

## **BASE DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS ENFOCADA AL MODELAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SAN JOSÉ DE CHIQUITOS. SANTA CRUZ, BOLIVIA**

Mónica Ximena Guzmán Rojo<sup>1</sup>; Fabiana Añez Melgar<sup>2</sup>  
Universidad Católica Boliviana "San Pablo". Km 9 Carretera Norte, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.  
(1) mguzman@ucbscz.edu.bo

### **Resumen**

La confiabilidad y validez de los estudios hidrogeológicos dependen en gran medida de la disponibilidad de un gran volumen de datos integrados en una estructura que permita construir los modelos, ejecutar simulaciones y que sea amigable con el usuario. Lo anterior, constituye la mejor herramienta para la toma de decisiones sobre manejo de aguas subterráneas.

Con esta meta se construyó en la región de San José de Chiquitos, Santa Cruz, Bolivia, la primera base de datos hidrogeológica, en un sistema de información geográfica (SIG) que integra la información topográfica, meteorológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica del municipio, y que cuenta con las condiciones para vincularse al software de modelación MODFLOW y realizar simulaciones numéricas de flujo subterráneo. A la fecha, la información del acuífero y del monitoreo que nutre la base de datos es limitada, sin embargo, su continua generación puede actualizarla y consecuentemente mejorar la simulación de diferentes escenarios de modelación que apoyen la toma de decisiones en el manejo de agua.

Este proyecto constituye la primera fase de la tesis doctoral de "Manejo sustentable del acuífero de San José de Chiquitos, Santa Cruz, Bolivia", que se desarrolla en el marco del proyecto "Contribución a la gestión integrada del agua en Bolivia", realizado por la Universidad Católica Boliviana, en coordinación con la Universidad Libre de Bruselas, Bélgica. La meta de esta investigación es desarrollar un modelo numérico en MODFLOW introduciendo elementos conceptuales y subrutinas que hagan fácil su ejecución por parte del usuario a través de ArcGIS.

**Palabras Claves:** Base de datos hidrogeológica, Gestión de aguas subterráneas, Sistemas de información geográfica.

### **Abstract**

The reliability and validity of hydrogeological studies depend mainly on the availability of a large volume of data integrated in a structure that allows the models to be built, simulations to run and be user friendly. The above is the best tool for decision making on groundwater management.

With this goal, the first hydrogeological data base was built in the region of San José de Chiquitos, Santa Cruz, Bolivia, in a geographic information system (GIS) that integrates the topographic, meteorological, hydrogeological and hydrogeochemical information of the municipality, and that has the conditions to be linked to the modeling software MODFLOW and perform numerical simulations of groundwater. To date, the aquifer and monitoring information that feeds the database is limited, however, its continuous generation can update it and consequently improve the simulation of different modeling scenarios that support decision making in water management.

This project constitutes the first phase of the doctoral thesis of "Sustainable management of the aquifer of San José de Chiquitos, Santa Cruz, Bolivia", which is developed within the framework of the "Contribution to integrated water management in Bolivia" project, carried out by the Bolivian Catholic University, in coordination with the Free University of Brussels, Belgium. The goal of this research is to develop a numerical model in MODFLOW by introducing conceptual elements and subroutines that make it easy for the user to execute through ArcGIS.

**Keywords:** Hydrogeological database, Groundwater management, Geographic information systems.

## **INTRODUCCIÓN**

Para sintetizar el conocimiento hidrogeológico disponible y analizar las alternativas de manejo de recursos hídricos se desarrollan modelos de simulación numérica. Los modelos son la mejor herramienta de gestión de los recursos hídricos, al aportar proyecciones que permiten probar planes de desarrollo e intervenir oportunamente para evitar situaciones que atenten contra la seguridad hídrica de una región. La confiabilidad y la validez de estos modelos hidrogeológicos dependen en gran medida de la disponibilidad de un gran volumen de datos de buena calidad (Constantin Gogu, Carabin, Hallet, Peters, & Dassargues, 2001) ya que, para su desarrollo, se requiere información de la geología, hidrología, geomorfología, suelos, clima, uso de suelo, topografía, así como de monitoreo de agua; información que no siempre está disponible, lo cual genera un retraso en su procesamiento y del estudio; o en algunos casos donde se inicia el procesado de la información adquirida, los hidrogeólogos se ven forzados a volver a iniciar este procesamiento a la luz de nueva información.

Acorde al estudio de Constantin, et al. (2001), la realización de trabajos con información hidrogeológica ha revelado la necesidad de una estructura avanzada que responda a: (1) El manejo de información, su procesado y análisis, así como la producción de mapas hidrogeológicos, (2) el desarrollo y calibración de modelos numéricos y (3) el brindar apoyo a autoridades en la toma de decisiones en torno a la gestión sustentable del agua.

Con este objetivo, se ha estructurado la primera Base de Datos Hidrogeológica (BDH) en SIG que integra información topográfica, meteorológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica, siguiendo lineamientos definidos por la estructura HYGES (Constantin, et al., 2001) y utilizando el software ArcGIS, para su futura aplicación para la gestión integrada del agua en San José de Chiquitos. Esta BDH es flexible ya que contiene subrutinas que la actualizan cada vez que se introduce nueva información y es de uso intuitivo lo que permite que el usuario final la utilice y actualice de acuerdo a sus requerimientos.

Este trabajo forma parte de la primera fase del proyecto "Manejo sustentable del acuífero de San José de Chiquitos (Santa Cruz, Bolivia)", en el marco del programa "Contribución a la gestión integrada del agua en Bolivia", ejecutado por la Universidad Católica Boliviana, Santa Cruz, Bolivia, en coordinación con la Universidad Libre de Bruselas, Bélgica. El proyecto está alineado con objetivos de empoderar al usuario final, para transferir estos modelos y asegurar que los resultados de las investigaciones sean traducidos en prácticas de manejo efectivas. Adicionalmente, el desarrollo de códigos y automatización de rutinas que permite reproducir resultados constituye una tendencia actual en el campo de la investigación de recursos hídricos. (Hutton, C., Wagener, T., Freer, J., Han, D., Duffy, C., & Arheimer, B, 2016).

La figura 1, reproduce la ubicación general del área de estudio, donde se muestra la Serranía de San José, el área prioritaria de estudio y la red de monitoreo definida para la presente investigación.

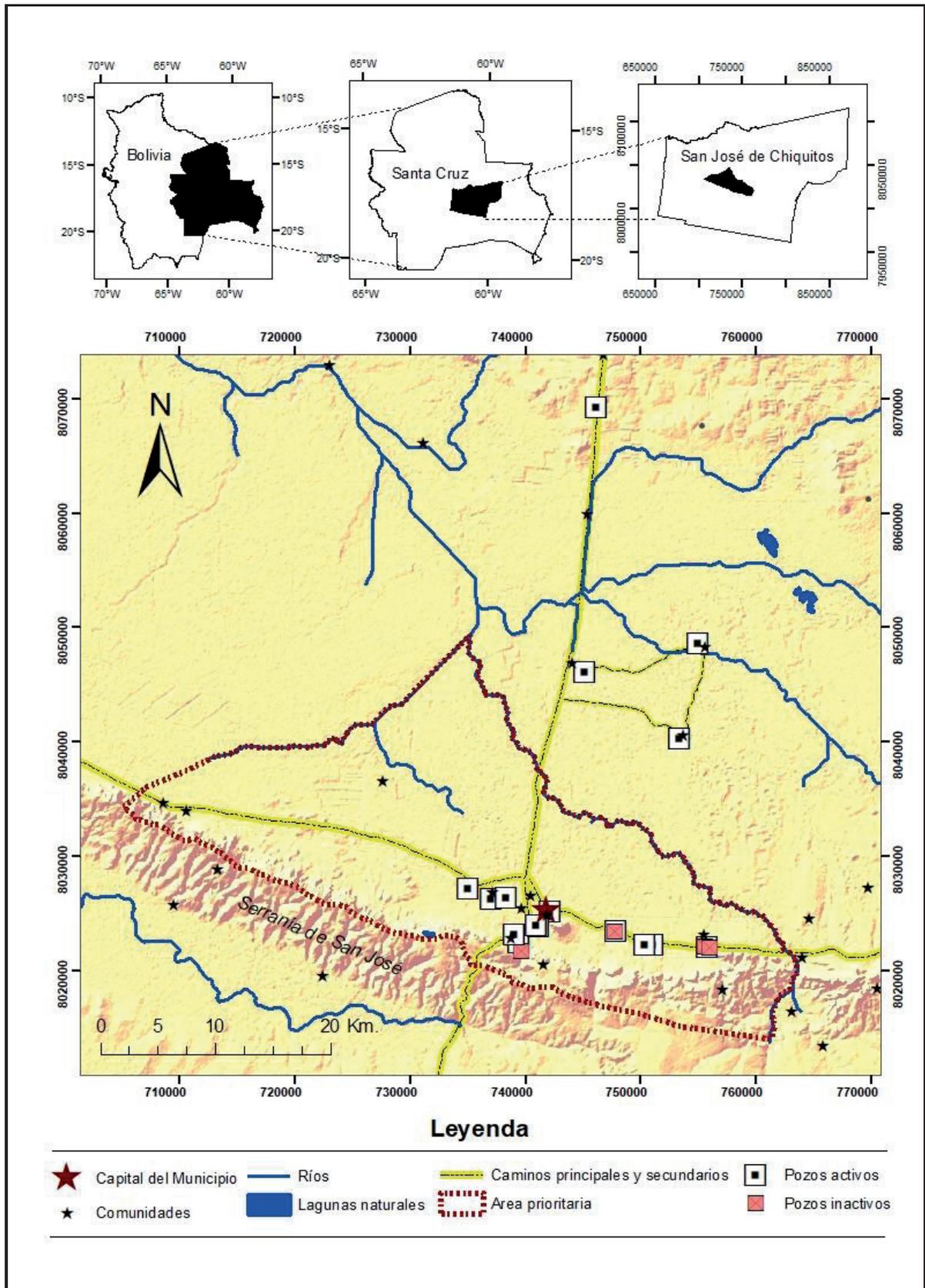


Figura 1. Ubicación general del área de estudio

## **DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO**

San José de Chiquitos (SJC), Municipio del departamento de Santa Cruz, Bolivia, cuenta con 36,912 habitantes, y está conformado por comunidades Indígenas Chiquitanas y campesinas (Gobierno Municipal de San José de Chiquitos, 2016). La población se abastece de agua a través del aprovechamiento de aguas superficiales. Sin embargo, el volumen es reducido y la estacionalidad de los cauces superficiales no garantiza el suministro de agua durante todo el año, lo cual ha generado la necesidad de aprovechar las aguas subterráneas. Como referencia de este problema, se ha declarado en un par de oportunidades una "alerta roja" provocada por la escasez de agua repentina en sus fuentes de agua, atribuido generalmente al fenómeno de El Niño (Tierra plus, 2015).

La región de SJC presenta un relieve llano con colinas altas (Figura 1), clima cálido con temperaturas extremas de hasta 39°C y una precipitación pluvial media anual de 993 milímetros. Los pozos perforados se localizan en sedimentos cuaternarios que sobreyacen a las rocas carbonatadas, ígneas and areniscas fracturadas, y producen bajos caudales de 0.2 a 6 litros por segundo (L/s), con profundidad del nivel estático de 5 a 25 metros (m) y niveles dinámicos de hasta 40 m. La información hidrogeológica en la zona es limitada y se encuentra dispersa ya que pertenece a distintas instituciones relacionadas con la temática.

Es muy probable que los efectos del cambio climático provoquen cambios en la precipitación, lo que, a su vez, reducirá la disponibilidad de agua superficial y el abastecimiento de agua al mediano plazo. Por lo anterior, la tendencia en el municipio es aprovechar el agua subterránea, sin embargo, una de las mayores limitantes para ello es que las características del acuífero en la zona son complejas y la información hidrogeológica limitada. Los gastos de los pozos perforados a la fecha, son insuficientes para atender los requerimientos agropecuarios y el uso público-urbano. Adicionalmente, varios presentan elevadas concentraciones de Sólidos Disueltos Totales, lo que limita aún más su aprovechamiento (Gobierno Municipal de San José de Chiquitos, 2016). Y no se cuenta con una red de monitoreo operativa.

## **METODOLOGÍA**

Con la meta de crear una versión digital del acuífero de SJC, a través de su forma y patrones geográficos, se elaboró la BDH, tomando en cuenta que la meta es el modelado de aguas subterráneas y por ende los datos a manejarse se deberán incluir en cuatro categorías: (1) factores de estrés del sistema acuífero, los cuales se traducen en condiciones de frontera o fuente/sumidero; (2) el sistema acuífero y su geometría, mapas y secciones transversales, topografía y mapas de contorno de los límites de los estratos; (3) los parámetros hidrogeológicos de los procesos simulados que incluye mapas con las variaciones espaciales; y (4) las variables principales con registros continuos, que son valores puntuales para distintos periodos de tiempo provenientes generalmente de una red de monitoreo (Constantin, et al., 2001)

Como primer paso se recabó la información hidrogeológica en la zona, y se procedió a implementar una red de monitoreo de aguas subterráneas para generar información básica. Para representar de forma óptima estos datos se realizó una evaluación de su tipología y su formato, ya que al provenir de distintas fuentes gubernamentales como no gubernamentales, difieren en calidad, cantidad, formatos y almacenamiento.

Los datos e información de la geomorfología, geología y condiciones hidrológicas se dividieron en dos grupos: datos primarios y datos secundarios. Los datos primarios contienen capas de información general (topografía, geología, suelos,) los cuales fueron sometidos a un pretratamiento menor. Los datos secundarios consisten de datos derivados de los primarios, como conductividad hidráulica, perfiles geológicos, los cuales deben actualizarse cada vez que se genera nueva información.

En base a esta clasificación y análisis, los datos fueron transferidos a un único sistema. La información aparentemente redundante, se diferenció en la base de datos para evitar pérdida de información, y se tomó en cuenta el continuo ingreso de información generada a través de la red de monitoreo. En cuanto a los formatos, los datos provenientes

de reportes en papel como: tablas, mapas, y perfiles, registros de campo como planillas electrónicas y datos ya almacenados en bases de datos, fueron analizados para crear una base de datos unificada, utilizando Arc/info con Access. Esta solución fue seleccionada luego de analizar las plataformas disponibles de software utilizadas por las instituciones locales especialmente el Gobierno Municipal de San José de Chiquitos y la Cooperativa de aguas COMAYO, y asegurar la compatibilidad de las futuras operaciones en el intercambio de datos.

## **RESULTADOS**

La composición de la base de datos se incluye en la tabla 1; donde se muestra que la información está dividida en varias capas; una o varias capas componen los distintos grupos de información. El número, nombre de cada capa, elementos representados, su formato o características geométricas, y otras características se encuentran descritas en la misma.

La topografía se procesó y se encuentra representada por medio de líneas de contorno, el mapa de geología superficial, suelos y uso de suelo; se representa a través de polígonos vinculados a atributos simples. Las secciones hidrogeológicas se presentan por líneas gracias a su vinculación a una herramienta CAD. La información de sobre monitoreo y ensayos puntuales de campo está clasificada en dos capas principales denominadas “Agua superficial” y “Agua subterránea”.

La capa denominada “Agua superficial”, contiene puntos que representan tomas de agua en ríos y muestras de calidad de agua, el esquema de atributos de esta capa contiene varias tablas: “agua superficial” es la tabla principal que une la relación “uno a uno” con la ubicación geográfica de puntos correspondientes en el SIG. El vínculo se ha realizado a través de un único número llamado “ID” en la parte superior de cada tabla. Asimismo, la relación “uno a uno” y “uno a varios” entre esta tabla y tablas derivadas fueron definidas usando el mismo identificador, estas tablas derivadas contienen por ejemplo las características de las secciones transversales de los ríos. La capa denominada “Agua Subterránea”, presenta un esquema de atributos más complejo; esta capa reagrupa los siguientes elementos: pozos municipales, pozos de monitoreo y otros.

Los datos que contienen la litología se encuentran en la tabla “Secciones geológicas”, cada estrato se describe en esta tabla con una relación “una a varias”. Información referente a pruebas realizadas en estas perforaciones son almacenadas en la tabla “Pruebas”. Los datos sobre características técnicas de los pozos se encuentran en la tabla diseño del pozo. Asimismo, la tabla secundaria denominada “Acuífero”, almacena información que describe la sucesión de estratos perforados por los pozos, el código del acuífero representa su condición hidráulica (libre o semiconfinado), en base a la posición de las rejillas de los pozos. La información sobre pruebas hidráulicas se almacenó en la tabla (características hidráulicas). Valores representativos de la conductividad hidráulica, transmisividad y porosidad.

Información que identifica la calidad de muestras de agua subterránea y describen los resultados son almacenadas en dos tablas: Muestras y Parámetros, ya que, para la muestra analizada, varios parámetros son determinados se estableció una relación “uno a varios”. El vínculo se realizó utilizando un único punto llamado ID Muestra. La tabla Muestras contiene el código de la muestra, la fecha, y el código del estrato. La tabla Parámetros contiene el nombre de cada parámetro, su valor, la fecha en la cual fue analizado, el tipo de análisis y el límite de detección, de igual manera que con los perfiles litológicos, con el apoyo de una herramienta CAD se grafican automáticamente diagramas de Stiff que muestran la evolución espacial del tipo de agua.

N°	Grupo de capas	Características representadas	Geometría	SMBD	Estructura y formato
1	Topografía	Elevación del terreno (ASTER) – líneas de contorno	Raster Línea	-	Info
2	Mapa geológico	Geología superficial	Polígono	-	Info
3	Mapa de suelos	Suelos	Polígono	-	Info
4	Mapa de uso de suelo	Uso de suelo	Polígono	-	Info
4	Agua superficial	Agua superficial (lagos)	Polígonos	Lago	Info+Access
5	Cuencas hidrológicas	Cuenca hidrológica	Polígono	Cuenca	Info+Access
6	Red hidrológica	Ríos, interacción con acuíferos	Línea	Río	Info+Access
7	Estaciones climáticas	Mediciones de estaciones climáticas	Punto	Clima	Info+Access
8	Agua subterránea	Mediciones de niveles hidrogeoquímica	Punto	Agua subterránea	Info+Access
9	Secciones geológicas	Perfiles litológicos	Línea	Litología	Info

Tabla 1. Capas de la base de datos hidrogeológica primaria. SMBD (Sistema de manejo de base de datos)

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se estructuró una base de datos hidrogeológica para San José de Chiquitos que permite realizar el mapeo automático, la verificación y la validación de datos hidrogeológicos a través de su representación gráfica en ArcGIS; así como la correlación de distintos parámetros con ayuda de los registros y parámetros estadísticos incluidos en este software.

Esta base de datos permite además la actualización de registros e incorporación de nueva información de forma fácil e intuitiva, lo cual es una necesidad cuanto se trabaja con datos generados continuamente a través de redes de monitoreo y, en el caso de nuestra región, con la adquisición continua de información de diversas instituciones, cada una de ellas con distintos tiempos de respuesta.

En una segunda etapa y a partir de esta base de datos, se pretende simular escenarios futuros a partir del vínculo de la base de datos hidrogeológica con MODFLOW y dos modelos adicionales que simulan diferentes partes de ciclo hidrológico; todo esto en una única herramienta, que será transferida a los actores locales para su aplicación procesos de toma de decisiones en torno a la gestión sustentable de recursos hídricos en San José de Chiquitos.

## REFERENCIAS

- Bolivia, T. P.** (2015). Santa Cruz: sequía agrava escasez de agua en San Jose de Chiquitos . Santa Cruz: sequía agrava escasez de agua en San Jose de Chiquitos , pág. 1.
- Constantin Gogu, R., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., & Dassargues, A.** (2001). GIS-based hydrogeologica databases and groundwater. *Hydrogeology Journal*.
- Gobierno Autónomo Municipal de San José de Chiquitos.** (2016). Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (PMOT) del Gobierno Autónomo Municipal de San José de Chiquitos.
- Hutton, C., Wagener, T., Freer, J., Han, D., Duffy, C., & Arheimer, B.** (2016). Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science? *REPRODUCIBLE COMPUTATIONAL HYDROLOGY*.
- Tierra plus, B.** (2015). Santa Cruz: Sequía agrava escasez de agua en San José de Chiquitos . Santa Cruz: Sequía agrava escasez de agua en San José de Chiquitos , pág. 1.