



Acta Universitaria

ISSN: 0188-6266

actauniversitaria@ugto.mx

Universidad de Guanajuato

México

Ramos Arroyo, Yann René; Martínez Arredondo, Julio César; Ortega Chávez, Víctor  
Manuel; Piñón Pérez, Ignacio; González Olvera, Ángel

Descripción del potencial de aprovechamiento hídrico y de riesgos hidrológicos en el  
municipio de Xichú, NE del estado de Guanajuato

Acta Universitaria, vol. 26, núm. 2, 2016, pp. 7-21

Universidad de Guanajuato

Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41649432002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Descripción del potencial de aprovechamiento hídrico y de riesgos hidrológicos en el municipio de Xichú, NE del estado de Guanajuato

Description of water use potential and hydrological risks in Xichú municipality, NE of the state of Guanajuato

Yann René Ramos Arroyo<sup>\*,†</sup>, Julio César Martínez Arredondo\*, Víctor Manuel Ortega Chávez\*, Ignacio Piñón Pérez\*\*, Ángel González Olvera\*\*\*

## RESUMEN

Se describen las condiciones hidrológicas del municipio de Xichú, la principal reserva de agua de Guanajuato, donde la mayoría de los habitantes no cuentan con infraestructura de abasto. Aquí se encuentra el sitio más contaminado por arsénico en México: los jales del mineral La Aurora. El objetivo fue evaluar tanto el potencial de aprovechamiento hídrico (cantidad de lluvia total anual y los flujos en siete manantiales), como las condiciones de peligros hidrológicos (descripción de los dos canales principales, cuantificación del volumen de jales y simulaciones de avenidas máximas utilizando datos de la lluvia real). Los manantiales aportan volúmenes significativos que podrían abastecer de agua potable todo el año a la población. Los residuos mineros representan al menos 600 000 t que podrían erosionarse. Las lluvias favorecen condiciones de peligro por deslizamientos o procesos de remoción de masa. Hace falta instrumentación hidrométrica que permita predecir los riesgos y actuar en consecuencia.

## ABSTRACT

Hydrological potential at Xichu county was described. It is considered the main water reserve of the state of Guanajuato, but paradoxically inhabitants don't have water supply minimal infrastructure. At Xichu is possible to find the most contaminated site with arsenic in Mexico: La Aurora mine tailings. The aim of this study was to know hydric exploitation potential (annual rain volume and fluxes of seven springs) and to describe danger scenarios (cartography of mine tailings of La Aurora, hydrological conditions of two main channels and to simulate maximal runoff using real rains data). Springs at karstic and fractured rocks produce significative volumes that can supply potable water to population all year. Mine wastes represents at least 600 000 t of materials that can be eroded. Rains over this region favor threat conditions by slides or remotion mass processes. It lacks hydrologic instrumentation to predict risks and take opportune decisions.

## INTRODUCCIÓN

### Potencial de aprovechamiento de agua

Los cambios globales en el clima obligan a evaluar el potencial de aprovechamiento del agua para garantizar tanto el abasto a la población como el desarrollo económico y social. Esto obliga a conocer tanto el volumen de consumo como el que se encuentra disponible (Gleick, 2010). El estado de Guanajuato aún no cuenta con la instrumentación suficiente para medir con exactitud el volumen de agua que se consume para abastecer a la población o por las actividades productivas. Se sugiere que en el territorio guanajuatense se consumen anualmente de 12 000 millones de metros cúbicos ( $Mm^3$ ) a 15 000  $Mm^3$  de agua, tanto superficial como subterránea (Sandoval, 2004).

Recibido: 20 de junio de 2010  
Aceptado: 7 de noviembre de 2016

#### Palabras clave:

Potencial de aprovechamiento; avenida máxima; flujo base; residuos mineros; eventos extraordinarios.

#### Keywords:

Maximal runoff; exploitation potential; base flow; mine tailings; extraordinary events.

#### Cómo citar:

Ramos Arroyo, Y. R., Martínez Arredondo, J. C., Ortega Chávez, V. M., Piñón Pérez, I., & González Olvera, Á. (2016). Descripción del potencial de aprovechamiento hídrico y de riesgos hidrológicos en el municipio de Xichú, NE del estado de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 26(NE-2), 7-21.  
doi: 10.15174/au.2016.1470

\* Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez núm. 77, zona centro, Guanajuato, Gto., México, C.P. 36000. Correo electrónico: yannramos2004@yahoo.com.mx; vicman@ugto.mx; jc.martinez@ugto.mx

\*\* División Centro Occidente, Comisión Federal de Electricidad. Pastita, zona centro, Guanajuato, Gto., México, C.P. 36000.

\*\*\* Centro Rural Experimental El Juglar. Comunidad de Palomas, Xichú, Gto., México.

† Autor de correspondencia.

Un balance reciente sobre el volumen de agua que circula anualmente en el estado de Guanajuato arroja que llueven 18 200 Mm<sup>3</sup> y hay una evapotranspiración de 10 920 Mm<sup>3</sup> (Programa Estatal Hidráulico [PEH], 2015); por otra parte, se estima que el escurrimiento en la porción del río Lerma en el territorio estatal es del orden de 1400 Mm<sup>3</sup> (PEH, 2015).

Se ha cuantificado que la extracción de agua subterránea anual de los pozos registrados en Guanajuato es de 4000 Mm<sup>3</sup> (Sandoval, 2004), con valores de recarga a los acuíferos que varían según la fuente, entre 3000 Mm<sup>3</sup> (Sandoval, 2004) y 2262 Mm<sup>3</sup> (PEH, 2015); sin duda, el estado de Guanajuato enfrenta una grave crisis de abasto de agua. El cambio climático tiene efectos adversos en Guanajuato, tales como la ampliación de los períodos de sequía, disminuyendo el volumen de recarga, la disminución de la superficie cultivable y el incremento en la evaporación de los cuerpos de agua (Bates, Kundzewicz, Wu & Palutikof, 2008; Estrada, Martínez-López, Conde & Gay-García, 2012; Magaña & Caetano, 2007).

Es recomendable que los habitantes cuenten con un mínimo de agua de buena calidad para una adecuada salud, la *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2009) sugiere un volumen básico de 20 l/hab/día, un intermedio de 50 l/hab/día y un óptimo de 100 l/hab/día. En comunidades rurales marginadas, sin la infraestructura mínima de aprovechamiento

del agua, la cosecha de lluvia es la opción más inmediata (Gomes, Heller & Pena, 2012; Sámano-Romero, Mautner, Chávez-Mejía & Jiménez-Cisneros, 2016). El tema cosecha de agua de lluvia se ha evaluado como alternativa de abasto de bajo costo en México (Gil, Reyes, Márquez & Cardona, 2014), concretamente en la cuenca La Soledad en Guanajuato, con poblaciones marginadas (Gay, Martínez, Guevara & Luna, 2010). En otros sitios en el mundo también se ha sugerido utilizar agua de lluvia, como en Namibia (Sturm, Zimmermann, Schütz, Urban & Hartung, 2009) y en Taiwan (Liaw & Chiang, 2014). Esta estrategia también se ha planteado cuando las aguas utilizadas para abasto presentan sustancias con potencial tóxico, como en zonas rurales en Argentina, donde hay presencia de arsénico (Puntoriero, Volpedo & Fernández-Cirelli, 2014).

### Características del municipio de Xichú

El municipio de Xichú al 2010 contaba con 11 560 habitantes, con una extensión de 92 984 ha. Se encuentra inmerso en su totalidad dentro del polígono de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato (RBSGG), ocupando el 37% de esta. La Sierra Gorda de Guanajuato (SGG) está situada en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO) (Lugo-Hubp, 1990) y en la sub-provincia del Carso o Karst Huasteco (figura 1).

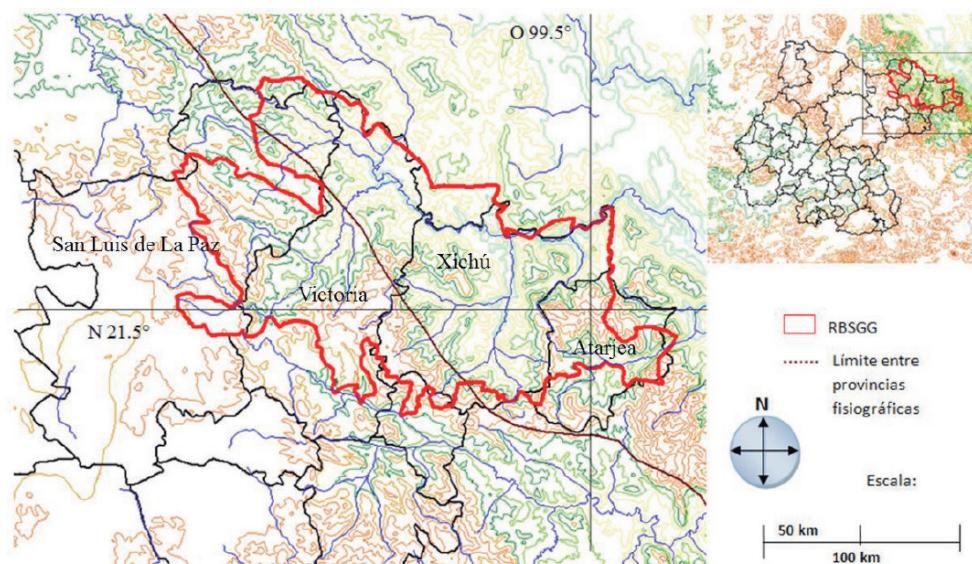


Figura 1. Ubicación del municipio de Xichú en la Sierra Gorda.  
Fuente: Elaboración propia.

La región de la SGG contiene al acuífero Xichú-Atarjea, el único con un balance positivo en cuanto a disponibilidad de agua del estado (PEH, 2015), se considera la “Reserva de Agua” más importante del estado (Conagua, 2011). Se requiere de aplicar el conocimiento sobre las condiciones geológicas y geográficas para apoyar en el desarrollo de la infraestructura necesaria para garantizar el abasto de agua potable.

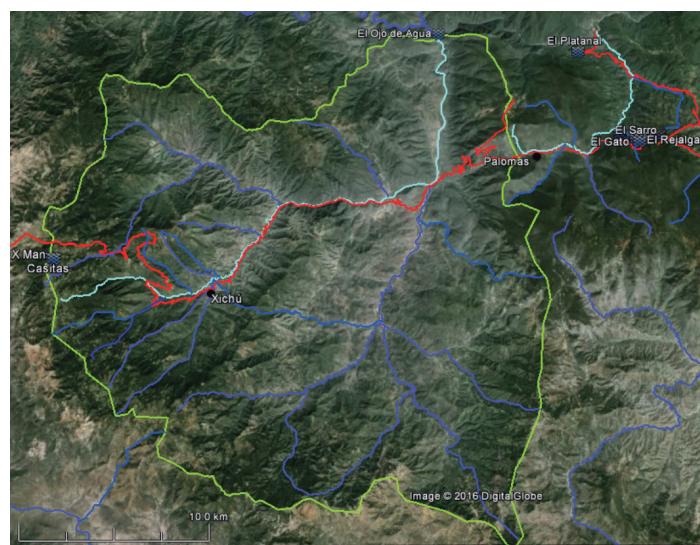
Xichú es considerado como el municipio de mayor marginación del estado de Guanajuato según los indicadores como: grado de analfabetismo, viviendas sin luz, drenaje, acceso a agua potable y los ingresos de la población (Secretaría de Desarrollo Social [Sedesol], 2014).

### Climatología e hidrología

El municipio de Xichú presenta una diferencia de elevación desde los 2690 m sobre el nivel del mar (msnm) y hasta los 665 msnm, lo que favorece una gran variabilidad climática (Martínez-Arredondo, Ortega-Chávez & Ramos-Arroyo, 2013). La precipitación promedio anual es de 700 mm, de la cantidad de lluvia total, poco más del 50% se presenta en verano, principalmente en septiembre. La temperatura media anual es de 22 °C y se presenta una diferencia de temperaturas extremas de -4 °C a 51 °C. La SGG es dominada por una sequía al inicio de verano que puede prolongarse por uno o dos meses (Martínez-Arredondo *et al.*, 2013).

Los habitantes de la región de la SGG recuerdan particularmente la temporada de lluvias del año 1955 como extremadamente húmeda. En este año, tres huracanes considerados de los más destructores del Golfo de México afectaron a poblaciones de la SMO, principalmente a las ciudades de Tampico y Pánuco; se sugiere a la región de la Sierra Gorda como el sitio de mayor impacto de la precipitación ciclónica en tierra (Sánchez-González, 2011). Se han compilado datos de la precipitación total que dejaron estos tres eventos (Alcántara-Ayala, 2004), al menos en la Sierra de Puebla, a 300 km al Sureste de la SGG y la más cercana a la costa del Golfo de México. Del 23 al 30 de agosto estuvo en el Golfo de México el huracán Gladys, dejó en Teziutlán, Puebla, 299 mm de lluvia, del 10 al 20 de septiembre el huracán Hilda dejó 72 mm de lluvia y del 21 al 30 de septiembre el huracán Janet dejó 330 mm de precipitación. La población de Xichú recuerda las afectaciones producidas por estas lluvias, que ocasionaron la pérdida de áreas de cultivo, ya que se erosionó gran parte de las terrazas a lo largo de la margen del río y dejaron de producirse cítricos y café. A la fecha no se ha desarrollado un trabajo en la SGG para conocer los riesgos que representan este tipo de eventos en el bienestar y al desarrollo de la población.

El municipio de Xichú en su totalidad se encuentra en el sistema hidrológico río Pánuco, en la subcuenca del río Santa María. En la figura 2 se muestra la cuenca del arroyo La Laja, un afluente del río Santa María, el más importante del municipio de Xichú.



**Figura 2.** Hidrología del municipio de Xichú mostrando la presencia de manantiales. En verde se delimita la cuenca del arroyo La Laja, en rojo los caminos, en azul los arroyos y en azul claro los canales que se describen los perfiles.  
 Fuente: Elaboración propia, basada en Google Earth.

Las dinámicas de lluvia de esta zona dependen de las tormentas tropicales del Océano Atlántico. La importancia de esta zona reside en que puede solucionar problemas de abastecimiento para otras regiones de la parte baja del Pánuco o inclusive en otras fuera del sistema hidrológico. Recientemente se construyó la cortina de la presa El Realito en el cauce del río Santa María, con una capacidad de 50 Mm<sup>3</sup> que abastecerá a la ciudad de San Luis Potosí y a otras Celaya y San Miguel de Allende. Esto implicará la construcción de un acueducto de más de 200 km, que aún no se ha proyectado y que sin duda ocasionará afectaciones al ambiente. Hacia Celaya y San Miguel de Allende se transportará un flujo de 1 m<sup>3</sup>/s de agua a través de tubería que implica la adaptación de la línea de conducción con una eventual fragmentación de los ecosistemas.

La retención de las aguas junto con el aporte de sedimentos podría representar un riesgo para la planicie fluvial del río Santa María. Este riesgo consiste en que ya no habría aporte de materiales y se rompería el equilibrio natural erosión/deposición, lo que se traduciría en un socavamiento de la planicie y una pérdida de esta geoforma. Por ejemplo, en la comunidad El Platanal se encuentra una playa fluvial que representa un inmenso potencial turístico para apoyar el desarrollo de las comunidades cercanas. Sería conveniente realizar trabajos para evaluar la pérdida de equilibrio del proceso erosión/deposición y evaluar objetivamente el grado de afectación para tomar medidas correctivas en caso de ser necesario. Las inundaciones en la parte baja del río Panuco dependen el estado de conservación de las cuencas altas de la Sierra Gorda (Hergt *et al.*, 2002).

## Geología e hidrogeología

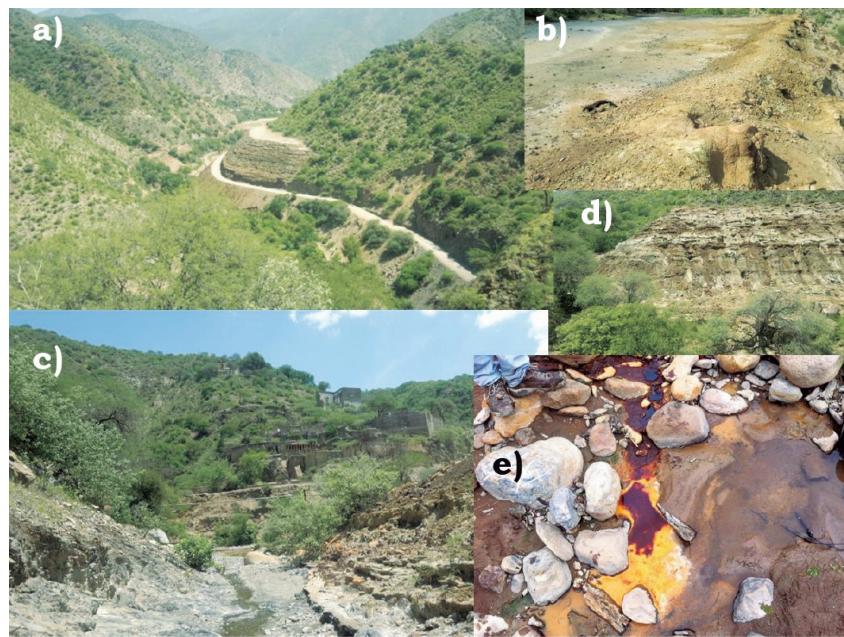
Las rocas en el municipio de Xichú varían desde lutitas del Jurásico (Formación Las Trancas), presente en la SMO y reconocida como el basamento hidrogeológico (Noyola-Medrano *et al.*, 2009); calizas del Cretácico (Formaciones El Abra y El Doctor), también presentes en toda la SMO; rocas volcánicas Terciarias y aluviones del Cuaternario. Xichú y Atarjea son los únicos municipios en Guanajuato donde pueden encontrarse los tres tipos de acuíferos en función de su porosidad: en medio fracturado en las riolitas del Terciario, en medio granular en los valles aluviales recientes y en medio kárstico en las calizas que conjugados con el intenso fracturamiento, favorecen la presencia de numerosas descargas de manantiales.

El principal afluente en la región, el río Santa María, está fuertemente controlado por las descargas del manantial El Ojo de Agua (MOA) (flujo de 800 l/s en temporada de estiaje), que brota a unos 100 m antes del cruce del arroyo La Laja con el río Santa María. A la fecha no se ha desarrollado una caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica detallada de los flujos de salida de este manantial.

Existe muy poca información para plantear el volumen de agua disponible en el municipio de Xichú. En el 2000, la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) actualizó un estudio para conocer el potencial de aprovechamiento del acuífero Xichú-Atarjea, con un área de 397 665 ha (CEAG, 2000). Este estudio sólo concibe a las riolitas fracturadas como la única unidad litológica que podría funcionar como acuífero. Los números del balance que plantea este trabajo sugieren una precipitación de 2230 Mm<sup>3</sup>, una evapotranspiración de 2065 Mm<sup>3</sup> y el escurrimiento e infiltración se reparten entre 173 Mm<sup>3</sup>. El plan Estatal Hidráulico marca una cantidad de lluvia total anual muy similar, sin embargo, marca como valores de recarga o infiltración de 403 Mm<sup>3</sup> y un escurrimiento de 206.4 Mm<sup>3</sup>. La Comisión Nacional del Agua (Conagua), determinó que la cuenca del Río Santa María constituyen la principal reserva de agua para los estados de Querétaro y Guanajuato; se asignó un potencial de aprovechamiento para el arroyo La Laja o río Santa María 2, de 140.2 Mm<sup>3</sup> (Conagua, 2011).

El distrito minero o Real de Xichú consiste de yacimientos tipo *skarn* o de metasomatismo (Miranda-Gasca, 1978), o reemplazamiento; formados por la intrusión de cuerpos magnmáticos en las calizas. La extracción comenzó en pequeña escala en 1600, con mayor intensidad durante el siglo XX, por la demanda de plomo y zinc durante la Segunda Guerra Mundial (Miranda-Gasca, 1978); las actividades de extracción en la mina La Aurora finalizaron en 1957.

La explotación de los yacimientos mineros en Xichú ha generado aproximadamente un millón de toneladas de residuos mineros o jales, estos residuos son una mezcla de minerales que contienen elementos con potencial tóxico como; pirita (FeS<sub>2</sub>), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), galena (PbS), esfalerita (ZnS), arsenopirita (FeAsS) y otros minerales de As. Los jales contienen 37% Fe, 62 g/kg de As, 2.4 g/kg de Cu, 13 g/kg de Zn y 17 g/kg de Pb en diferentes fases minerales, principalmente óxidos de Fe, (oxi) hidróxidos de Fe, sulfosales y minerales de sulfuros (Carrillo-Chávez *et al.*, 2014).



**Figura 3.** Residuos mineros del mineral La Aurora. a) Vista de depósito. b) Superficie de depósito 2, no crece ningún tipo de vegetación. c) Paso del río Santa María por el depósito 1. d) Erosión en las paredes del depósito 1. e) Lixiviado al pie del depósito 2.

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, existen por lo menos cinco depósitos de jales. Este trabajo se centrará en el levantamiento topográfico de dos de ellos que por su volumen son los de mayor importancia y los que se han erosionado más al paso del tiempo, se aprecian en la figura 3. Por ejemplo, el depósito 2 (figura 3a) tiene gran influencia en la vida diaria de la población, ya que el único camino que comunica a la cabecera municipal con las comunidades del norte, atraviesa una de sus laderas. Por este camino circulan al menos 500 vehículos al día. En días de fiesta regional, principalmente el 31 de diciembre y el 1 de enero de cada año, circulan hasta 5000 vehículos que podrían poner en riesgo la estabilidad de las laderas.

En la figura 3b se aprecia que estos materiales no permiten el desarrollo de ningún tipo de vegetación. La figura 3c muestra el canal del río Santa María al paso del depósito 1, las crecidas del río impactan en las laderas y pueden desestabilizarlas movilizando grandes cantidades de materiales, como puede apreciarse en la figura 3d. La figura 3e muestra una zona al pie del depósito 2, donde migran lixiviados altamente contaminantes, una caracterización reciente muestra un pH de 3, y concentraciones de arsénico de entre 100 000  $\mu\text{g}/\text{L}$  y 250 000  $\mu\text{g}/\text{L}$ , que sobrepasan hasta en 10 000 veces la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Diario Oficial de la Federación [DOF], t2013); represen-

tan el sitio más contaminado en México por arsénico (Ramos-Arroyo, Guerrero-Aguilar, Cano-Rodríguez, Gutiérrez-Valtierra & Miranda Avilés, 2016).

El objetivo de este trabajo es describir el potencial de aprovechamiento del agua en el municipio de Xichú, así como los factores que lo ponen en riesgo. Se plantean escenarios de riesgos hidrológicos, particularmente relacionados con la pérdida de estabilidad de los residuos mineros La Aurora.

## MÉTODOS

Se realizó un procesamiento digital de cartas temáticas escala 1:25 000, tanto topográficas como geológicas, de las hojas Xichú F14-C36 y El Carricillo F14-C37, editadas por Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) con el software *Arc-view* asistido por *Google Earth*. Se realizaron al menos cuatro visitas a campo durante el 2011 para seleccionar dos arroyos representativos de las condiciones hidrogeológicas, pues contienen a los tres tipos de acuíferos: fracturado, granular y kárstico. En ambos canales, el drenaje tiene un escurreimiento base significativo y el escurreimiento directo puede generar riesgos por crecidas e inundaciones. Se describieron las condiciones relacionadas con el flujo

base en una cuenca tales como pendiente, longitud del canal principal y litología (Björn, Steidl, Dietrich & Lischeid, 2011).

Uno de los canales es el principal del río Xichú, desde el parteaguas hasta el cruce con el río Santa María (transecto azul claro en figura 2). Este canal cruza la población de Xichú y los depósitos de jales del mineral La Aurora. El otro transecto va de la comunidad Pinalito de Palomas hasta el cruce del arroyo Majadas con el río Santa María. Se desarrolló un modelo conceptual de los flujos en ambos canales considerando la litología y las columnas estratigráficas de los mapas geológicos integrando esta información con la relación de alturas topográficas y distancia desde el parteaguas utilizando el software *Google Earth*.

Se integró un Sistema de Información Geográfica (SIG) con la plataforma *Arc Map 10.1* para realizar la caracterización física del territorio y determinar los factores del relieve que influyen en el régimen hidrológico. Se recopiló información de lluvia histórica, diaria y anual, usando la base de datos de Conagua, Extractor Rápido de Información Climatológica (Eric III), y las normales climatológicas (1951 – 2015) de las estaciones cercanas a la zona de estudio (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2015) y se seleccionaron eventos de lluvia extraordinarios. Los datos faltantes fueron completados a través de métodos univariados: criterio del valor medio, del dato anterior y posterior o de la estación vecina (Barrera-Escoda, 2004). También se aplicaron métodos multivariantes que se aplican solo a una variable específica y utilizan el criterio de la correlación lineal (De Luque & Martín-Esquível, 2011). Se realizó la cuantificación de lluvia anual promedio considerando los datos de la normal climatológica 1951-2015 con la herramienta *Geostatistical y Spatial Analyst de ArcMap 10*.

Se utilizó el simulador de flujo ATL para determinar gastos con 10, 30, 50 y 100 años como períodos de frecuencia, el cual es de acceso libre y puede operarse desde la plataforma de internet: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#). Se seleccionaron dos coeficientes de escurrimiento considerando diferentes condiciones climáticas y de cobertura de suelo: 0.3 para la simulación de la interacción de lluvias con rocas de alta porosidad y/o primeras lluvias y 0.7 para simular la interacción con rocas de baja porosidad o condiciones del terreno saturadas.

El trabajo de campo consistió en dos etapas. La primera se basó en el conocimiento de la hidrografía, se realizó un monitoreo del gasto en manantiales y arroyos de las cuencas elegidas. Los métodos para de-

terminar el gasto dependieron del caudal del flujo, en el caso del escurrimiento superficial se utilizaron el método velocidad-sección, usando un moliente electrónico de la marca *Swoffer* con precisión de 5 l/s o 0.005 m<sup>3</sup>/s y para flujos de manantiales el aforo se hizo con el método volumétrico.

La segunda etapa del trabajo de campo fue el levantamiento topográfico de las presas de jales que se encuentran abandonadas. Esta actividad se describe en cuatro pasos:

- A. Georeferenciación. Se consultó en la base de datos de la Red Geodésica Nacional, INEGI, los puntos georreferenciados más cercanos a la zona de los residuos mineros (mojoneras). A partir de esta información se utilizó un Navegador *Explorer Garmin* para identificar y encontrar estos puntos (x, y, z) utilizados como enlace para iniciar el levantamiento topográfico. Para asignar coordenadas georreferenciadas conforme a la norma técnica para levantamientos topográficos, se encontró la mojonera de control geodésica con coordenadas X = 393061.8670 Y = 2358556.8120 y Z = 1224.8230.
- B. Levantamientos topográficos. Una vez que se identificó el punto georreferenciado, y se obtuvieron los vértices geodésicos para el correcto levantamiento topográfico, se utilizó un GPS de dos frecuencias *Sokkia GRX2* y con precisión al milímetro. Se levantaron aproximadamente 3000 puntos para la generación de planta, curvas de nivel, perfiles y volumetría de los jales.
- C. Digitalización de información topográfica. La digitalización de resultados consiste en representar en un programa de cómputo *AUTOCAD*, los resultados obtenidos en el levantamiento de campo, esto con el fin de realizar el cálculo del volumen ocupado por los jales mineros.
- D. Impresión de planos y cálculos. El cálculo del volumen se realizó a través de la sumatoria de secciones con equidistancia de 2 m, después se obtuvo el área de cada sección y por último se dividió entre dos para conocer el diferencial de volumen mediante la siguiente fórmula (Gu & Wang, 2012):

$$Vol = \sum(Ai + Af)/2. \quad (1)$$

Donde: Ai = Área inicial, Af = Área final.

Para el aforo de los manantiales (determinación del caudal) se aplicaron los siguientes métodos:

- a) El método de sección-velocidad que utiliza la ecuación de continuidad, donde se determina el área de la sección transversal y la velocidad media que tiene el agua al pasar por la misma, está dada por la ecuación (Ward & Trimble, 2003):

$$Q = (A)(v)(1000). \quad (2)$$

Dónde:

Q, es el gasto de la corriente en 1/s

A, es el área de la sección transversal en m<sup>2</sup>

v, es la velocidad promedio que pasa por la sección en m/s.

- b) El método volumétrico, en el cual se utiliza un recipiente de volumen conocido y donde se capta el flujo de la fuente. Describo por la ecuación (Ward & Trimble, 2003):

$$Q = V/t. \quad (3)$$

Donde:

Q, es el gasto en 1/s

V, es el volumen del recipiente

t, es el tiempo de llenado en s.

En los ríos Los Cocos y los manantiales El Rejalgar y El Ojo de Agua se usó el método de sección-velocidad, mientras que en el manantial El Platanal se aplicó el volumétrico.

Con el fin de evaluar el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia y evidenciar eventos de lluvia extrema, se instaló en la comunidad de Palomas (14 411 870 en X, 2 364 159 en Y a 1310 msnm) una estación meteorológica automática de la Marca Davis en el 2008. La información se recolecta con intervalos de 15 min con sensores de precipitación, temperatura, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento. Con el software WeatherLink se procesan las bases de datos para construir hietogramas y climogramas puntuales. Esta sola estación no sería suficiente para derivar volumen de aprovechamiento y menos para definir condiciones de riesgo, pero es un primer esfuerzo. Existe un acercamiento con las oficinas de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato con el compromiso de realizar la instalación de siete estaciones meteorológicas automáticas y evaluar con mayor exactitud el potencial de aprovechamiento del agua de lluvia en la Sierra Gorda de Guanajuato.

## RESULTADOS

### Levantamiento topográfico

En las faldas del cerro del Águila y las márgenes del río Xichú se ubica la comunidad de la Aurora, localizada geográficamente en las coordenadas 100°02'03" de longitud 21°19'32" de latitud, a 1099 m sobre el nivel del mar, a 6 km al sur de la cabecera municipal de Xichú, Guanajuato. En la figura 4 se muestra el plano del depósito de jales 1.

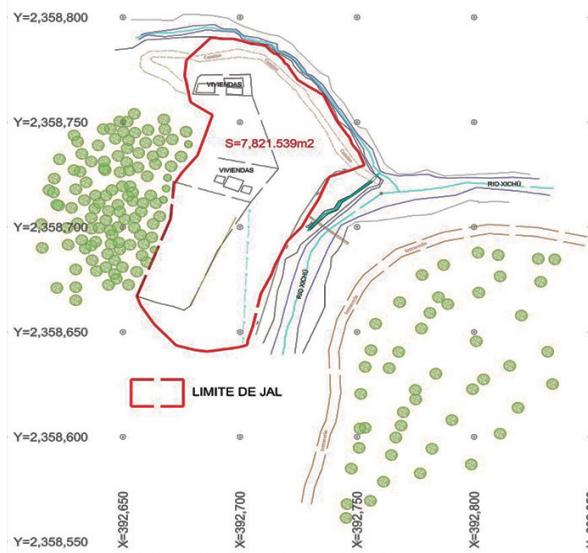


Figura 4. Plano topográfico del depósito de jales 1.

Fuente: Elaboración propia.

La comunidad La Aurora se encuentra habitada por 38 personas, según el censo de población y vivienda 2010. Forma parte de las comunidades indígenas del país, ya que aún se conservan fielmente las costumbres prehispánicas, música, gastronomía, artesanía, danza, etcétera, como lo reporta el Padrón de Comunidades Indígenas del Estado de Guanajuato (POEG, 2012). El nombre de mineral de La Aurora se le atribuye al hecho de que en tiempos del auge minero una mujer llamada con este nombre trabajó de forma loable en esta mina.

El depósito 1 tiene una forma romboédrica, en su parte superior se observan dos terrazas semiplanas producto de las etapas de deposición, en la terraza de menor elevación se encuentran casas que son habitadas por al menos dos familias, representando un riesgo muy alto a su salud. Se generaron un total de 72 secciones topográficas para el cálculo del volumen, de lo cual se obtuvieron  $41\ 973.55\ m^3$  considerando una pendiente aproximada de  $53^\circ$  a  $56^\circ$ . El depósito 1 tiene una superficie de  $7\ 821.539\ m^2$ ; o  $7.82\ ha$ , su perímetro es de  $401.59\ m$ .

En la figura 5 se aprecia el depósito de jales 2, que tiene un volumen 4.52 veces mayor que el depósito 1,

resultando como volumen final  $189\ 934.93\ m^3$  calculados a partir de la elaboración de 166 secciones, la superficie es de  $23\ 381.77\ m^2$ , el perímetro es de  $797.56\ m$ .

Este depósito presenta un alto riesgo de deslizamiento, ya que encima de él circulan hasta 500 vehículos cada día. En temporadas festivas en el municipio, este camino registra el tránsito de hasta 5000 vehículos. Para derivar la volumetría a partir del levantamiento topográfico de los dos depósitos, se realizaron 238 secciones para obtener un total de  $231\ 908.49\ m^3$ , lo cual equivale a un prisma de  $107.68\ m$  de largo por  $107.68\ m$  de ancho y  $20\ m$  de altura. La superficie total es de  $31\ 203.31\ m^2$ . El perímetro total es de  $1199.14\ m$ . La densidad de estos materiales es alta, va desde  $2.5\ g/cm^3$  y hasta  $3\ g/cm^3$ , o su equivalente en  $t/m^3$  (Guerrero-Aguilar, 2015). Los residuos mineros al margen del río Xichú al menos representan  $600\ 000\ t$ , aunque existen otros dos depósitos más pequeños que en conjunto con estos que fueron cartografiados son del orden de  $1\ 000\ 000\ t$ . Los residuos mineros se encuentran cementados debido a procesos de precipitación de sulfatos, yeso sobre todo (Ramos-Arroyo *et al.*, 2016). Esta cementación favorece que la costra superior sea una coraza difícil de remover, aún así se presenta caída de bloques.

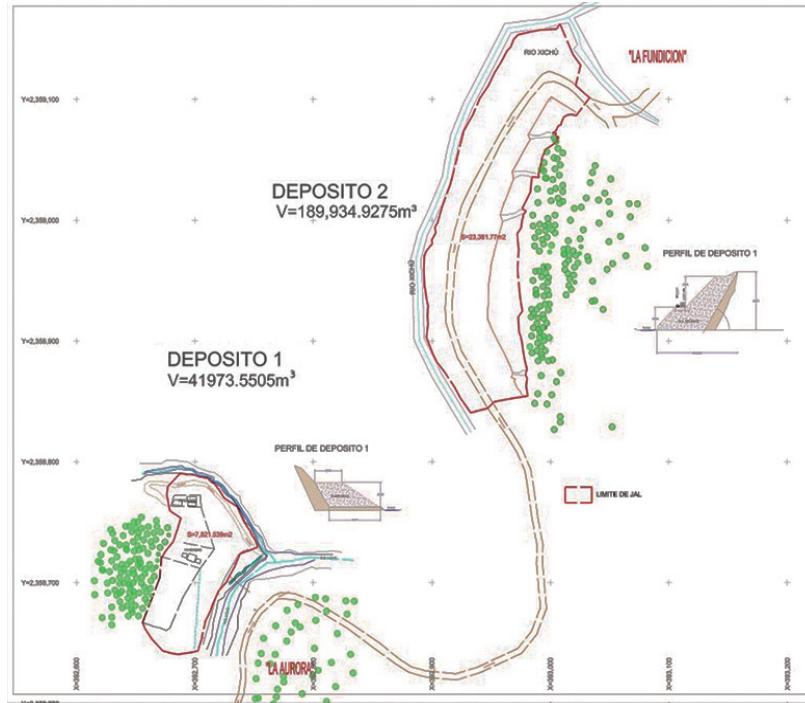


Figura 5. Plano topográfico del depósito de jales 2.

Fuente: Elaboración propia.

## Caracterización hidrográfica

En la tabla 1 se presentan los parámetros más importantes para evaluar los escurrimientos máximos, gastos pico y el tiempo de concentración, variables que consideran la forma de la cuenca, la pendiente y la longitud del arroyo principal. Se consideran dos cuencas que se evalúan en dos subcuenca cada una; la que drena al canal principal, del río Xichú hasta el río La Laja (Xichú-La Aurora y La Laja) y la que escurre desde Pinalito de Palomas hasta El Platanal.

La cuenca del río La Laja es un sistema hidrológico de 655 km<sup>2</sup> y una longitud del cauce principal de 50 km, recibe el aporte del río Xichú, muy importante para el equilibrio de los ecosistemas. Es del tipo intermitente en zonas medias y bajas, sin embargo, en las partes altas drenan muchos flujos sub-superficiales y subterráneos que mantienen un flujo base significativo.

Las condiciones de pendiente favorecen un rápido escurrimiento como se aprecia en los tiempos de concentración. Es común que comunidades cerca de estos ríos queden incomunicadas debido a que crece mucho el nivel del agua y no hay caminos, como el

caso de la comunidad Tortugas. Las avenidas máximas que bajan por el río Xichú pueden impactar al depósito de jales La Aurora con el riesgo de remover cantidades significativas de estos materiales con potencial tóxico, sobre todo arsénico. Esta dispersión de materiales puede afectar la calidad del agua y de los suelos desarrollados sobre las terrazas aluviales, por ello se sugiere implementar instrumentación hidrológica para conocer las velocidades y el volumen de las avenidas máximas, con el fin de predecir eventos de remoción de los materiales y tomar las medidas preventivas necesarias.

## Potencial de aprovechamiento hídrico en el municipio de Xichú

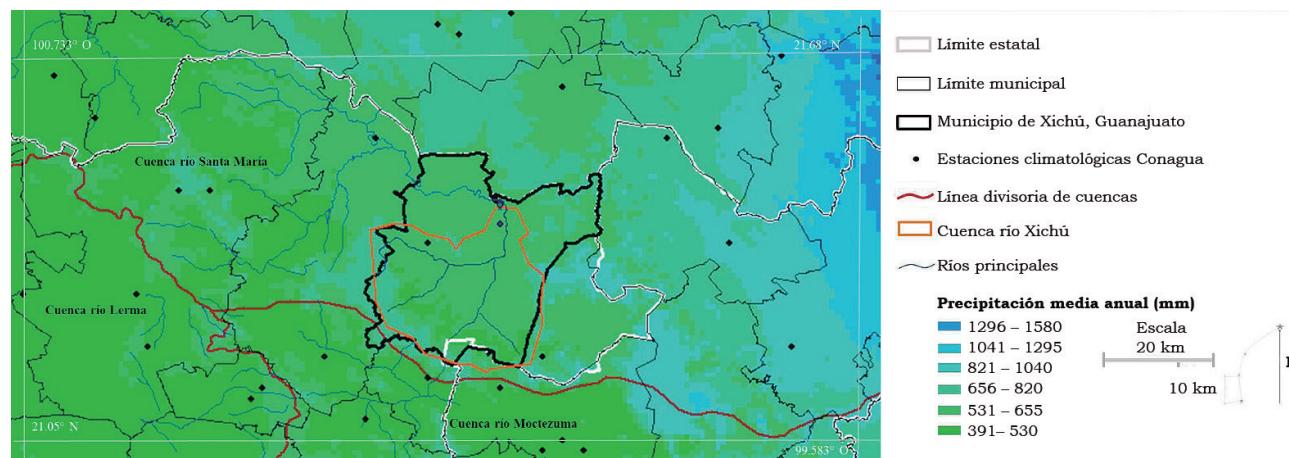
El municipio de Xichú tiene una población actual cercana a 17 000 habitantes, quienes requerirían de 0.124 Mm<sup>3</sup> de agua para satisfacer sus necesidades básicas que son para beber y de higiene; considerando un consumo por habitante al día 20 l (Gil *et al.*, 2014).

La figura 6 muestra la distribución de lluvia de la Normal climatológica 1951-2015, resaltando las cuencas hidrológicas y sobre todo el arroyo La Laja.

**Tabla 1.**  
Parámetros morfométricos de las cuencas específicas del municipio de Xichú.

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	El. máx (msnm)	El. m (msnm)	El. mín (msnm)	Longitud (km)	Pendiente (%)	T conc (min)
Xichú-La Aurora	99.56	2577	1848	1120	15.46	9.42	79.46
La Laja	655.18	2515	1636	757	49.64	3.54	288.18
Palomas-Platanal	111.48	1672	1180	689	20.12	4.88	127.71
Pinalito-Palomas	40.50	1672	1464	1257	7.671	5.41	54.71

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Distribución de lluvia en la Sierra Gorda de Guanajuato según datos de la Normal Climatológica 1951-2015.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.

Ubicación y flujos de los principales manantiales del municipio de Xichú. Los datos fueron georreferenciados por los autores, así como el reconocimiento del medio geológico.

Sitio	X UTM	Y UTM	Z (msnm)	Medio geológico	Flujo (l/s), Mm <sup>3</sup> /año
El Platanal	14 411 489	2 370 599	1161	En contacto caliza/lutita	4 (0.126)
El Gato	14 414 888	2 364 697	1468	En contacto caliza/lutita	0.8 (0.08)
Casitas	14 381 437	2 356 379	2538	Riolita fracturada	0.55 (0.03)
Xichú	14 381 544	2 356 337	2529	Riolita fracturada	0.2 (0.02)
Ojo de Agua (MOA)	14 402 758	2 371 729	772	En contacto caliza/lutita	950 (29.96)
El Sarro	14 415 069	2 364 509	1546	En contacto caliza/lutita	0.8 (0.025)
El Rejalgar	14 415 505	2 364 827	1604	En contacto caliza/lutita	0.2 (0.06)

Fuente: Elaboración propia.

Se cuantificó un volumen de lluvia total anual en el municipio de Xichú, resultando de 534.72 Mm<sup>3</sup>; en el área del arroyo La Laja (61 194 ha), esta cantidad es de 416.44 Mm<sup>3</sup>. Claramente se aprecia que aún considerando un consumo óptimo al día por habitante de 200 l (UNEP, 2009), que representan 1.241 Mm<sup>3</sup> al año, existe un suficiente volumen para abastecer a la población, incluso considerando la evapo-transpiración. En algunas localidades comienzan a cosechar agua de lluvia, la cual tiene una calidad potable, con baja salinidad, menor a 50 mg/l y exenta de elementos con potencial tóxico (Guerrero-Aguilar, 2015).

En al menos 30 comunidades de Xichú se han construido bordos de captación, con capacidades de entre 100 m<sup>3</sup> y hasta 1000 m<sup>3</sup>, los usos son para abasto a la población y sobre todo para dar de beber al ganado, una actividad que va creciendo. En varias comunidades, la captación en los bordos no ha funcionado dado que las rocas favorecen la infiltración, tanto las riolitas fracturadas, como las calizas, que se encuentran karstificadas. La División de Ingenierías del Campus Guanajuato se encuentra apoyando al menos a dos comunidades en la realización de proyectos ejecutivos para la adaptación de los bordos, con el fin de que los pobladores tengan una herramienta para la gestión de recursos y canalizar las aguas para abasto a la población. Otro aspecto que se ha atendido es evitar que el ganado beba directamente en los bordos, pues afectan fuertemente la calidad.

En la tabla 2 se muestra la ubicación de los principales manantiales del municipio de Xichú y los flujos promedio que fueron cuantificados. La cantidad de agua total anual que drena de los manantiales de Xichú es de al menos 30.15 Mm<sup>3</sup>, el 98% de este volumen drena del MOA. Hay agua suficiente para abastecer a la población, sin embargo, las fuertes diferencias de elevación de los manantiales a las comunidades, así como la distancia, no han favorecido el desarrollo de

infraestructura. Casi todas las comunidades de este municipio se encuentran sin abasto de agua potable y es común que tengan que desplazarse hasta los manantiales para contar con el líquido. Se han realizado caracterizaciones a las aguas de manantial y han resultado de excelente calidad como aguas potables (Guerrero-Aguilar, 2015), en un trabajo posterior se hará un reporte detallado.

Comparando el flujo anual que sale por el MOA (29.96 Mm<sup>3</sup>) con la lluvia total en la cuenca del arroyo La Laja, (416.44 Mm<sup>3</sup>) puede deducirse que el 7.19% del agua de lluvia se infiltra, si bien aún falta la caracterización de los mecanismos de recarga, se plantea como una referencia para un balance anual.

El río Xichú tiene un régimen perenne, a la altura de la población de Xichú se han cuantificado de 40 l/s a 60 l/s en temporada de estiaje, durante la temporada de lluvias el volumen evaluado fue de 4 m<sup>3</sup>/s. El volumen de agua anual que escurre superficialmente por el río Xichú, a la altura de la cabecera municipal, varía de 4 Mm<sup>3</sup> a 10 Mm<sup>3</sup>. Es muy posible que los flujos subsuperficiales que fluyen por los aluviones del río Xichú-La Laja lleguen a recargar al manantial el Ojo de Agua.

Revisando estos volúmenes, resulta contradictorio que no existan planes de abasto seguro a la población de Xichú, con alto grado de marginación y riqueza en el recurso hidrico.

En la figura 7a se representa el canal principal del río Xichú desde el parteaguas en las riolitas fracturadas de la cuenca hasta el cruce con el río Santa María, cerca del brote del MOA.

A lo largo de este transecto se presentan al menos dos tipos de sistemas de flujo subterráneo: en las riolitas fracturadas de las partes altas hay manantiales con aguas con calidad potable como Casitas y Charco

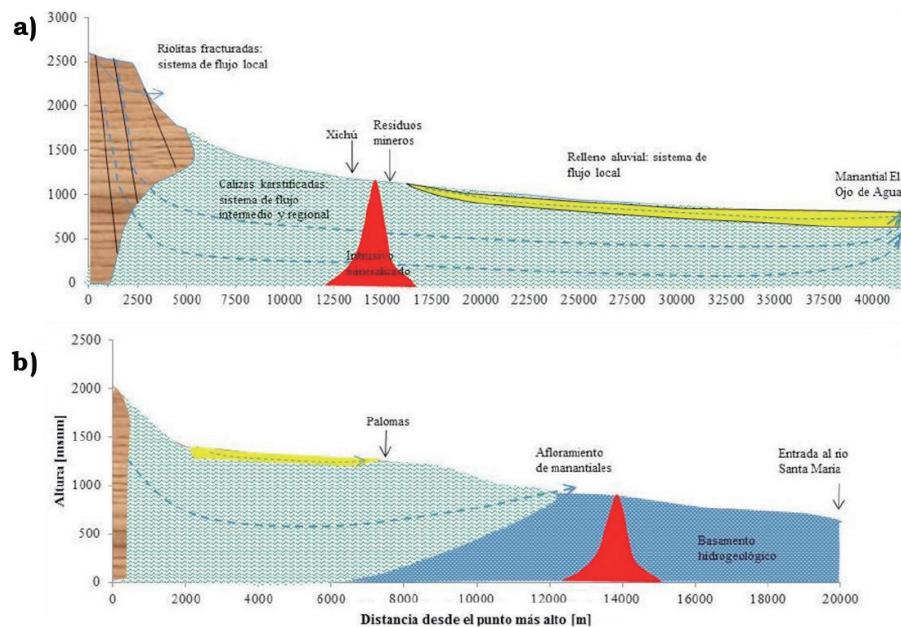
Azul y existe infiltración profunda en las calizas; la profundidad del basamento parece estar controlada por lutitas del Jurásico de baja permeabilidad a más de 500 m (Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

En este canal se encuentra la localidad de Xichú, uno de los principales focos de contaminación debido a que las aguas residuales son vertidas al arroyo sin ningún tipo de tratamiento, también a 6 km debajo de Xichú se encuentran los residuos mineros. A menos de 1 km gradiente abajo de los residuos mineros se presenta una acumulación de materiales que forman un acuífero granular, que sostiene un flujo base por la infiltración del arroyo. Hay tramos del canal en que no se detecta el flujo base y escurre de forma subsuperficial, en cualquier época del año esta agua brota en el MOA.

En la figura 7b se representa el canal del arroyo Pinalito de Palomas-Majadas, que cruza por la comunidad de Palomas. En esta subcuenca afloran más de diez manantiales con una característica común: el medio acuífero son calizas karstificadas y el basamento son lutitas del Jurásico. Esta condición se cumple al menos para los manantiales El Gato, El Rejalgar, El Resumidero y El Platanal, los cuales tienen aguas con pH entre 7.5 y 8.5 y condiciones de potabilidad.

Existen yacimientos de oro, plata y plomo tanto de origen epitermal como de tipo *skarn* o de reemplazamiento, ambos emplazados en lutitas, que se encuentran en fase de exploración. Es importante resaltar los impactos negativos que tendría la extracción de los minerales. Las lutitas no contienen carbonatos, por lo que si comienza la extracción de materiales con altos contenidos de sulfuros se tendrían condiciones muy extremas de acidez y liberación de metales y arsénico; esta situación se agudiza debido a la ausencia de rocas con potencial de neutralización como lo son las calizas. Es necesario realizar estudios detallados antes de tomar la decisión de permitir la extracción de minerales pues puede afectarse fuertemente la calidad del agua.

La cuenca del arroyo La Laja se encuentra dentro de la región hidrológica Río Santa María 2, se ha evaluado que tiene una disponibilidad de agua anual de 140.2 Mm<sup>3</sup>, que lo ubican como una excelente reserva de agua (Conagua, 2011). Existe un decreto presidencial donde se asigna esta zona como la principal reserva de agua de los estados de Querétaro y Guanajuato (DOF, 2013), donde se menciona que las aguas comenzarán a utilizarse para el 2030. Resulta fundamental resolver el problema del abasto de agua a las poblaciones de la SGG, el cual consiste en adaptación de infraestructura para aprovechamiento de agua de manantial, cosecha de agua de lluvia y optimización de la captación de agua en bordos.



**Figura 7.** Canales de los arroyos Xichú- El Ojo de Agua y Pinalito de Palomas-El Platanal mostrando los flujos subterráneos.  
 Fuente: Elaboración propia.

## Eventos extraordinarios

La región del municipio de Xichú, incluso toda la SGG, es una barrera natural para las tormentas provenientes del Golfo de México. Los tres huracanes que entraron a esta región de agosto a septiembre de 1955 se encuentran en registros en otros estados del país, no en esta zona. Con el fin de comparar la distribución de la lluvia en la vertiente del Golfo, la figura 8 muestra la lluvia acumulada en junio de 1971, un año muy lluvioso y el más “antiguo” del que se tiene registro para la SGG. Esta región está sujeta a dinámicas de lluvia de la misma intensidad que en las sierras de Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Puebla y Veracruz. En junio de 1971 precipitaron más de 400 mm de lluvia, que

representaron más del 50% del total anual. La SGG recibió remanentes de tormentas en el barlovento de la SMO, se registraron más de 450 mm – 550 mm en la sierra de Puebla, Hidalgo y Querétaro. Además de la información mensual, es necesario conocer los niveles máximos de lluvia en 24 h.

El 27 de julio de 2010 fue el día más lluvioso recordado en los últimos 40 años en la región de la SGG. La estación de Atarjea registró ese día 140 mm de lluvia. Sin embargo, el 30 de junio de 2011, la estación de Palomas Xichú registró 152 mm de lluvia y el 1 de julio 120 mm; más de 270 mm en dos días o la tercera parte del valor anual esperado. En la figura 9 se muestran los valores de la lluvia registrada los meses de junio y julio de 2011.

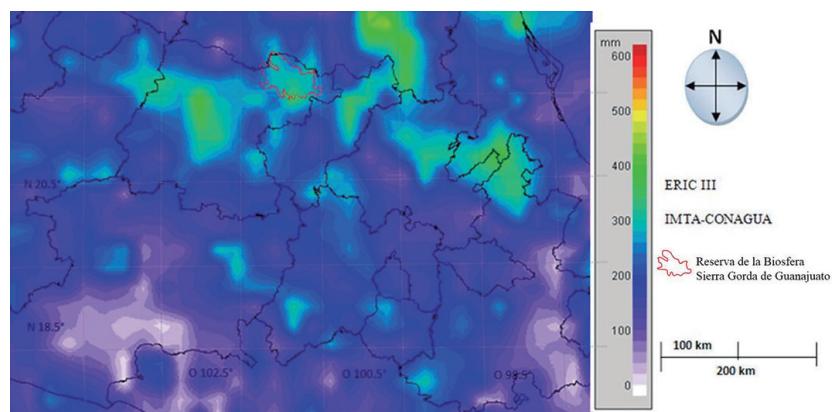


Figura 8. Distribución espacial de lluvia en el centro de la República Mexicana para junio de 1971.

Fuente: Elaboración propia, adaptada desde la plataforma de Conagua.

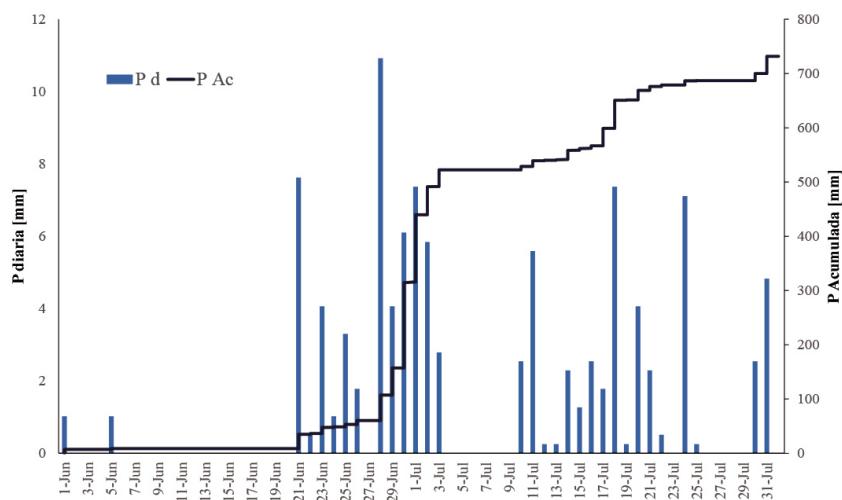
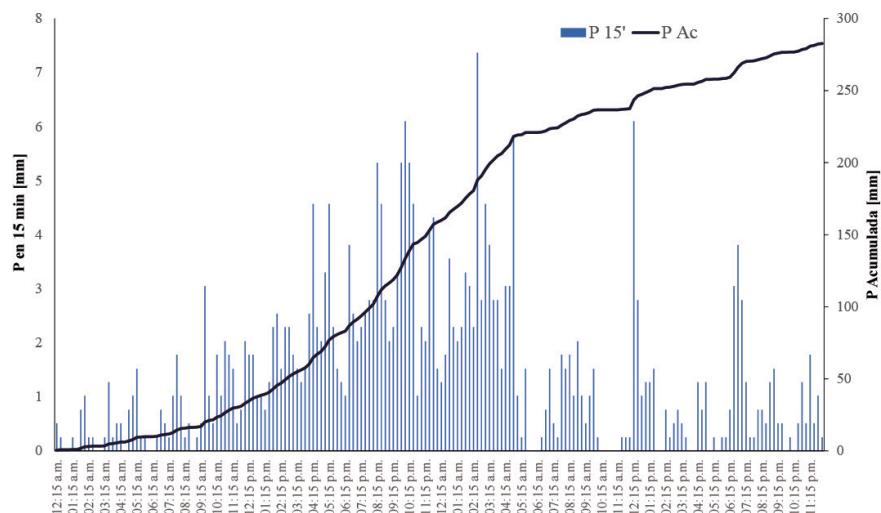


Figura 9. Hietograma y curva masa de junio y julio de 2011 en la estación Palomas, Xichú.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 10.** Curva masa del 30 de junio y 1 julio de 2011 en la estación Palomas, Xichú.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.**

Escurrimientos derivados de precipitaciones históricas Cuenca río Xichú-La Aurora.

Estación	LLuvia máxima (mm/d) fecha	Intensidad probable (mm/hr)	Gasto máximo m <sup>3</sup> /s	Coeficiente de escurrimiento (30% y 70%)
Xichú	87.6 01/09/1975	20	40	0.67 1.57

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.**

Gastos máximos extraordinarios en la cuenca río Xichú-La Aurora.

Intensidad (mm/hr)				Gasto máximo m <sup>3</sup> /s				Gasto máximo m <sup>3</sup> /s			
Periodos de retorno				Coeficiente de escurrimiento 30%				Coeficiente de escurrimiento 70%			
10	30	50	100	i <sub>10</sub>	i <sub>30</sub>	i <sub>50</sub>	i <sub>100</sub>	i <sub>10</sub>	i <sub>30</sub>	i <sub>50</sub>	i <sub>100</sub>
67.6	117.1	151.1	213.8	5.6	9.71	12.53	17.73	13.08	22.66	29.25	41.38

Fuente: Elaboración propia.

La figura 10 muestra la precipitación registrada los días 30 de junio y 1 de julio de 2011.

Se aprecia que esos dos días se presentaron rachas de lluvia con alta energía cinética, valores útiles para modelos lluvia-escurrimiento. Las rachas en 15 min fueron de más de 70 mm/h, sin embargo, el valor real de lluvia es de 7.5 mm en 15 min.

En la tabla 3 se presentan los valores extraordinarios de escurrimiento que podrían presentarse para la cuenca del río Xichú, considerando como punto de salida los residuos mineros La Aurora y el dato de lluvia horaria que registró la estación de Xichú el 1 de septiembre de 1975 mm de 87.6 mm; se sugieren dos valores de intensidad horaria, de 20 mm/h y 40 mm/h;

considerando los datos recientes de la estación Palomas, de 30 mm/h puede decirse que esas intensidades son factibles. Se determinaron dos valores distintos de caudales, lo que cambia en cada metodología empleada es el tiempo de concentración, ya que uno de estos cálculos involucra el orden de corriente, longitud y pendiente del canal principal así como la forma de la cuenca; la otra solo considera la longitud del cauce principal y su pendiente; aun así, los valores son muy cercanos.

La tabla 4 muestra los resultados de simulaciones de avenidas máximas con el código del Simulador de Flujos en Cuenca Hidrológicas (SIATL), considerando períodos de retorno de 10, 30, 50 y 100 años.

El área transversal del canal del río Xichú a la altura del depósito 2 de los jales La Aurora es ocupada por el flujo base ( $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) por un área de  $1.5 \text{ m}^2$ ; el área transversal que ocupa el río hasta la base de los jales, es de  $15 \text{ m}^2$ , una crecida que salga de esta área umbral, comienza a golpear los depósitos de residuos y genera riesgos de erosión. Se han registrado velocidades del agua en este punto entre 0.9 y máximo  $2.5 \text{ m/s}$ . El valor umbral de volumen de escurrimiento puede fijarse en  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , sería conveniente fijar las intensidades de lluvia que producen este escurrimiento a través de la instrumentación hidro-meteorológica y la implementación de un modelo lluvia-escurrimiento. Las repercusiones de estos cálculos se han reflejado en el derrumbe de laderas que han llegado a afectar los caminos. Si estas crecientes llegan a golpear las paredes de los depósitos de jales, podría ocurrir un colapso y una dispersión de materiales con muy alto potencial tóxico.

## CONCLUSIONES

En la zona hay muchas descargas de agua subterránea intermitente y perenne. El alto grado de conservación se refleja en el flujo que sostienen los manantiales todo el año, tanto los que se encuentran en medio fracturado en partes altas como los que circulan por las calizas karstificadas. Las cuencas altas del río Santa María mantienen un flujo base considerable de cerca de  $1000 \text{ l/s}$ , sobre todo por la descarga del manantial El Ojo de Agua. Esta agua abastece de agua a miles de habitantes que viven en el medio y bajo Pánuco, así mismo, los escurrimientos máximos son un gran riesgo a esta misma población.

Se han registrado eventos meteorológicos extremos que han provocado deslaves y aislamiento de las comunidades debido al bajo grado de desarrollo incrementado por las dificultades de adaptación de infraestructura por los fuertes cambios de elevación en espacios cortos. Los eventos de lluvia extrema han influido negativamente en los medios de producción de la población ya que afectan las terrazas fluviales que son las únicas zonas de cultivo en la región.

Los depósitos de residuos mineros La Aurora sin duda representan el principal punto de atención ante riesgos hidrológicos por dos razones: el principal camino de Xichú pasa encima de ellos y las crecidas pueden golpear las paredes favoreciendo la remoción de materiales. Esta situación debería analizarse con detalle y atenderse de inmediato. Se requiere desarrollar un proyecto integral para conocer los riesgos hidrológicos en la zona a través de la instrumentación hidro-meteorológica.

El potencial hidrológico de la zona lo ha llevado a que se le considere la principal reserva de agua del estado de Guanajuato. Existe suficiente agua para abasto, tan solo el manantial El Ojo de Agua es la principal fuente a proteger, otorga  $30 \text{ Mm}^3$  de agua potable, sin embargo, las condiciones fisiográficas han limitado el desarrollo de infraestructura y la mayoría de la población no cuenta con accesibilidad al agua potable. Se sugieren como opciones viables para abasto a esta región, la cosecha de agua de lluvia y la adaptación de los bordos de captación que ya existen.

## AGRADECIMIENTOS

A los habitantes de la comunidad de Palomas, especialmente a la familia del Sr. Ángel González Olvera y al director de la División de Ingenierías, Dr. Luis Enrique Mendoza Puga, y del Departamento de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, Dr. Gilberto Carreño Aguilera, por las facilidades otorgadas.

## REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61(1), 19-40.
- Barrera Escoda, A. (2004). Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Barcelona: Programa de doctorado de Astronomía y Meteorología (Bienio 2002-2004). Grupo de Análisis de Situaciones Meteorológicas Adversas (GAMA). Universidad de Barcelona Departamento de Astronomía y Meteorología.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.) (2008). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (210 pp.). Geneva: IPCC Secretariat.
- Björn, T., Steidl, J., Dietrich, O., & Lischeid, G. (2011). Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes. *Journal of Hydrology*, 408(3), 296-307.
- Carrillo-Chávez, A., Salas-Megchún, E., Levresse, G., Muñoz-Torres, C., Pérez-Arvizu, O., & Gerke, T. (2014). Geochemistry and mineralogy of mine-waste material from a "skarn-type" deposit in central Mexico: Modeling geochemical controls of metals in the surface environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 28-36.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (2000). *Sinopsis del estudio de prospección hidrogeológica del acuífero de Xichú, Gto.* (69 pp.). México: CEAG. Recuperado el 14 de junio 2016 de [www.ceag.gto.mx](http://www.ceag.gto.mx)
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2011). *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México* (87 pp.). Tlalpan, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 30 julio 2012 de [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)

- De Luque Söllheim, A. L., & Martín Esquivel, J. L. (2011). *Procesamiento de datos de estaciones meteorológicas de Gran Canaria para analizar tendencias de temperaturas en el contexto de cambio climático*. España: Gobierno de Canarias / Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (29 de agosto, 2013). *Decreto por el que se establece la reserva parcial de aguas nacionales superficiales para destinarse a los usos doméstico y público urbano, en la zona que ocupan las cuencas hidrológicas Río Moctezuma 1, Río Extóraz y Río Santa María 3*.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (20 de octubre de 2000). NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad a tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Norma Oficial Mexicana, Secretaría de Salud.
- Estrada, F., Martínez-López, B., Conde, C., & Gay-García, C. (2012). The new national climate change documents of Mexico: what do the regional climate change scenarios represent? *Climatic Change*, 110(3), 1029-1046.
- Gay Alaniz, L., Martínez, M., Guevara Escobar, A., & Luna Zúñiga, F. (2010). Captación pluvial y reutilización de aguas grises mediante humedales artificiales en la microcuenca La Soledad, Guanajuato. *Ciencia@UAQ*, 3(2), 3-12.
- Gil Antonio, M. A., Reyes Hernández, H., H., Márquez Mireles, L. E., & Cardona Benavides, A. (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y Ciencia*, 22(63), 67-73.
- Gleick, P. H. (2010). Climate change, exponential curves, water resources, and unprecedented threats to humanity. *Climate change*, 100, 125-129. doi: 10.1007/s10584-010-9831-8
- Gomes, U. F., Heller, L., & Pena, J. (2012). A national program for large scale rainwater harvesting: An individual or public responsibility? *Water Resour. Manag.*, 26(9), 2703-2714.
- Gu, N., & Wang, X. (2012). *Computational Design Methods and Technology Applications in CAD, CAM and CAE Education*. USA: Hesley PA.
- Guerrero-Aguilar, A. (2015). *Caracterización de la lixiviación de arsénico y propuestas de remediación de residuos mineros en la mina La Aurora, Xichú* (Tesis de licenciatura). Universidad de Guanajuato: México.
- Hergt, T., Carrillo-Rivera, J., Morales-Manilla, L. M., Ángeles-Serrano, G., Antalia González-Abraham, A., & Rosales Lagarde, L. (2002) Relación de las condiciones geo hidrológicas y su relación con el bosque: en la Sierra Gorda de Querétaro. *Informe Técnico para Instituto de Ecología* (59 pp.).
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2015). *Extractor rápido de información climatológica (ERIC III)*. Jiutepec, Mor., México: IMTA.
- Liaw, C. H., & Chiang, Y. C. (2014). Dimensionless analysis for designing domestic rainwater harvesting systems at the regional level in northern Taiwan. *Water*, 6(12), 3913-3933.
- Lugo-Hubp, J. (1990). El Relieve de la República Mexicana. *Revista Instituto de Geología*, 9(1), 82-111.
- Magaña, V., & Caetano, E. (2007). Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. *Informe Final de Proyecto* (41 pp.). INE/A1-006/2007.
- Martínez Arredondo, J. C., Ortega-Chávez, V. M., & Ramos Arroyo, Y. R. (2013). Índices climatológicos regionales para la Sierra Gorda de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 23(6), 10-25.
- Miranda-Gasca, M. A. (1978). Estudio geológico-geoquímico regional del área de Xichú, estado de Guanajuato. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XXXIX(2), 101-106.
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H., & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 395-410.
- Periódico Oficial Estado de Guanajuato (POEG). (2012). En internet 1/11/2016 2012\_SEDESHU\_Acuerdo Padron de Pueblos y Comunidades Indígenas del Estado.pdf
- Programa Estatal Hidráulico (PEH). (2015). México: Gobierno del Estado de Guanajuato / Comisión Nacional del Agua / Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales A.C.
- Puntoriero, M. L., Volpedo, A. V., & Fernandez-Cirelli, A. (2014). Riesgo para la población rural en zonas con alto contenido de arsénico en agua. *Acta Toxicol. Argent.*, 22(1), 15-22.
- Ramos-Arroyo, Y., Guerrero-Aguilar, A., Cano-Rodríguez, I., Gutiérrez-Valtierra, M., & Miranda Avilés, R. (2016). Arsenic liberation from mine wastes derived of skarn deposits at Sierra Madre Oriental, México. *Procedia Earth and Planetary Science. 15th Water-Rock Interaction International Symposium*.
- Sámano-Romero, G., Mautner, M., Alma Chávez-Mejía, A., & Blanca Jiménez-Cisneros, B. (2016). Assessing Marginalized Communities in Mexico for Implementation of Rainwater Catchment Systems. *Water*, 8(4), 140. doi: 10.3390/w8040140
- Sánchez González, D. (2011). Peligrosidad y exposición a los ciclones tropicales en ciudades del Golfo de México. El caso de Tampico. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 151-170.
- Sandoval, R. (2004). A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato State, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 12(1), 6-13.
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). (2014). *Informe de pobreza y rezago social Xichú*. México: Sedesol. Recuperado el 20 de octubre de 2016 de [http://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2014\\_SEDESOL\\_Informe%20de%20pobreza%20y%20rezago%20social%20Xichu.pdf](http://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2014_SEDESOL_Informe%20de%20pobreza%20y%20rezago%20social%20Xichu.pdf)
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth A B C*, 34(13-16), 776-785.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2009). *Rainwater Harvesting: A Lifeline for Human Well-being; A Report Prepared for UNEP by Stockholm Environment Institute*. United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya.
- Ward, A. D., & Trimble, S. W. (2003). *Environmental Hydrology*. Second Edition CRC Press.502. Recuperado de <https://www.crcpress.com/Environmental-Hydrology-Third-Edition/Ward-Timble-Burkhard-Lyon/p/book/9781466589414>