

Sistema de información de obras de protección contra inundaciones en la cuenca del río Papaloapan, México

Jaime Velázquez Álvarez., Usiel Martínez Torres, Ana Iris Salgado Paredes, Jaime Rivera Benites, Jorge Enrique Brena Zepeda, Cervando Castillo Romano y Marco Antonio Salas Salinas

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Planeación hídrica

Paseo Cuauhnáhuac 8532 Col. Progreso, Jiutepec, Morelos C.P. 62550

1. Introducción

La cuenca del río Papaloapan se localiza en la parte sureste de la República Mexicana y comprende de manera parcial los estados de Veracruz, Oaxaca y Puebla, como se observa en la ilustración 1; el área de la cuenca, de acuerdo al estudio de (Salgado et. Al., 2008), es de 47,168 Km². Esta cuenca ha sido afectada por varios fenómenos meteorológicos extremos en los últimos años que han causado graves daños a la infraestructura, y pérdidas humanas y económicas importantes. Particularmente, durante los meses de agosto a octubre de 2010 se presentaron fuertes inundaciones en la parte baja de la cuenca, ocasionadas por la presencia del huracán Karl y de la tormenta tropical Matthew. El desbordamiento del río Papaloapan afectó a diversas localidades y aproximadamente a 48 municipios. En fechas posteriores al evento, se elaboraron proyectos ejecutivos para la reparación de obras de protección existentes que resultaron afectadas y la construcción de obras nuevas en las localidades que lo requerían.



Ilustración 1. Ubicación de la cuenca del río Papaloapan en la República Mexicana

La elaboración de los proyectos ejecutivos implicó realizar diversos estudios para cada obra, entre ellos el de geotecnia, topografía e hidráulica fluvial, por mencionar algunos; una vez concluidos los proyectos se procedió a su realización. El gran volumen de datos generado en los estudios planteó la necesidad de contar con un sistema de información para la consulta de la información documental y geográfica asociada al proyecto ejecutivo de cada obra de protección. El sistema debería ser de fácil acceso, contar con un banco de datos centralizado, y permitir conocer la ubicación de las obras y la situación actual de las mismas.

En este trabajo se presenta una aplicación Web desarrollada para visualizar la ubicación de obras de protección en la cuenca y consultar información documental resultante de visitas técnicas y estudios de topografía, geotecnia y otros tipos. La aplicación se compone de una base de datos geográfica de tipo corporativo, implementada con la estructura del modelo de datos ArcHydro de aguas superficiales en versión completa, y de una interfaz para consulta de la información geográfica y documental, la cual fue implementada con la API de Javascript de ArcGIS server, HTML y otras herramientas. La aplicación es útil para conocer la situación actual

de las obras y sirve de apoyo al planear la reparación de ellas o la construcción de obras nuevas.

2. Objetivos

Los objetivos planteados en la realización de este trabajo fueron los siguientes:

- Diseñar e implementar una base de datos geográfica con la estructura del modelo de datos ArcHydro de aguas superficiales y con los elementos necesarios para almacenar la información espacial y documental asociada a las obras de protección contra inundaciones
- Diseñar e implementar una interfaz de usuario para la consulta de la información geográfica y documental asociada a las obras de protección

3. Metodología

3.1 Descripción del modelo de datos ArcHydro

En el contexto de la tecnología de bases de datos, un modelo de datos es una representación simplificada, elaborada mediante un diagrama, de los principales elementos de información asociados a un tema de interés. En el diagrama del modelo se indican para cada elemento los atributos principales que lo describen, el tipo de dato de cada atributo y las relaciones que existen entre los elementos, entre otras cosas.

Particularmente, un modelo de datos geográfico es un modelo que permite representar los elementos espaciales asociados a un tema dado. En este modelo, además de indicar los atributos que describen al elemento, se debe de indicar (en el caso de información vectorial) el tipo de geometría con el será representado dentro de la base de datos: punto, línea o polígono.

El modelo de datos ArcHydro es un modelo de datos geográfico que permite integrar en una base de datos geográfica la información relacionada con los recursos hídricos de un área de estudio. Este modelo propone una estructura para almacenar la información espacial y las series de tiempo de elementos asociados con la disponibilidad, demanda o calidad del agua.

El modelo fue desarrollado por el Centro de Investigación en recursos hídricos de la Universidad de Texas en Austin; el modelo se creó inicialmente para aguas superficiales (Maidment, 2002) y posteriormente se desarrolló para las componentes de agua subterránea (Strassberg, 2005) y calidad del agua (Patiño et. Al.,2006).

El desarrollo del modelo de aguas superficiales se basó principalmente en tres conceptos: red geométrica, base de datos espacial (geodatabase) y modelación orientada a objetos. Estos conceptos se describen a continuación.

A) Red geométrica

El software ArcGIS, que es el que se usa para implementar el modelo ArcHydro, proporciona una estructura de datos denominada red geométrica con la cual se pueden modelar redes de flujo como redes eléctricas, redes de agua potable, etc. Una red geométrica contiene entre otras cosas las coordenadas de las líneas y puntos que componen la red, así como información acerca de la forma en que dichos elementos están conectados (topología). En el modelo ArcHydro la red hidrográfica se modela como una red geométrica, lo cual permite conocer la trayectoria del flujo del agua y puntos de interés para el análisis del sistema hidrológico; la ilustración 2 muestra gráficamente este concepto.

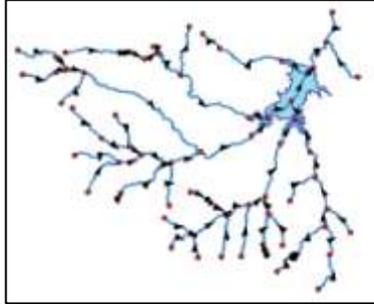


Ilustración 2. Modelación de una red hidrográfica mediante una red geométrica

El concepto de red geométrica se basa en el concepto matemático de grafo o gráfica (en inglés "graph"). Un grafo, denotado como $G = (V,E)$, se compone de un conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ y un conjunto de aristas $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ donde cada arista puede unir dos vértices $\{e_i, e_k\}$, siendo i diferente de k . Un grafo dirigido (digraph) es aquél cuyas aristas tienen asignada una dirección. Un grafo acíclico es aquél que no tiene ciclos. Un grafo planar es aquél donde las aristas no se intersectan. La ilustración 3 muestra un ejemplo de este tipo de grafo con 6 vértices y 6 aristas.

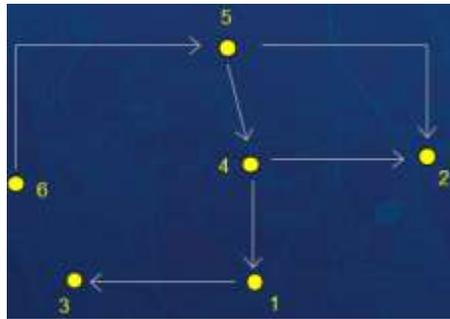


Ilustración 3. Ejemplo de un grafo dirigido, acíclico y planar

Algunos sistemas de redes relacionados con los recursos hídricos, (ríos, agua potable, drenaje) pueden ser modelados a través de un grafo. Particularmente, una red de ríos puede modelarse con un grafo planar, acíclico y dirigido, el cual se implementa con una red geométrica dentro del software ArcGIS Desktop, ya sea en nivel ArcEditor o ArcInfo; el nivel ArcView no permite la creación de redes geométricas.

En virtud de lo expuesto anteriormente, lo primero que hay que realizar para la implementación de la red es editar la red hidrográfica para que ésta quede totalmente conectada, sin ciclos y con dirección de flujo asignada. La red hidrográfica que se consideró para el proyecto fue la publicada por el INEGI a escalas 1:50,000 y 1:250,000. Sin embargo, actualmente la hidrografía a escala 1:250,000 es la que está totalmente conectada, sin ciclos y con dirección de flujo correcta para todo el país, lo cual fue el resultado de un trabajo conjunto realizado por el INEGI y la CONAGUA.

B) Base de datos geográfica

Los datos usados en los estudios o modelos de recursos hídricos básicamente se pueden dividir en dos grupos:

Datos geoespaciales.- Mapas digitales que representan rasgos de la superficie terrestre que se relacionan con el recurso hídrico como ríos, límites de cuencas y regiones hidrológicas, ubicación de estaciones climatológicas, hidrométricas y de calidad del agua, división estatal y municipal, ubicación de localidades, etc.

Series de tiempo.- Datos históricos que representan mediciones de variables relacionadas con la oferta, demanda o calidad del recurso agua como son: precipitación, evaporación, volúmenes usados en la agricultura o generación de energía eléctrica, volúmenes aforados en un río (gasto medio diario), datos demográficos, demanda bioquímica de oxígeno, etc.

Usualmente, los datos geoespaciales se almacenan en archivos en formato shape, dxf o coberturas de ArcInfo, entre otros, y las series de tiempo en hojas de cálculo, archivos de texto o archivos dbf. Por otro lado, normalmente la información geoespacial se almacena en forma separada de las series de tiempo.

La variedad de formatos, así como la separación entre datos espaciales y series de tiempo, puede originar problemas de consistencia, nomenclatura o representación. Otro problema que se presenta a veces es que la información geográfica no se despliega correctamente ya que se desconocen los parámetros cartográficos en los que se encuentra.

Una tecnología informática que permite resolver la problemática mencionada son las bases de datos espaciales o geográficas (también denominadas geobases), las cuales permiten almacenar ambos tipos de información dentro de una base de datos relacional. Actualmente, el software ArcGIS permite la implementación de tres tipos de geobases:

- Personal.- Es una base de datos monousuario que se implementa en Access; su tamaño está limitado a 4 Gb.
- File geodatabase.- Es también una base de datos monousuario pero que se crea con una estructura de archivos definida por la empresa ESRI, la cual desarrolló el software ArcGIS. En este caso, el tamaño de la geobase está limitado por el tamaño del disco duro del equipo que se utilice.
- Corporativa.- Es una base de datos multiusuario que se implementa usando un sistema administrador de base de datos cliente / servidor como SQL Server u Oracle.

C) Modelación orientada a objetos

Un objeto es una entidad del mundo real o una entidad abstracta que tiene propiedades y métodos. Las propiedades describen características del objeto de interés para el modelador; los métodos describen su comportamiento. El término clase denota un conjunto de objetos que tienen atributos y métodos bien definidos y similares. Una clase es como el “molde” a partir del cual se pueden crear objetos con características similares.

La ingeniería de software así como la modelación orientadas a objetos han sido aplicadas con éxito para el diseño e implementación de sistemas desde hace más de una década. En el desarrollo del modelo ArcHydro se aplicó esta tecnología.

El software ArcGIS define conjunto de clases genéricas para el manejo de la información geográfica; este conjunto de objetos se denomina ArcObjects. Hay tres tipos de clases de ArcObjects:

Object.- Es una clase genérica que se usa para crear objetos que tienen atributos y no tienen coordenadas. Un ejemplo es una serie de datos históricos (serie de tiempo). Un conjunto de objetos de tipo Object se denomina Object class. En la implementación, un objeto object class viene a ser una tabla relacional donde cada registro representa un objeto de la clase Object.

Feature.- Es una clase que permite crear objetos que tienen atributos y coordenadas, las cuales especifican su posición sobre la superficie terrestre. Estos objetos se usan para representar, como elementos geométricos (puntos, líneas o polígonos), rasgos sobre la tierra que son de interés para la modelación. Un conjunto de objetos feature que tienen los mismos atributos y son del mismo tipo de geometría se denomina feature class. En la implementación, un conjunto de objetos feature se almacena como una tabla relacional, donde cada registro representa un objeto feature del conjunto.

Network feature.- Es una clase para crear objetos que representan elementos de una red geométrica. Estos elementos son líneas y puntos, las cuales se denominan EdgeFeature (aristas) y JunctionFeature (uniones).

Las clases ArcObjects están arregladas en una jerarquía la cual se representa en un diagrama elaborado con el lenguaje unificado de modelación (UML), un lenguaje estándar desarrollado en la industria del software y adoptado por la empresa ESRI.

En la implementación del modelo ArcHydro se definieron un conjunto de clases a partir de las clases de ArcObjects. La diferencia entre ellas es que las clases de ArcHydro tienen atributos adicionales que permiten modelar mejor los sistemas hidrológicos. En ArcHydro todas las características (features) se denominan HydroFeatures y tienen los siguientes atributos:

HydroID.- es un atributo de tipo entero que identifica de manera interna y única a un elemento dentro de la geobase.

HydroCode.- es un atributo de tipo texto que almacena la clave con la que se conoce públicamente, o de manera externa, a un elemento geográfico. Este campo almacena por ejemplo las claves de CLICOM o las del sistema BANDAS. Este campo permite establecer ligas o relaciones con sistemas de información externos para adquirir datos requeridos en estudios hidrológicos.

D) Versiones de modelo ArcHydro de aguas superficiales

El modelo ArcHydro de aguas superficiales fue implementado en dos versiones: una versión compacta o básica, denominada ArcHydro Framework y una versión completa. La versión compacta permite almacenar los datos geoespaciales más importantes que describen un sistema de recursos hídricos. Las 5 capas geográficas que incluye este modelo son las siguientes:

HydroEdge.- Es un conjunto de objetos geográficos de tipo línea, que representan la red de ríos, y líneas artificiales que atraviesan centralmente los cuerpos de agua. Son básicamente los segmentos de flujo.

HydroJunction.- Es un conjunto de objetos geográficos de tipo punto, que representan vértices o uniones ubicadas en los extremos de los segmentos de flujo, y posiciones estratégicas de la red de flujo. Los objetos HydroJunction e HydroEdge están conectados topológicamente y forman lo que se denomina una HydroNetwork, que es la red geométrica con la que se modela la red de ríos en el software ArcGIS.

Waterbody.- Son objetos geográficos de tipo polígono y representan lagos, bordos, y bahías en el sistema hidrológico.

Watershed.- Son objetos geográficos que representan las áreas de drenaje que contribuyen con escurrimiento desde la superficie terrestre hacia el sistema hidrológico. Se representan como polígonos también.

MonitoringPoint.- Son objetos geográficos de punto que representan sitios de aforo, estaciones climatológicas o puntos de monitoreo de calidad del agua.

Adicionalmente a las capas mencionadas anteriormente, el modelo básico permite incorporar series de tiempo mediante el uso de diferentes tablas dentro de la geobase.

El modelo ArcHydro en versión completa se compone de 4 conjuntos de capas. Estos conjuntos de capas, también denominados componentes, son los siguientes:

Network.- Contiene los elementos que se utilizan para crear una red geométrica y la red misma. De esta manera, en esta componente se encuentran una capa de líneas que contiene las líneas de corriente con las características que define ArcHydro (totalmente conectadas, sin ciclos y con dirección de flujo correcta), puntos de interés hidrológico sobre la red y la red geométrica creada con ambas capas.

Drenaje.- Contiene las áreas de drenaje obtenidas a partir de la topografía o de modelos digitales del terreno.

Canal.- Contiene la representación en 3 D de la forma de ríos y canales.

Hidrografía.- Contiene capas geográficas para representar elementos de la superficie terrestre que afectan el flujo del agua (por ejemplo presas y compuertas), propiedades del suelo que determinan su respuesta al escurrimiento, ubicación de estaciones hidrométricas, climatológicas y de calidad del agua, puntos de aportación o retiro del recurso, y cuerpos de agua, entre otros.

Al igual que en la versión básica, la versión completa de ArcHydro también contiene tablas para almacenar las series de tiempo.

3.2 Implementación del modelo de datos ArcHydro

En el presente proyecto se implementó la base de datos con la estructura del modelo ArcHydro en su versión completa, con el fin de tener mejor organizados los datos y brindar la flexibilidad para agregar más capas de interés en el futuro. El modelo se modificó para agregar la capa geográfica conteniendo las obras de protección contra inundaciones. Adicionalmente, se consideró almacenar información de contexto, como las capas de estados del país, municipios y localidades, entre otras.

Por otro lado, la base de datos espacial que se implementó fue de tipo corporativa, implementada con SQL Server 2008 y el software ArcGIS Desktop y ArcSDE, ambos en versión 10. Una parte de la información geográfica que se consideró para almacenar en la geobase se muestra en la tabla 1.

3.3 Información geográfica y documental asociadas a las obras de protección contra inundaciones en la cuenca e implementación de los elementos de la base de datos requeridos para almacenar esta información

Para la elaboración de este trabajo se obtuvieron los archivos conteniendo los estudios de los proyectos ejecutivos elaborados en el año 2011 para la reparación o construcción de obras de protección contra inundaciones. En total fueron 36 proyectos ejecutivos, cuya ubicación se muestra en la ilustración 4.

Tema	Fuente	Tema	Fuente
Acuíferos	CONAGUA	Modelo digital de elevación	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
Presas	CONAGUA	Edafología	INEGI (Serie I)
Humedales potenciales	INEGI y otras instituciones	Parteaguas	J. Brena et. al. IMTA
Subcuencas	CONAGUA	Hidrografía	Red hidrográfica digital de México, escala 1:250,000, 1ª versión, CONAGUA - INEGI
Cuerpos de agua	INEGI	Uso del suelo	J. Brena et. al. IMTA
Puntos de monitoreo, compuestos por estaciones hidrométricas, climatológicas y de calidad del agua	CONAGUA	Precipitación media anual	INEGI – escala 1:1,000,000
Uso del suelo	J. Brena et. al. IMTA	Ubicación de obras de protección contra inundaciones	CONAGUA

Tabla 1. Conjunto parcial de capas contenidas en la geobase de la cuenca, con la estructura del modelo ArcHydro de aguas superficiales

3.4 Información geográfica y documental asociadas a las obras de protección contra inundaciones en la cuenca e implementación de los elementos de la base de datos requeridos para almacenar esta información

Para la elaboración de este trabajo se obtuvieron los archivos conteniendo los estudios de los proyectos ejecutivos elaborados en el año 2011 para la reparación o construcción de obras de protección contra inundaciones. En total fueron 36 proyectos ejecutivos, cuya ubicación se muestra en la ilustración 4.

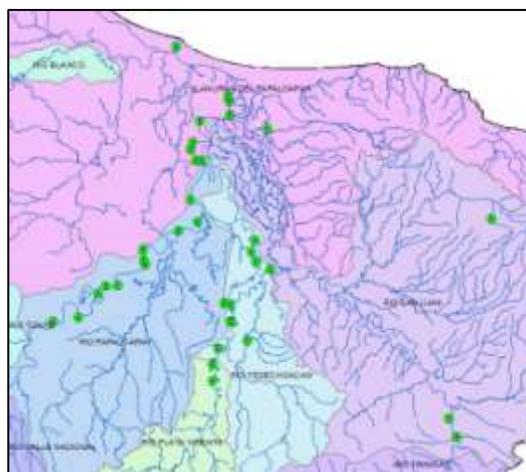


Ilustración 4. Ubicación de proyectos ejecutivos de obras de protección contra inundaciones en la cuenca

Los estudios que se realizaron para cada proyecto incluyeron estudios topográficos, de geotecnia, de hidráulica fluvial y de batimetría, entre otros. Cada estudio incluía diferentes archivos y el informe final. Como parte del análisis, inicialmente se procedió a obtener las coordenadas geográficas del proyecto, las cuales venían reportadas en el informe final. Posteriormente se visualizaron en el software ArcGIS Desktop y se verificó que las coordenadas fueron correctas o aproximadas, auxiliándose de la aplicación Google earth y con el conocimiento de campo de compañeros que colaboraron en el proyecto. En aquéllos casos donde había error en la ubicación se corrigió con el apoyo de las herramientas y personal mencionados.

Posteriormente, se procedió a revisar la información documental de cada proyecto para determinar los principales tipos de estudios y los subtipos en cada uno, esto con el fin de definir una jerarquía de temas y usar ésta para implementar la base de datos que almacenaría los documentos.

Los tipos principales de estudios que se identificaron fueron geotecnia, hidráulica, proyecto ejecutivo, topografía y trabajos de ingeniería. A su vez, se identificaron los subtipos de estudios en cada tipo.

También, para cada proyecto ejecutivo se identificaron los atributos que los describen y que se consideraron útiles para su consulta. Estos atributos fueron el nombre, coordenadas geográficas, longitud propuesta (en metros), material, costo estimado, empresa que lo realizó y fecha de elaboración.

Se obtuvo además un listado de los proyectos ejecutivos que sí fueron realizados y un conjunto de datos que los describían. De este listado se seleccionaron los siguientes atributos para almacenarlos en la base de datos:

- Fecha en que se inició la obra
- Fecha en que se terminó la obra
- Longitud realizada, en metros
- Porcentaje realizado de la obra con respecto a lo planteado en el proyecto ejecutivo
- Población beneficiada con la obra
- Procedencia de los recursos para la construcción

Para complementar la base de datos se hizo una revisión de las obras de protección incluidas en el Inventario nacional de obras de protección contra inundaciones en cauces naturales (INOPC). En este inventario se identificaron 16 obras: 12 protecciones marginales, 1 encausamiento y 3 presas de control de avenidas. La ilustración 5 muestra las obras de protección ubicadas en la cuenca de acuerdo al INOPC.



Ilustración 5. Ubicación de obras de protección contra inundaciones en la cuenca, de acuerdo al Inventario nacional de obras de protección contra inundaciones en cauces naturales.

Finalmente, en esta parte del trabajo se procedió a elaborar el diseño de los elementos en la base de datos geográfica que permitirían almacenar la información documental, la ubicación de obras y proyectos ejecutivos, información fotográfica y datos sobre los proyectos realizados.

El diseño consistió en elaborar un modelo de datos geográfico con el software Visio y las clases ArcObjects del software ArcGIS. Una vez terminado el modelo, se exportó a XML y se aplicó a la geobase que ya se tenía con la estructura ArcHydro, para crear las tablas adicionales donde se almacenarían los datos asociados a las obras de protección.

3.5 Diseño e implementación de la interfaz para consulta de las obras de protección contra inundaciones

En esta parte se diseñó la interfaz de usuario para la consulta de la información geográfica y documental asociada a las obras de protección. Dentro de la interfaz se consideró también la opción de descargar los documentos generados en los estudios.

Una vez diseñada, la interfaz fue implementada con las funciones que brinda la interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) del software ArcGIS server, HTML y otras herramientas propias para el desarrollo de aplicaciones web.

4. Resultados

La ilustración 6 muestra la ventana principal del sistema de información, en la cual se muestra al inicio una imagen satelital como fondo. A la izquierda del mapa se muestra el conjunto de capas geográficas que el usuario puede visualizar, estas capas incluyen las del modelo ArcHydro, capas de contexto y la capa de obras de protección.



Ilustración 6. Ventana principal del sistema de información mostrando la ubicación de las obras de protección existentes en la cuenca

El sistema permite consultar la información general de la obra, los datos de los proyectos ejecutivos realizados en ella, el material videográfico, datos de visitas de inspección y datos del avance en la realización de la obra. La ilustración 7 muestra la ventana de diálogo para la consulta de esta información.



Ilustración 7. Ventana de diálogo para consulta de datos generales de la obra, datos de los proyectos ejecutivos, documentos, material videográfico y datos de avance de la obra

Finalmente, el sistema da la opción al usuario de descargar los documentos de interés generados en los proyectos ejecutivos. La ilustración 8 muestra la ventana de diálogo disponible para esta opción.

5. Conclusiones y recomendaciones

El sistema de información presentado en este trabajo facilitará la consulta de las características de las obras de protección, los documentos generados en los proyectos ejecutivos asociados a ellas y la información recabada en visitas de inspección, incluyendo el material videográfico.



Ilustración 8. Ventana de diálogo para consulta y descarga de documentos asociados a los proyectos ejecutivos de la obra de protección

El hecho de que la información esté almacenada en una base de datos geográfica de tipo corporativo permite que la información esté centralizada y que cualquier cambio en la información sea visible para todos los usuarios. También, el hecho de que el sistema esté implementado como una aplicación web permite a los usuarios la consulta desde cualquier lugar sin requerir software adicional más que un explorador de internet.

El sistema no tiene actualmente la opción de agregar obras nuevas o modificar las ya existentes, por lo que es recomendable continuar este trabajo para incorporar esas opciones.

6. Referencias

MAIDMENT, D.R. *ArcHydro GIS for water resources*. Redlands, California, USA: ESRI Press, 2002, 203 pp.

PATIÑO, C., MCKINNEY D., AND MAIDMENT D.R. *Water Quality Data Model (WQDM) in GIS for the Rio Grande/Bravo Basin*. University of Texas at Austin, USA: Center for Research in Water Resources, 2006.

SALGADO, R.,J.H., et al. *Estudio de actualización de la disponibilidad media anual de las aguas superficiales de las cuencas hidrológicas del río Salado, río Grande, río Trinidad, río Valle Nacional, río Playa Vicente, río Santo Domingo, río Tonto, río Blanco, río San Juan, río Tesechoacán, río Papaloapan y Llanuras de Papaloapan, mismas que forman parte de la región hidrológica denominada Papaloapan*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe final, Tomo1, 2008, 118 pp.

STRASSBERG, G. *A geographic data model for groundwater systems*. Dissertation, Doctor of Philosophy, University of Texas at Austin, USA,. 2005.