

Implementación de una base de datos geográfica, con la estructura ArcHydro de aguas subterráneas para la cuenca binacional del río Bravo/Grande

Héctor Sanvicente-Sánchez
Jaime Velázquez Álvarez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor. México, C.P. 62550
{hsanvice, jaimevel}@tlaloc.imta.mx

Abstract. This paper describes the implementation of a geographic database, geodatabase, with the structure of the ArcHydro groundwater data model for the Binational Basin of the Rio Bravo/Grande. This geodatabase has data from Mexico and the United States. The geodatabase was implemented through a file geodatabase using ESRI ArcGis Software. The ArcHydro groundwater data model is integrated by three main components: hydrogeology, simulation and time series. The hydrogeology component includes a feature dataset with a set of feature classes describing common hydrogeologic features. The simulation component includes a feature dataset with feature classes to represent common objects of simulation models. The temporal information, such as pollutant concentrations variation and water levels are represented as tabular data in the TimeSeries and TSType tables. Information feed for the Mexican side consists of wells location, aquifers, hydrogeological units boundaries and some vertical measurement data. It was obtained from several aquifer studies on paper and from two databases that have the National Water Commission (CONAGUA). Information on U.S. side consists of observation wells located on the network that for this purpose has the USGS. We got time series consisted mainly of freatic level elevation. Geodatabase created only has information on the components of hydrogeology and time series. The simulation component will be generated until the above components will be used by the scientific community in the hydrodynamic modeling and simulation of aquifers. For this purpose we developed a web application page that will be published by CONAGUA.

Palabras-clave: aquifers, hydrogeological units, groundwater data model, binational geodatabase, acuíferos, unidades geohidrológicas, modelos de datos de aguas subterráneas, base de datos geográfica binacional.

1. Introducción

Uno de los problemas principales en la modelación hidrológica de cantidad y calidad tanto de aguas superficiales como subterráneas se encuentra en la disponibilidad de datos confiable y en una estructura estándar para generar los archivos de entrada del modelo en cuestión. En este aspecto, el Centro de Investigación de Recursos Hidráulicos (*Center for Research in Water Resources, CRWR*) de la Universidad de Texas ó Austin desarrolló un modelo de datos georreferenciado que propone una estructura para el almacenamiento de información temporal y espacial basado en Sistemas de Información Geográfica llamado ArcHydro. Este modelo se encuentra diseñado a través de tres componentes que son: componente de hidrología superficial (Maidment, 2002), componente de calidad del agua superficial (Patiño, et al., 2006) y componente de aguas subterráneas (Strassberg, 2005).

Desde el surgimiento de la componente ArcHydro de aguas superficiales se vieron las ventajas de este modelo de datos y comenzó a adoptarse como un estándar, en los Estados Unidos primero y posteriormente en México, para almacenar la información de hidrología superficial. Con el surgimiento posterior de las componentes de calidad del agua y aguas subterráneas el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) visualizó al ArcHydro como un estándar de almacenamiento de la información hidrológica completa, por lo que aprovechando la convocatoria del proyecto de investigación denominado "Análisis y modelación hidrológica, de calidad del agua y gestión en la región fronteriza México-Estados Unidos" propuso generar bases de datos con la estructura ArcHydro en sus tres componentes, así como modelos de gestión en cantidad y calidad para toda la zona transfronteriza con Estados Unidos. El proyecto de investigación se financió de manera conjunta a través de la

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México (Sanvicente-Sanchez et al., 2010).

En este artículo se describe la metodología y los resultados correspondientes a la implementación de la base de datos geográfica (*geodatabase*, GDB) con la estructura del modelo de datos ArcHydro, en la componente de aguas subterráneas, para la cuenca del río Bravo/Grande, considerado datos de México y Estados Unidos (E.U.). Se menciona también la implementación de una interfaz de consulta y actualización de la información contenida en estas bases de datos a través de una página web que sirve de difusión de la información.

1.1 Ubicación de la Zona de Estudio

La cuenca del río Bravo/Grande es una cuenca binacional que cubre parte de tres estados en el sur de los E.U. (Colorado, New Mexico y Texas) y cinco estados en el norte de México (Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas) (figura 1). Esta región es actualmente una de las zonas con mayor estrés hídrico en el mundo (Brels et al., 2008), con menos de 500 m³ por persona, por año, de agua disponible.

La cuenca binacional del río Bravo/Grande corresponde a la región administrativa número 6 y región hidrológica 24 en el lado Mexicano, y a la región hidrológica número 13 en los Estados Unidos, abarcando un área total de 555,000 km², con 228,000 km² en México y 327,000 km² en los E.U. Las subcuencas consideradas en este trabajo son las reportadas en la clasificación hidrológica establecida por el USGS para el lado de Estados Unidos y la CONAGUA para el lado de México.

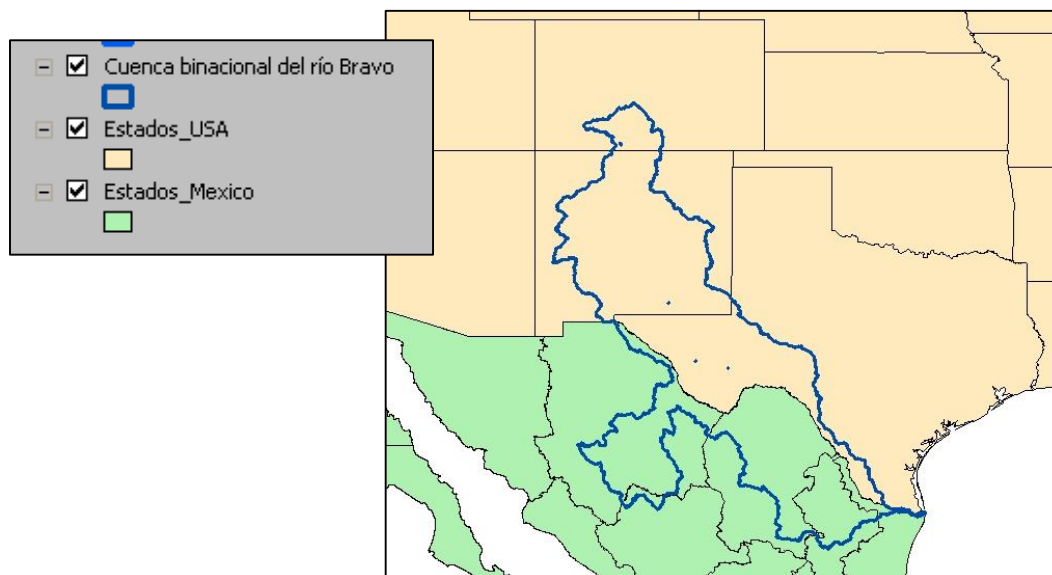


Figura 1. Área de la cuenca binacional del río Bravo/Grande entre México y Estados Unidos

El río en sí forma parte de la frontera entre Estados Unidos y México y varios acuerdos internacionales han tenido lugar desde la formación de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA para México e IBWC para Estados Unidos) en 1889. El Tratado de Aguas de 1944 entre los E.U. y México establece las asignaciones de agua para los ríos Colorado y Río Bravo/Grande. El tratado establece, de forma general, que 431.721 hm³ (350.000 acre-feet) de agua deben ser proporcionados por México a los E.U. como promedio anual mínimo en períodos de cinco años, volumen que será entregado en la confluencia de los seis afluentes mencionados en el tratado (Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Las Vacas) con la corriente principal del río Bravo (CILA, 1944).

Debido a la escasez de agua superficial, a la alta densidad poblacional que ya posee y al gran crecimiento poblacional esperado en los siguientes veinte años, el agua subterránea se establece como una opción para esta cuenca, aunque muchos de sus acuíferos se encuentran ya sobreexplotados.

1.2 Descripción del modelo de datos ArcHydro de aguas subterráneas

El modelo de datos ArcHydro de aguas subterráneas está conceptualizado por tres componentes principales: geohidrología, simulación y series de tiempo (Strassberg, 2005) (figura 2). La componente de geohidrología incluye un elemento *dataset* con un conjunto de elementos *feature class* para describir elementos geohidrológicos comunes. El *dataset* incluye elementos *feature class* para representar elementos en dos dimensiones, tales como pozos y acuíferos, y en tres dimensiones para describir hidroestratigrafía, volúmenes sólidos y secciones de corte. Además de los *features class* se incluyen dos tablas para representar atributos de las unidades hidrogeológicas y mediciones verticales en las perforaciones. La información tipo malla tal como los límites superior e inferior de las unidades hidrogeológicas y propiedades tales como conductividad hidráulica, transmisividad y porosidad son representadas como rasters en el catálogo Georaster.

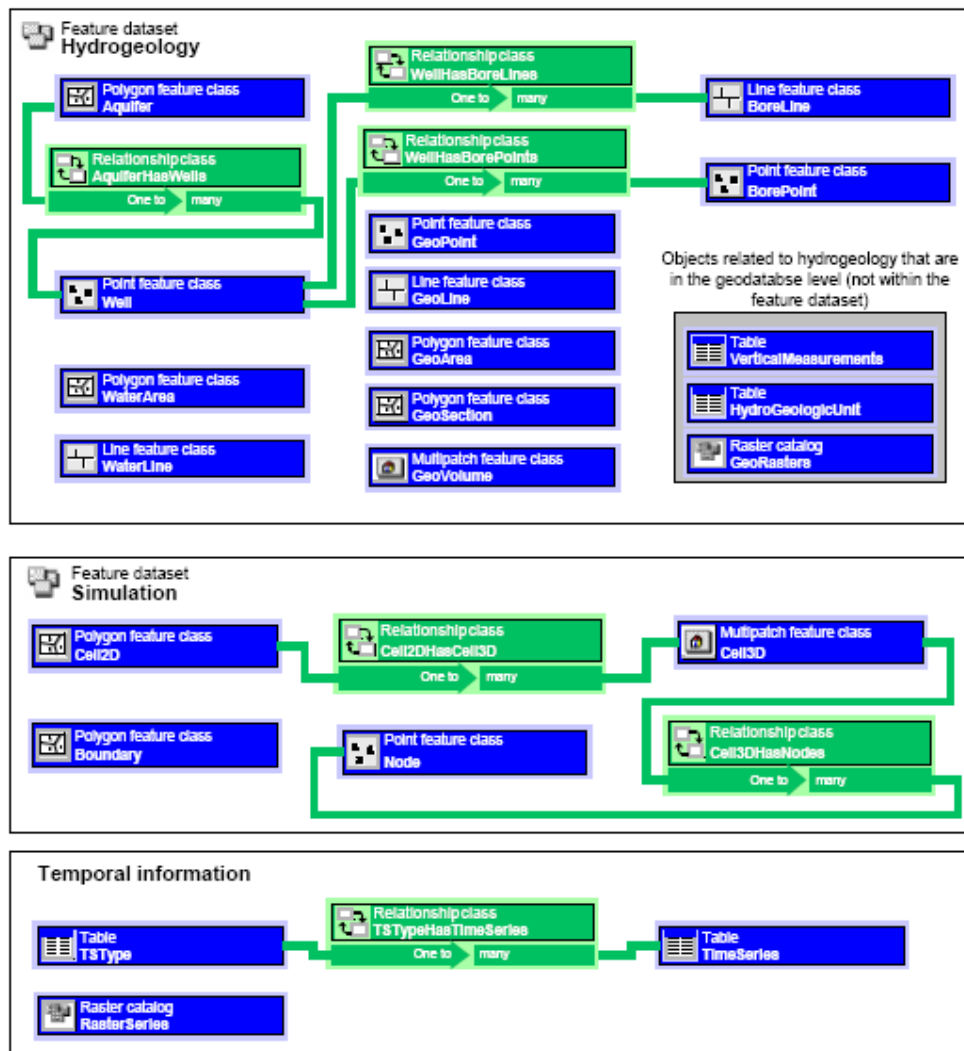


Figura 2. Esquema del modelo ArcHydro de aguas subterráneas. Fuente: Strassberg (2005).

La componente de simulación incluye un elemento *dataset* con *features class* para representar objetos comunes de los modelos de simulación. Estos *features class* representan mallas computacionales, como mallas de diferencia finita y mallas de elemento finito, y permite almacenar y presentar las entradas y salidas del modelo.

La información temporal, tal como la variación de concentraciones de contaminantes y niveles del agua son representados como datos tabulares en las tablas denominadas TimeSeries y TSType o como información reticular en el catálogo de rasters.

Las relaciones dentro del modelo asocian los *features class* y las tablas, y establecen conexiones lógicas entre las capas. Estas relaciones son las bases para las operaciones orientadas a objetos, ya que permiten consultar y aplicar funciones sobre los elementos, los cuales son conectados lógicamente a través de las relaciones.

2. Metodología de trabajo

2.1 Definición de la proyección geográfica e integración del mapa base

La primera actividad que se realizó para la implementación del modelo fue la definición de los sistemas coordenados de proyección y geográfico en los que se almacenaría la información en la *geodatabase*. Por ser esta una cuenca binacional que cubre una gran extensión (555,000 km²) y a que lo que se quería era integrar información de la cuenca completa, la información que se colectó se encontraba en diferentes sistemas coordenados geográficos. Debido a que la mayor información colectada en cuanto a definición de acuíferos fue del lado mexicano, se decidió usar la definición oficial en México para áreas que cubren más de una zona UTM (tabla 1).

Tabla 1. Sistema coordenado proyectado y geográfico usado en la *geodatabase*.

Sistema Coordenado Proyectado:	Sistema Coordenado Geográfico:
Proyección: Cónica Conforme de Lambert	Unidad Angular: Grado (0.017453292519943299)
Falso Este: 2500000.00000000	Meridiano Primario: Greenwich (0.000000000000)
Falso Norte: 0.00000000	Datum: D_ITRF_1992
Meridiano Central: -102.00000000	Esferoide: GRS_1980
Paralelo Standard_1: 17.50000000	Semieje mayor: 6378137.000000000000000000
Paralelo Standard_2: 29.50000000	Semieje menor: 6356752.314140356100000000
Paralelo Central: 12.00000000	Achatamiento: 298.257222101000020000
Unidad Lineal: Metro (1.000000)	

Los pasos que se siguieron para la integración del área de estudio o mapa base fueron:

- Elaboración de los mosaicos de datos vectoriales de hidrografía y cuerpos de agua escala 1:50,000 para la parte de México y 1:100,000 para la parte de los EU., y recorte de ambos considerando un buffer de 10 km. alrededor del área de estudio.
- Elaboración del mosaico del Modelo Digital de Elevación y recorte considerando un buffer de 10 km.
- Edición de segmentos de río faltantes en los datos vectoriales de hidrografía, apoyándose en el modelo digital de elevación y cartas topográficas raster. En esta parte se revisó que todos los ríos y corrientes secundarias tuvieran una continuidad hasta la salida de la cuenca.
- Agregar el nombre a las corrientes y a los cuerpos de agua apoyándose en el campo *oNameo* de la tabla de atributos de la información hidrográfica digital colectada y en la información de la carta topográfica en papel.
- Incorporación de información de contexto: Delimitación de países, límites estatales y municipales, límites de cuencas y subcuencas, delimitación de acuíferos, ciudades.

2.2 Recopilación y procesamiento de información de aguas subterráneas

La información de aguas subterráneas para el lado de Estados Unidos de la cuenca en estudio, tanto de la ubicación de los pozos como de los datos de series históricas, se obtuvieron del siguiente sitio en internet del *Geological Survey* de los E.U. (USGS): <http://groundwaterwatch.usgs.gov/default.asp> (figura 3).

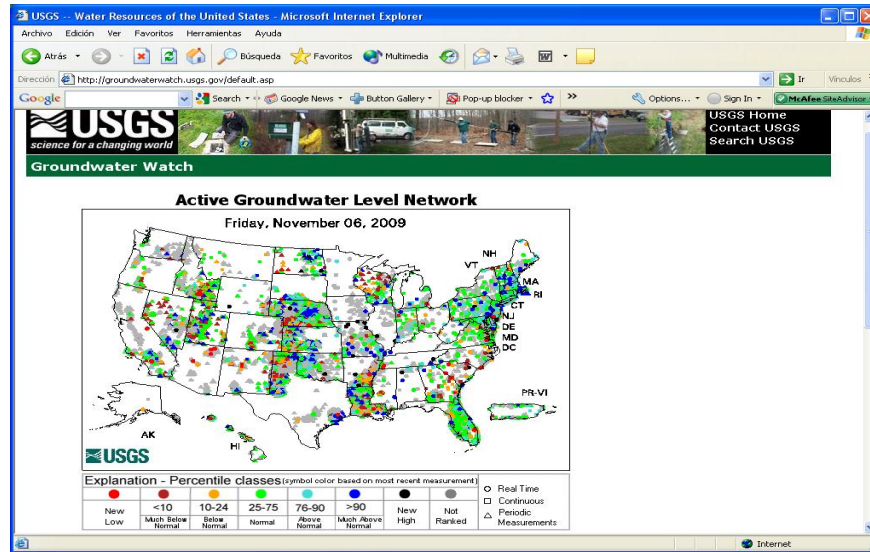


Figura 3. Sitio web del USGS para aguas subterráneas en los E.U.

Dicha página permite ver los pozos por estado, por un lado muestra el mapa con la ubicación de cada pozo y por el otro una lista con el número de pozos para cada condado. Si se selecciona uno de los condados, se despliega otro mapa y un archivo con la información de cada pozo. Toda la información recopilada de este sitio de internet fue procesada y almacenada en un archivo en Excel, para construir el catálogo de pozos (figura 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	HydroCode	Latitud	Longitud	Datum	Hydrologic_Unit_Code	Altitude	Units	Altitude	Municipality	State
2	361832109462701	36.3088889	-109.774167	NAD27	14080204	5,903	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
3	362149109463301	36.3636111	-109.775833	NAD27	14080204	5,757	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
4	362823109463101	36.4730566	-109.775278	NAD27	14080204	5,775	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
5	362936109564101	36.4908333	-109.9475	NAD27	14080204	5,864	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
6	363013109564901	36.5036111	-109.980278	NAD27	14080204	6,024	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
7	363103109445201	36.5175	-109.747778	NAD27	14080204	5,633	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
8	363232109465601	36.5422222	-109.782222	NAD27	14080204	5,615	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
9	364248109514801	36.7133333	-109.862778	NAD27	14080204	5,200	feet above sea level	NGVD29	Apache	Arizona
10	312044110141901	31.3455556	-110.238611	NAD27	15050202	5,100.00	feet above sea level	NGVD29	Cochise	Arizona
11	312214110071801	31.3707	-110.122139	NAD83	15050202	4,236.85	feet above sea level	NAVD88	Cochise	Arizona
	J	K	L	M	N	O				
1	Country	Name	Most Recent Measurement	Date	Depth	Local_Aquifer				
2	USA	10 054-01.35X13.20	309.9 BLS	3/17/2009	670	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
3	USA	10 054-01.47X09.39	193.3 BLS	3/17/2009	360	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
4	USA	10 054-01.41X01.85	256.8 BLS	3/17/2009	360	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
5	USA	08 054-10.96X00.63	374.46 BLS	09/10/2009	851	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
6	USA	08 037-12.81X16.98	541.9 BLS	3/17/2009	720.0	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
7	USA	09 036-13.75X16.01	105.3 BLS	3/17/2009	300	Wingate Sandstone Of Glen Canyon Group				
8	USA	09 037-01.81X14.35	166 BLS	3/17/2009	300	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
9	USA	08 037-06.23X02.51	44.7 BLS	3/17/2009	107	Navajo Sandstone Of Glen Canyon Group(jurassic-triassic)				
10	USA	D-24-21 17BCB3	32.45 BLS	6/11/2009	123.67					
11	USA	D-24-22 04CBC1	17.84 BLS	6/11/2009	36.5					

Figura 4. Excel con la estructura del catálogo de pozos de ArcHydro de aguas subterráneas

Para la parte del lado Mexicano se consideraron los datos provenientes de tres fuentes:

- a) Estudios previos, disponibles en papel, que fueron realizados por dependencias gubernamentales o por empresas privadas.
- b) Base de datos del Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA.
- c) Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la CONAGUA.

En el caso de los estudios previos en papel, la CONAGUA proporcionó 62 estudios, que cubrían 22 acuíferos de los existentes en la cuenca del río Bravo/Grande del lado mexicano. De éstos 22 acuíferos, para dos sus estudios no contenían información para implementar la base de datos ArcHydro. Respecto a la información disponible en la base de datos del SIGMAS, se obtuvo información de 39 acuíferos. A partir de la información del REPGA se ubicaron pozos y aprovechamientos en 89 acuíferos de los 94 considerados en este trabajo. Cabe aclarar que la principal información del REPGA es la ubicación espacial del aprovechamiento, el acuífero en el que se localiza el pozo, el volumen concesionado y los usos del agua, pero no posee información geoestratigráfica ni de series de tiempo.

Se procedió a revisar los datos de cada una de estas fuentes para saber cual información de la requerida por ArcHydro estaba contenida en ellas. Se determinó que los datos que estaban disponibles en esas fuentes correspondían a los elementos *BoreLine*, *HydrologicUnit*, *TimeSeries*, *VerticalMeasurements* y *Well* del ArcHydro de aguas subterráneas. Posteriormente se procedió a definir el formato del archivo, en el cual se capturaría la información de cada elemento para cada archivo. Adicionalmente, se definió una nomenclatura para dar nombre a los archivos. La tabla 2 muestra un ejemplo de los archivos creados para un acuífero con información de cada capa o elemento requerido para ArcHydro.

Tabla 2. Archivos que se crearon por acuífero para cada elemento del ArcHydro

Nombre del archivo	Información
Boreline_809	Datos de geológicos de pozos.
Hydrogeologicunit_809	Unidades hidrogeológicas
Timeseries_809	Nivel estático en msnm, nivel dinámico y datos de bombeo en litros por segundo.
Verticalmeasurements_809	Geología del acuífero.
Wells_809	Localización de aprovechamientos y datos del REPGA.

En la tabla 2, el número que aparece al final del nombre del archivo corresponde a la clave del acuífero, por ejemplo, el archivo denominado Boreline_809, contiene datos geológicos de pozos del acuífero 809 (Laguna Mexicanos).

Cabe mencionar que los datos del SIGMAS y REPGA fueron agregados al archivo correspondiente. Por ejemplo. Los datos del REPGA, que son de aprovechamientos subterráneos, fueron agregados al archivo *Well*.

2.3 Implementación de la geodatabase con estructura ArcHydro de aguas subterráneas

Una vez que se terminó la recopilación e integración de los datos, se procedió a definir aspectos que eran importantes para la creación de la base de datos ArcHydro.

El campo HydroID se utiliza como un código único de identificación de los elementos en la *geodatabase* ArcHydro. El campo es un elemento numérico compuesto por 8 dígitos, en donde se busca que cada dígito o rango de dígitos tenga un significado. Para la *geodatabase* integrada el primer dígito corresponde al país, se asigna 1 a los elementos que se ubican en el lado de Estados Unidos, 2 a los ubicados en el lado de México y 3 a los elementos compartidos por ambos países. Los siguientes dos dígitos corresponden al identificador del elemento (*Well* - 50, *Aquifer* - 51, *Boreline* - 52, *Borepoint* - 53, *Hydrogeologic unit* - 54,

Vertical measurement ó 55). Los últimos cinco dígitos se utilizan para asignar el número consecutivo al elemento, así se pueden tener hasta 99,999 elementos.

Con el fin de dar mayor claridad sobre el origen y otras características de la información se consideró conveniente agregar algunos campos a los originales establecidos por Strassberg (2005). Las capas geográficas a las que se agregaron campos fueron *Well* y *Aquifer*. Por ejemplo para *Well* se agregaron campos como: unidades de la elevación, estado donde se ubica el pozo, nombre del pozo, municipio del pozo, fuente de donde se obtuvieron los datos, uso principal al que se destina el pozo, volumen total concesionado, etc.

También se definió una nomenclatura para asignar la clave de la variable al campo *TSTypeID* de la tabla *TimeSeries*. Se acordó utilizar valores a partir de 501 para asignar la clave a las variables que corresponden a aguas subterráneas. Cabe aclarar que en la información obtenida para Estados Unidos se obtuvo también información de calidad del agua en los pozos por lo que estas variables también se consideraron.

Definidos los aspectos descritos arriba, se procedió a crear la base de datos geográfica, de tipo file *geodatabase*, se aplicó el esquema *ArcHydro* de aguas subterráneas en versión completa, se cargó la información y se asignaron valores al campo *HydroID* y se llenaron los campos para los cuales se conocía el dato.

3. Resultados y discusión

El resultado principal del trabajo es la base de datos geográfica con estructura de datos *ArcHydro* de aguas subterráneas. La base de datos geográfica implementada es del tipo file *geodatabase*. La información geográfica que se consideró del lado mexicano consistió en la ubicación de pozos, acuíferos, descripción de unidades geohidrológicas y algunos datos de mediciones verticales. La información mencionada anteriormente se obtuvo de estudios en papel realizados por diversas dependencias y de las bases de datos de los sistemas SIGMAS y REPDA que posee la CONAGUA. Del lado de Estados Unidos se obtuvo la ubicación de pozos de observación de la red que para este efecto posee el USGS; las series de tiempo consistieron básicamente de elevación del nivel freático. La figura 5 muestra los 45,024 pozos y aprovechamientos de agua subterránea colectados para la cuenca del río Bravo/Grande; de los cuales 44,026 están del lado de México y 998 de E.U. También muestra los 94 acuíferos que se tienen para el lado mexicano, en 89 de ellos se tiene ubicación de pozos.

En tablas se tienen 447,870 registros de series de tiempo, 249 registros de *Boreline*, 236 de *Hydrologic Units* y 249 registros de *Vertical measurement*. Se cuenta con poca información de unidades geohidrológicas porque en México prácticamente no se colecta o registra la estratigrafía de los pozos.

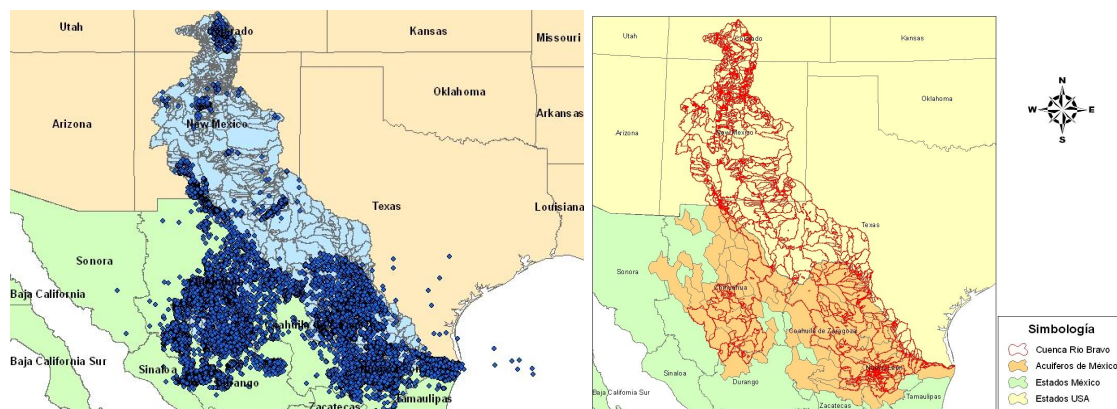


Figura 5. Ubicación de pozos y acuíferos en la cuenca del río Bravo/Grande

Hasta el momento únicamente se tiene información de dos de las tres componentes ArcHydro de aguas subterráneas que son: geohidrología e información temporal (series de tiempo). La componente de simulación se generará conforme las componentes anteriores sean empleadas por la comunidad científica en la modelación y simulación hidrodinámica de los acuíferos y sus resultados almacenados en esta *geodatabase*. Para conseguir este fin se desarrolló una aplicación web de consulta que la CONAGUA publicaría en su página web. Mientras esto ocurre se puede acceder a la información desde el sitio web <http://gia.imta.mx>.

4. Conclusiones

La base de datos geográfica generada pueden ser usada en la realización de estudios de modelación y simulación hidrodinámica, modelos de gestión, caracterización del recurso hídrico, etc. Así como en los procesos de toma de decisiones y negociaciones internacionales en la zona transfronteriza. La base de datos está abierta a todo público a través de un sitio web y la aplicación desarrollada para este fin. El desarrollo de herramientas de este tipo requiere de una actualización constante, el proyecto debe tener una continuación para poder mantener las dos componentes generadas e implementar la de simulación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua establecido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el soporte brindado para el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

Maidment, D. **ArcHydro GIS for water resources**. Redlands, California, USA: ESRI Press, 2002. 203 p.

Patiño, C.; McKinney D.; Maidment D. **Water Quality Data Model in GIS for the Rio Grande/Bravo Basin**. Austin, Tx, USA: Center for Research in Water Resources, University of Texas, 2006. 49 p.

Strassberg, G. **A geographic data model for groundwater systems**. 2005.228 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) - University of Texas, Austin, Tx, USA. 2008.

Sanvicente Sánchez, H.; Velázquez Álvarez, J.; Ribera Benites, J.; Patiño Gómez, C.; Villalobos del Alba, A.A. **Análisis y modelación hidrológica, de calidad del agua y gestión en la región fronteriza México-Estados**. Jiutepec, Mor. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010. 46 p. (Clave IMTA:TH0723.6, Clave CONACYT: CNA-CONACYT-2006-01-48862).

Brels, S.; Coates, D.; Loures, F. **Transboundary water resources management: the role of international watercourse agreements in implementation of the CBD**. Montreal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2008. 48 p. (CBD Technical Series no. 40).

CILA. **Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos de América de la distribución de las aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México**. Comisión Internacional de Límites y Aguas Entre México y los Estados Unidos Sección Mexicana, 1944. 28 p. Disponible en < <http://www.sre.gob.mx/cila/>>.