

## CAPÍTULO 9

# Sistema de información geográfica binacional de la cuenca del río Bravo

**Autor**

C. Patiño Gómez

P. Hernández Romero

## Antecedentes

La planificación hídrica utiliza diferentes fuentes de información para conocer la disponibilidad de agua en una región, tanto en cantidad como en calidad. Los sistemas de información geográfica (SIG) son utilizados ampliamente, durante la etapa de planificación, debido a que almacenan, procesan y proporcionan datos empleados en estudios y modelos hidrológicos.

En la última década han surgido nuevas tecnologías para almacenar la información espacial y temporal asociada con el recurso hídrico dentro de una plataforma de sistemas de información geográfica. Una de estas tecnologías es la base de datos geográficos con estructura del modelo ArcHydro, que se define como una base de datos relacional que almacena información espacial y datos alfanuméricos con una estructura estándar. Este modelo, en su componente de agua superficial, se encuentra diseñado para almacenar información hidrológica superficial, como ríos, cuerpos de agua, estaciones de monitoreo, cuencas, presas, aprovechamientos superficiales, entre otros temas, e implementa un esquema que genera relaciones específicas y topológicas entre estos elementos.

Desde los años noventa, en la Universidad de Texas, en Austin, se inició el diseño, desarrollo e implementación de este tipo de modelos de datos, enfocados al manejo integral de información espacial y temporal relacionadas con el recurso hídrico en cuencas hidrológicas. Este tipo de esquemas han sido replicados en varios proyectos en México y Estados Unidos, estableciéndose como una

herramienta útil y fundamental para el manejo del agua en cuencas transfronterizas.

En este proyecto se muestra la metodología empleada para aplicar el modelo ArcHydro en su componente de agua superficial. El modelo se ha implementado en la región hidrológica binacional conocida como número 24 río Bravo en el lado mexicano, y número 13 en el lado estadounidense, utilizando cartografía digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), del lado mexicano, a escala 1:50,000 y series de tiempo que incluyen datos de precipitación, evaporación, gastos medios mensuales y datos de almacenamiento, ingresos y extracciones en presas. La información hidrológica de la cuenca binacional en la porción ubicada en Estados Unidos fue recopilada de instituciones oficiales como el United States Geological Survey (USGS) y la Environmental Protection Agency (EPA), entre otros, con la resolución más reciente.

Otro tópico de suma importancia en el proyecto es la inclusión de la información relacionada con el cambio climático, fenómeno que ha cobrado gran importancia durante las últimas décadas, motivando la preocupación mundial para hacer frente a este fenómeno. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), la variabilidad futura del clima afectará el ciclo hidrológico y, como consecuencia, se verá comprometida la disponibilidad, el uso y la gestión del agua. Los incrementos en la temperatura propiciarán variaciones en los niveles de precipitación, así como una modificación en su distribución espacial y temporal, aunado a una mayor evaporación. Sin embargo, para su análisis se requiere contar con los escenarios climáticos regionalizados, mismos que serán generados e incluidos en el modelo de datos para la zona de estudio.

## Zona de estudio

La cuenca binacional del río Bravo es una de las más extensas de Norteamérica, abarca un total de ocho estados, tres de EE. UU.: Colorado, Nuevo México y Texas. Y cinco de México: Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y una pequeña parte de Durango (figura 1). En la parte de México el río es llamado Bravo y en Estados Unidos se denomina río Grande. Cuenta con alrededor de 548,600 km<sup>2</sup> (325,000 km<sup>2</sup> de EE. UU. y 223,600 km<sup>2</sup> de México), (Wolf, 1999), y sirve de frontera entre estos dos países en una longitud de 2,001 km (Aparicio, Ortega, Hidalgo y Aldama, 2009). Esta cuenca comparte su recurso hídrico con el país vecino, por lo que la parte mexicana de la cuenca tiene comprometidos ciertos volúme-



Figura 1. Cuenca río Bravo.

nes de escurrimiento por un común acuerdo en el tratado de aguas de 1944 entre ambos países. Cumplir con este tratado, con respecto a los volúmenes de agua previstos, se ha vuelto más complicado en las últimas décadas por las sequías que afectaron a la cuenca (CILA, 1995). Los tributarios principales del río Bravo son los ríos: Conchos, arroyo las Vacas, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y San Juan. Dentro de la región hay una variedad de climas; un 20% del territorio es semi-seco, un 34% es seco, 37% muy seco y el 9% restante tiene diferentes tipos de clima. La temperatura media anual dominante en el 50% de cuenca es de 26 ° C. La precipitación media anual es de 480 milímetros. El escurrimiento medio anual de agua superficial se estima en 9,970 hectómetros cúbicos<sup>1</sup> (hm<sup>3</sup>)/año. El volumen de agua para recarga de acuíferos se estima en 6.18 hm<sup>3</sup>/año. Los principales usos de suelo son: vegetación natural tipo matorral xerófilo (56%), pastizal natural (15%), bosques (10%), pastizal inducido (9%), agricultura de riego y temporal (5%) y el restante (5%) tiene usos variados (CONAGUA, 2012).

<sup>1</sup> 1 hm<sup>3</sup> = 1 000 000 m<sup>3</sup> (un millón de metros cúbicos).

## Metodología

El principal reto para el desarrollo de un modelo de datos relacionales a nivel de cuenca hidrológica se localiza en la disponibilidad de información confiable y en una organización estándar, para generar la información necesaria para el modelo hidrológico y de gestión que se pretenda utilizar. El Centro de Investigación de Recursos Hidráulicos (CRWR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas, Austin, desarrolló un modelo de datos georreferenciados que propone una estructura estándar para el almacenamiento de información temporal y espacial basada en un sistema de información geográfica llamado ArcHydro (Maidment, 2002). Este modelo se encuentra diseñado para la compilación de información hidrológica como ríos, cuerpos de agua, estaciones de monitoreo, etcétera, e implementa un esquema que genera relaciones específicas y topológicas entre los elementos espaciales y temporales (figura 2).

Uno de los primeros pasos para hacer más eficiente la forma en que se maneja el recurso hídrico en ambos lados de la frontera entre México – Estados Unidos consiste en crear una base de datos geoespacial en formato estándar utilizando el modelo de datos ArcHydro, el cual incluye información hidrológica, geográfica y temporal de la cuenca, escala 1:50,000 en el lado mexicano y 1:24,000 en Estados Unidos, que podrá ser desplegada en el formato utilizado por los SIG para su consulta y extracción de información. Dicha información sirve de sustento, por ejemplo, para el cálculo de la disponibilidad de agua y su distribución bajo diferentes escenarios climáticos y de desarrollo, así como en la definición de planes de manejo del agua en el futuro.

La base de datos estará disponible para la CONAGUA e instituciones encargadas del manejo del recurso hídrico en la cuenca, incluyendo gobiernos de los estados y municipales, así como usuarios del agua en la zona.

## Recopilación de información geográfica y temporal de ambos países

### México

La información geográfica de la cuenca del río Bravo en el lado mexicano está disponible en escala 1:50,000 que es la que se utiliza en la CONAGUA y el INEGI. La información original está disponible en formato *shapefiles* con el sistema de proyección Lambert Conformal Conic con el datum ITRF\_1992 para la información vectorial y formato *raster* o malla para el Modelo Digital de Elevación (MDE).

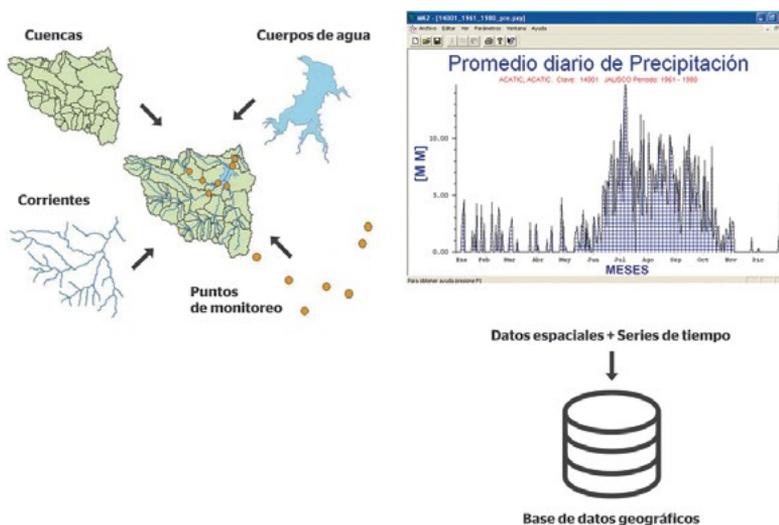


Figura 2. Integración de información geográfica en ArcHydro (Maidment, 2002).

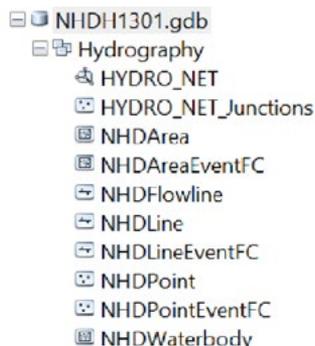


Figura 3. Información geográfica en formato original del usgs.

### Estados Unidos

La información geográfica en el lado norteamericano está disponible a una escala de mejor resolución que la del lado mexicano, siendo reportada por el United States Geological Survey (USGS). Esta información se encuentra en coordenadas geográficas y utiliza el datum NAD83 (Esferoide GRS80). La información original aparece como *feature datasets* dentro de una geodatabase para la información vectorial y formato raster para los modelos digitales de elevación (figura 3).

## Hidrografía de ambos países (cuerpos de agua y sistema de ríos)

La información hidrográfica (ríos y cuerpos de agua) en el lado mexicano contiene información actualizada equivalente a aquella de la carta topográfica en su edición tradicional producida por el INEGI (formato en papel). Estos datos fueron obtenidos en formato .shp y son utilizados para la creación de la red hidrográfica dentro del modelo de datos con la estructura ArcHydro (figura 4). Del lado de Estados Unidos, la información hidrográfica se encuentra en un *feature class* en su formato original, que son compatibles con el modelo de datos ArcHydro al estar incluido dentro de una geodatabase relacional (figura 5).

En la figura 6 se muestra la hidrografía binacional para la cuenca del río Bravo.

## Estaciones hidrométricas de la cuenca binacional

Las 64 estaciones hidrométricas ubicadas en el río Bravo del lado mexicano fueron obtenidas de la CONAGUA, que se encuentran incluidas en la base de datos del *software* BANDAS (figura 7). En Estados Unidos se encontraron 226 estaciones hidrométricas las cuales fueron obtenidas del United States Geological Survey (USGS). Estas estaciones forman parte de los Feature Class denominada MonitoringPoint en el modelo de datos ArcHydro, las cuales serán utilizadas como puntos de control para calcular el área de drenaje y la redefinición de subcuencas (figura 8).

En la figura 9 se muestran las estaciones hidrométricas para la cuenca binacional, que son utilizadas para la calibración del modelo hidrológico. En la tabla 1 se incluye un resumen de la información geográfica e histórica relacionada con la hidrología de la cuenca, así como información complementaria de estados, población, áreas con geoestadística básica (AGEB), zonas urbanas, rurales, presas, bordos, puntos de monitoreo de calidad de agua, cambio climático, etcétera. Se describen las respectivas instituciones que generan la información, por ejemplo: CONABIO, SEMARNAT, INEGI, INECC, CILA para México y USGS, EPA, NOAA, IBWC, para los Estados Unidos.



Figura 4. Información hidrográfica en el lado mexicano en formato original del INEGI.



Figura 5. Información hidrográfica en formato original del usgs.



Figura 6. Información hidrográfica binacional.



Figura 7. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Bravo.



Figura 8. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Bravo.

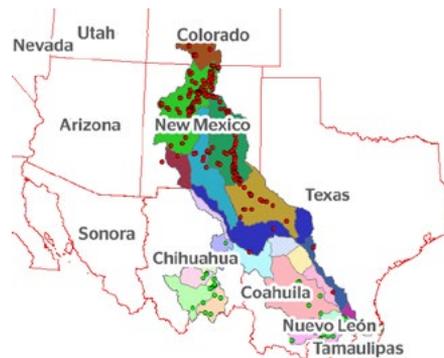


Figura 9. Estaciones hidrométricas en la cuenca binacional.

Nombre		Tipo de archivo	Tipo de información	Version	Observaciones
Carpeta	Sub Carpeta				
Ageb	shps	.shp	Área de geoestadística básica	2010	Fuente: INEGI
anp_02_shp	n/a	.shp	Áreas naturales protegidas	2002	Fuente: SEMARNAT
anp_03_shp	n/a	.shp	Áreas naturales protegidas	2003	Fuente: SEMARNAT
Colonias	Colonias	.shp	Colonias de todo el país	-	
cpo_agua_shp	n/a	.shp	Cuerpos de agua el país	-	Fuente: SEMARNAT
Desastres_shp	n/a	.shp	Mapas de desastres	-	Fuente: SEMARNAT
Distritos Geolectorales	Distritos Geolectorales	.shp	datos económicos para estudio electoral-socioeconómico-georeferenciado	-	
	dtto_riego_shp	n/a	Distritos de riego	-	Fuente: SEMARNAT
Estados	n/a	.shp	Estado de la república mexicana		
esthidgw1	n/a	.shp	Estaciones hidrométricas	2002	Fuente: CONABIO / Coordenadas geográficas Wgs84
esthidgw2_c	n/a	.shp	Estaciones hidrométricas	2002	Fuente: CONABIO / Proyección cónica conforme a Lambert Wgs84
marco_geoestadistico_5.0.A	mapa_digital_5.0.A	.shp	2010 / comunicación y transportes / cultura / hidrografía / infraestructura / territorio insular /	2010	Fuente: INEGI
Municipios	Municipios	.shp	Municipios de la república mexicana	-	
quemass_shp	n/a	.shp	Calendario de quemass	-	Fuente: SEMARNAT
reghidroadm_shp	n/a	.shp	Regiones Hidrológico administrativas	2002	Fuente: SEMARNAT
rios_4m_shp	n/a	.shp	Ríos principales de México	1999	
CC	Futuro Cercano	.shp	Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 hasta el año 2039	2015	Fuente: INECC / Información separada: precipitación, tem. Máxima, tem. Mínima, tem. Promedio
CC	Futuro Lejano	.shp	Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 hasta el año 2039	2015	Fuente: INECC / Información separada: precipitación, tem. Máxima, tem. Mínima, tem. Promedio
Paso del norte	USGS_stations	.shp	Estaciones hidrométricas	2004	Dataset/contiene las estaciones de control y monitoreo por la USGS
Paso del norte	IBWC	.shp	Estaciones IBWC	2005	Shapefile/contiene las estaciones de calidad del agua y condiciones de flujo en el Río Grande
Paso del norte	HUCS	.shp	Unidades hidrológicas	2004	Dataset/consiste en polígonos que representan las unidades hidrológicas en la región fronteriza del Río Grande
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Elevaciones cuenca Río Grande	2006	Elevación divididas en 4 unidades
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Caudal y dirección de Caudal	2006	Divididos en 4 secciones de la región 13 Río Grande
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Hidrografía	2006/2007	Dataset
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Unidades hidrológicas	2006	Watershed, basin, subregion, subbasin, region
USGS	NHDH1301-09	.gbd	Subregiones de la cuenca Río Grande	2014-2015	Nueve secciones de la región 13 Río Grande GIS
USGS	NHDH1309flow	.gbd	Caudal sección 9	2014-2015	Flow sección 9 Río Grande
	-				Contiene los polígonos utilizados en HydroDesktop con todos los

Tabla 1. Concentrado de la información recopilada en la cuenca binacional.

## Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Se obtuvo el Modelo Digital de Elevación (MDE) a nivel nacional producido por el INEGI cuyos parámetros de proyección son:

- WGS\_1984\_Lambert\_Conformal\_Conic
- Authority: Custom
- Projection: Lambert\_Conformal\_Conic
- False\_Easting: 2500000.0
- False\_Northing: 0.0
- Central\_Meridian: -102.0
- Standard\_Parallel\_1: 17.5
- Standard\_Parallel\_2: 29.5
- Latitude\_Of\_Origin: 12.0

Posteriormente se llevó a cabo el recorte del MDE a nivel nacional para la cuenca del río Bravo (figura 10).

## Creación de la geodatabase binacional

Una geodatabase es un modelo de datos orientado a objetos, el *software* utilizado es ArcGIS, para crear modelos de datos que proveen un marco estandarizado en el cual varios tipos de datos pueden ser relacionados. Este modelo da las características *features* al Sistema de Información Geográfica. En este proyecto se incluye toda la información disponible dentro de la *Geodatabase*, la cual estará soportada por el software antes mencionado. Se dividirá la cuenca en subcuencas para facilitar la aplicación de las herramientas ArcHydro; ya que por las limitaciones del *software* y del equipo a emplear no es posible el procesamiento de los modelos digitales de elevación (MDE) que incluyan toda la cuenca binacional.

## Preprocesamiento de información vectorial

Se analizó información vectorial original a una escala 1:50,000 del lado mexicano, ya que en su versión original con proyección Lambert Conformal Conic con el datum ITRF\_1992 se encuentra como formato *Shapefile*. Se procesó dicha información manteniendo la proyección original mencionada, pero incorporada como clases de entidades dentro de la *geodatabase* que define el modelo de datos. Se recortó la información correspondiente a la cuenca del río Bravo y se colocó en el *dataset* de entidades nombrado Preprocessing.

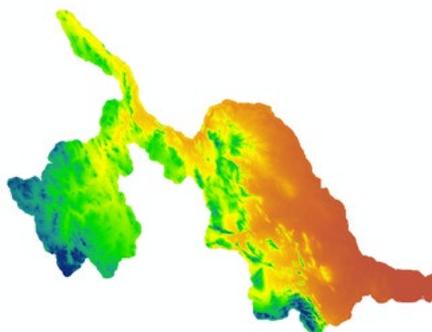


Figura 10. Modelo digital de elevación para la cuenca del río Bravo.

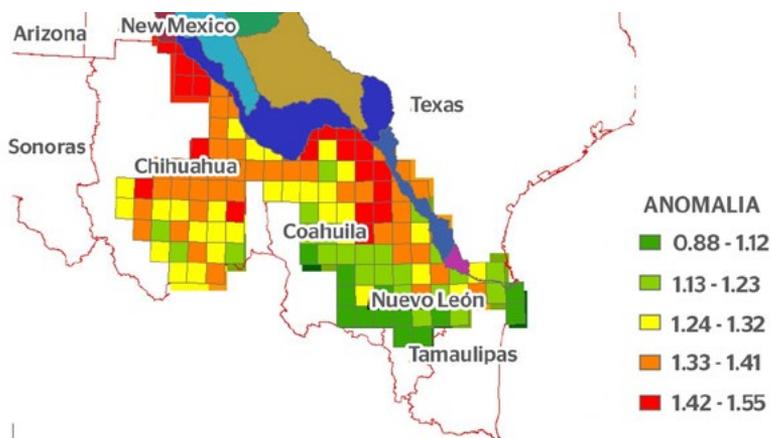


Figura 11. Anomalía de temperatura media al 2030 bajo el escenario climático A2.

## Implementación del modelo de datos ArcHydro en la cuenca del río Bravo

El objetivo de este proceso es la creación de un modelo de datos georreferenciado de la cuenca binacional del río Bravo con datos geográficos e información histórica (series de tiempo) y documental, utilizando el modelo ArcHydro. Este modelo de datos comprende características geométricas que incluyen la cuenca, corrientes, cuerpos de agua, estados, municipios, presas, AGEB, estaciones hidrométricas y climáticas, etcétera. Estos datos son archivos .shp y coverages, los cuales son guardados en una geodatabase relacional.

## Elaboración de los escenarios climáticos para la cuenca del río Bravo

Como parte del desarrollo del modelo de datos, se generaron los escenarios climáticos dentro de la *geodatabase* a partir de la información producida por el IMTA en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático en 2010. En la figura 11 se muestra el escenario de cambio climático de temperatura en 2030, bajo el escenario SRES A2.

## Conclusiones

Como parte del proyecto se completó el desarrollo del modelo de datos ArcHydro para la cuenca binacional del río Bravo. Se recopiló información geográfica, documental e histórica de la cuenca binacional. La información geográfica está disponible en formato *.shp*, y la información documental se encontró en diferentes formatos (*.pdf*, *.docx*, *.xlsx*, etcétera). Del lado mexicano la información histórica (series históricas de datos climatológicos e hidrológicos) para la cuenca fueron tomadas del sistema de información BANDAS y del sistema meteorológico nacional, mientras que para Estados Unidos se obtuvieron del CUAUHSI ArcHydro Desktop. La información histórica de lado de México se obtuvo en archivos *.mdb* (MS Access) y se tuvo que importar a archivos *.xlsx* (MS Excel) para, posteriormente, generar un archivo en formato de texto con cuatro columnas como lo establece el modelo de datos ArcHydro. Se dio formato ArcHydro a la información temporal recopilada con el propósito de incluirla y relacionarla con los puntos de monitoreo identificados en la cuenca de estudio.

## Referencias

- Aparicio, J., Ortega, E., Hidalgo, J. y Aldama, A. (2009). *Recursos hídricos en la frontera norte*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CILA. (1995). *Acta 293: Medidas emergentes de cooperación para abastecer las necesidades municipales de las poblaciones mexicanas ubicadas a lo largo del río Bravo aguas debajo de la presa Amistad*. México: Comisión Internacional de Límites y Aguas.
- CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico Administrativa vi Río Bravo. México: Comisión Nacional del Agua.
- IPCC. (2007). IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Suiza: Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Maidment, R. D. (2002). *ArchHydro gis for Water Resources*. Redlands: Esri Press.
- Martínez, P. F. y Patiño, C. (Eds.) (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, imta.
- Wolf, A. T. (1999). International River Basins of the World. *International Journal of Water Resources Development*, 387–427.