GW y SM es la misma estructura de los modelos globales GLDAS, NLDAS y VIC, ya que ellos no suelen contener información de las prácticas de cultivos (Breña-Naranjo et al., 2014) ni consideran estratos profundos, por lo que podrían subestimar la recarga vertical. Sin embargo, la falta de datos in situ dificulta la determinación del origen de las discrepancias.

En la Figura 7 se presenta la distribución espacial de los cambios netos del almacenamiento total (TWSC), humedad del suelo (SMC) y almacenamiento subterráneo (GWC), estimados de igual manera que los datos de la Tabla 3. Durante el periodo 2003-2006 el cambio neto en TWS y GW incrementaron principalmente al noreste de la zona de estudio (> 300 mm y > 30 mm, respectivamente), tal como se observa en la Figura 7.a y Figura 7.g. Para ese mismo periodo, SMC disminuyó entre 50 y 200 mm debido a que el año hidrológico 2003-2004 fue más húmedo que el 2006-2007, siendo la región norte la más afectada (Figura 7.d). En el periodo 2006-2009 SMC fue mínimo en la mayoría de la zona de estudio (-25 < SMC < 25 mm, tal como se muestra en la Figura 7.e), mientras que el TWS presentó descensos de entre 50 y 150 mm en las zonas que previamente mostraron incrementos en el almacenamiento (Figura 7.b). A causa de la sequía del 2011-2012, TWS y SM sufrieron descensos significativos (Figura 7.c y Figura 7.f), en este caso el valle del acuífero APN sufrió un descenso de TWS mayor a 300 mm con respecto al 2009, mientras que en la mayoría de la zona de estudio TWS disminuyó entre 150 y 300 mm. Por su parte, SM se redujo en más de 200 mm en las áreas de cultivo aledañas a la zona metropolitana de Monterrey y en el Río Bravo, mientras que para el resto de la zona de estudio SMC fue de -200 a -50 mm.

Conclusiones y discusiones

En este artículo se presentó una metodología para estimar las componentes del balance hidrológico a partir de datos de modelos globales y percepción remota. Los resultados indican que GLDAS, NLDAS y los resultados del modelo VIC sobrestiman la humedad del suelo para periodos húmedos. Previamente, inconvenientes con los resultados de modelos globales se han encontrado en otras zonas áridas y semiáridas del mundo (Breña-Naranjo et al., 2014; Henry et al., 2011), por lo que se pone en cuestión su uso para la estimación de cambios de almacenamiento subterráneo en este tipo de regiones. Debido a la cantidad de parámetros que intervienen en dichos modelos es difícil identificar la causa de los errores, pero podría deberse a la falta de mediciones en las regiones áridas y semiáridas para la calibración de los modelos.

La precipitación demostró ser la principal componente que controla los cambios en los almacenamientos superficiales y subterráneos, esto último debido a la estructura de las formaciones geológicas (acuíferos libres principalmente constituidos de depósitos aluviales de media a alta conductividad hidráulica). El periodo húmedo del 2003-2005 está asociado con los incrementos más significativos en TWS, SM y GW que se observaron en el periodo de análisis (2003-2015), así como el periodo de sequía 2001-2012 exhibe los déficits más severos de TWS y SM.

Las anomalías de TWS y SM sugieren que de las tres regiones analizadas, el acuífero APN presentó menor capacidad de recuperación de los almacenamientos después de una sequía prolongada, debido a sus bajas tasas de precipitación y sus demandas de agua subterránea. La cuenca del Río Pesquería presentó mayores cambios en sus almacenamientos, sin embargo se recuperó rápidamente de la sequía debido al periodo húmedo que le siguió.

Los resultados indican que la zona podría tener capacidad para suministrar agua subterránea a otras actividades como es el caso del FH, sin embargo, actualmente no se conoce cuál será la intensidad del desarrollo de la extracción de recursos no convencionales en México, pero se prevé que sea menor que la que se ha experimentado en EUA. Por otro lado los periodos de sequía junto a demandas adicionales de agua podrían generar un estrés hídrico del cuál algunas regiones no se puedan recuperar tan rápidamente, como se observó con el acuífero APN.

Para finalizar, se hace énfasis en la importancia del uso de datos satelitales para la evaluación y manejo de recursos hídricos en zonas con poca o nula información. Así mismo se aclara que las bases de datos satelitales y modelos globales tienden a presentar errores, como se observó con las variaciones de la humedad del suelo, por lo que se sugiere que en las zonas áridas y semiáridas de México se empiece a monitorear la humedad del suelo para poder calibrar los productos derivados de los modelos GLDAS, NLDAS y VIC.

Referencias

- 1.- **Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.** (1998). *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirements. Rome.
- 2.- **Anderson, R.G., Lo, M.H., Famiglietti, J.S.** (2012). "Assessing surface water consumption using remotely-sensed groundwater, evapotranspiration, and precipitation".

Geophys. Res. Lett. 39, 1–6. doi:10.1029/2012GL052400

- 3.- **Armanios, D.E., Fisher, J.B.** (2014). "Measuring water availability with limited ground data: Assessing the feasibility of an entirely remote-sensing-based hydrologic budget of the Rufiji Basin, Tanzania, using TRMM, GRACE, MODIS, SRB, and AIRS". *Hydrol. Process.* 28, 853–867. doi:10.1002/hyp.9611
- 4.- **Bastiaanssen, W.G., Ali, S.** (2003). "A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin". *Agric. Ecosyst. Environ.* 94, 321–340. doi:10.1016/S0167-8809(02)00034-8
- 5.- **Breña-Naranjo, J.A., Kendall, A.D., Hyndman, D.W.** (2014). "Improved methods for satellite-Based groundwater storage estimates: A decade of monitoring the high plains aquifer from space and ground observations". *Geophys. Res. Lett.* 41, 6167–6173. doi:10.1002/2014GL061213
- 6.- **Carrera-Hernández, J.J., Carreón-Freyre, D., Cerca-Martínez, M., Levesse, G.** (2016). "Groundwater flow in a transboundary fault-dominated aquifer and the importance of regional modeling: the case of the city of Querétaro, Mexico". *Hydrogeol. J.* 24, 373–393. doi:10.1007/s10040-015-1363-x
- 7.- **Castañeda-Ibáñez, C.R., Martínez-Menes, M., Pascual-Ramírez, F., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Reynoso, D.S., Esparza-Govea, S.** (2015). "Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el Distrito de Riego Río Yaqui, Sonora, México". *Agrociencia* 49, 221–232.
- 8.- **CERES** (2014). *Hydraulic Fracturing and Water Stress: Water Demand by the Numbers*. Boston.
- 9.- **Deus, D., Gloaguen, R., Krause, P.** (2011). "Water balance modelling in a semi-arid environment with limited in-situ data: remote sensing coupled with satellite gravimetry, Lake Manyara, East African Rift, Tanzania". *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8, 8737–8792. doi:10.5194/hessd-8-8737-2011
- 10.- **Dingman, S.L.** (2002). "Water in soils: infiltration and redistribution". *Phys. Hydrol.* 222–242.
- 11.- **DOF** (2013). *Decreto por el que se reforma y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Energía*. Diario Oficial de la Federación.
- 12.- **EIA** (2013). *Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States*. Washington, DC.
- 13.- **Gallegos, T.J., Varela, B.A., Haines, S.S., Engle, M.A.** (2015). "Hydraulic fracturing water use variability in the United States and potential environmental implications". *Water Resour. Res.* 51, 5839–5845. doi:10.1002/2015WR017278
- 14.- **Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M.W., Timmermans, J., Batelaan, O., Verhoef, W.** (2013). "Assessing Groundwater Storage Changes Using Remote Sensing-Based Evapotranspiration and Precipitation at a Large Semiarid Basin Scale". *J. Hydrometeorol.* 14, 1733–1753. doi:10.1175/JHM-D-12-0156.1
- 15.- **González, I.A.** (2013). *Metodología para desarrollar balances de aguas subterráneas: caso de estudio acuífero Allende-Piedras Negras, Coahuila*. Tesis de especialidad.
- 16.- **Henry, C.M., Allen, D.M., Huang, J.** (2011). "Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data". *Hydrogeol. J.* 19,

- 741–755. doi:10.1007/s10040-011-0724-3
- 17.- **Hualan, R., Hiroko, B.** (2013). *Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) Products*.
- 18.- **Huete, A., Justice, C.** (1999). "Modis Vegetation Index Algorithm Theoretical Basis". Environmental Sciences.
- 19.- **Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J.** (2010). "The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA)". *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. pp. 3–22. doi:10.1007/978-90-481-2915-7_1
- 20.- **IWMI** (2007). *Water for food Water for life: Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Washington, DC, USA.
- 21.- **Landerer, F.W., Swenson, S.C.** (2012). "Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates". *Water Resour. Res.* 48. doi:10.1029/2011WR011453
- 22.- **Livneh, B., Pierce, D.S., Bohn, T.J., Munoz-Ariola, F., Nijssen, B., Cayan, D., Vose, R., Brekki, L.D.** (2015). "Development of a spatially comprehensive, daily hydrometeorological data set for Mexico, the conterminous U.S., and southern Canada: 1950-2013". *Nat. Sci. Data* 2, 150042.
- 23.- **Livneh, B., Rosenberg, E.A., Lin, C., Nijssen, B., Mishra, V., Andreadis, K.M., Maurer, E.P., Lettenmaier, D.P.** (2013). "A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States: Update and extensions". *J. Clim.* 26, 9384–9392. doi:10.1175/JCLI-D-12-00508.1
- 24.- **Meijerink, A., Bannert, D., Batelaan, O.** (2007). "Remote sensing applications to groundwater", in *IHP-VI, Series on Groundwater*. doi:10.1080/02626669609491525
- 25.- **Nicot, J.-P., Scanlon, B.R.** (2012). "Water use for shale gas production in Texas, U.S.". *Environ. Sci. Technol.* 46, 3580–3586. doi:10.1021/es204602t
- 26.- **Payán, J.G., Rodríguez, J.C., Watts, C.J.** (2011). "Environmental Monitoring and Crop Water Demand", in: *Water Resources in Mexico: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*. Springer. doi:10.1007/978-3-642-05432-7
- 27.- **Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.-H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., Swenson, S., Rodell, M.** (2015). "Quantifying renewable groundwater stress with GRACE". *Water Resour. Res.* n/a-n/a. doi:10.1002/2015WR017349
- 28.- **Robles-Morua, A., Vivoni, E.R., Mayer, A.S.** (2012). "Distributed Hydrologic Modeling in Northwest Mexico Reveals the Links between Runoff Mechanisms and Evapotranspiration". *J. Hydrometeorol.* 13, 785–807. doi:10.1175/JHM-D-11-0112.1
- 29.- **Scanlon, B.R., Reedy, R.C., Nicot, J.-P.** (2014a). "Comparison of water use for hydraulic fracturing for unconventional oil and gas versus conventional oil". *Environ. Sci. Technol.* 48, 12386–93. doi:10.1021/es502506v
- 30.- **Scanlon, B.R., Reedy, R.C., Nicot, J.P.** (2014b). "Will water scarcity in semiarid regions limit hydraulic fracturing of shale plays?". *Environ. Res. Lett.* 9, 124011. doi:10.1088/1748-9326/9/12/124011
- 31.- **SEMARNAT** (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030 Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*. Ciudad de México.
- 32.- **Seo, K.W., Wilson, C.R., Famiglietti, J.S., Chen, J.L., Rodell, M.** (2006). "Terrestrial water mass load changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)". *Water Resour. Res.* 42. doi:10.1029/2005WR004255
- 33.- **Soeder, B.D.J., Kappel, W.M.** (2009). *Water Resources and Natural Gas Production from the Marcellus Shale*. USGS.
- 34.- **Spring, U.O.** (2011). *Water Resources in Mexico. Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- 35.- **Stevens, S.H., Moodhe, K.D.** (2015). "Evaluation of Mexico's Shale Oil and Gas Potential". *Adv. Resour. Int. Inc.* 177139, 1–13.
- 36.- **Tucker, C.J.** (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation". *Remote Sens. Environ.* 8, 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
- 37.- **UNESCO** (1979). *Map of the world distribution of arid regions*. Paris, France.
- 38.- **USGS** (2014). *Assessment of Unconventional Oil and Gas Resources in Northeast Mexico*.
- 39.- **Vengosh, A., Jackson, R.B., Warner, N., Darrah, T.H., Kondash, A.** (2014). "A Critical Review of the Risks to Water Resources from Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States". *Environ. Sci. Technol.* 16, 15.
- 40.- **Yang, L., Manno, J., Grossmann, I.E.** (2014). "Optimization Models for Shale Gas Water Management". *AIChE J.* 60, 1–43. doi:10.1002/aic.14526