

PERSPECTIVA DE MEMORIA HISTÓRICA DE LOS RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN GUANAJUATO CAPITAL

Martínez Arredondo Julio Cesar¹ Mora Rodríguez José de Jesús¹

Ramos Arroyo Yann René¹ Dzul García, Oscar A² Hotchkiss Rollin³

¹ Departamento de Ingeniería en Geomatica e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Av. Juárez 77, Centro, Gto, Gto. CP 36000, Tel 4731020100

² Unidad Académica de Ingenierías, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde No. 801, Centro, Zacatecas, Zac. CP 98000

³ Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, Ut. 84602-4028

¹juma_che@hotmail.com; ¹jesusmora@ugto.mx; ¹yannramos@yahoo.com.mx; ²oadzul@yahoo.com.mx; ³rh@byu.edu

Introducción

Históricamente la Ciudad de Guanajuato ha estado expuesta a eventos climáticos y meteorológicos extremos que han devastado la ciudad en más de 30 veces. Entre 1710 y 1730 se presentó una sequía extrema en todo el Bajío y en la Sierra de Guanajuato, lo cual provocó hambruna, peste y la quiebra de las empresas mineras. En 1760 y 1905 se registran las inundaciones más catastróficas que dejaron cientos de muertos y miles de pérdidas materiales (Figura 1). Actualmente, la población ignora del notable desarrollo de obras hidráulicas que se han construido desde hace más de 300 años y que han salvado a la ciudad de la sequía y las inundaciones (Figura 2). A mediados del siglo XIX, Lucio Marmolejo relata efemérides sobre eventos sociales y políticos de la ciudad, pero, también aportó muchos datos que hablan sobre los riesgos hidrológicos a los que esta sometida la ciudad. En la Figura 1 se presentan los eventos más fuertes registrados en la ciudad de Guanajuato. Con un análisis histórico y mediante herramientas de modelación hidrológica se pretende conocer el estado de los escurrimientos máximos que pueden suceder en el Río Pastita que es la cuenca urbana de la ciudad de Guanajuato y que se desvía por el túnel El Cuajin, inaugurado en 1908, tres años después de la inundación terrible de 1905

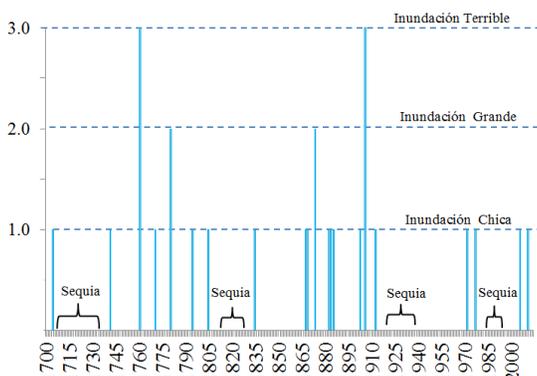


Figura 1. Eventos climáticos y meteorológicos registrados en la Ciudad de Guanajuato.



Figura 2. Obra de desviación "Porfirio Díaz" 1906.

A principios del siglo XX, el Ingeniero Ponciano Aguilar diseñó el túnel, estimando un gasto máximo de $120 \text{ m}^3/\text{s}$, en los 70's del mismo siglo, Ramos-Salinas recalcula este gasto y obtiene un gasto máximo de $107 \text{ m}^3/\text{s}$. En el 2012 se calculó un gasto de $98 \text{ m}^3/\text{s}$ mediante un software de simulación, en una colaboración universitaria internacional entre la Universidad de Guanajuato, Universidad Autónoma de Zacatecas por parte de México y Brigham Young University, Provo Utah, Estados Unidos.

Mucha gente de la ciudad ignora sobre las obras hidráulicas construidas a lo largo del tiempo y que ayudan a minimizar los impactos del escurrimiento en años con exceso de agua y salvan de inundaciones. Se debe de informar y crear cultura de los riesgos hidrológicos ya que se está expuesto a eventos con periodos de retorno de cientos y miles de años. Es papel del ingeniero rescatar la memoria histórica como herramienta para describir las dinámicas del paisaje y del escurrimiento máximo. A través de estas colaboraciones interdisciplinarias, nacionales e internacionales, se pretende crear una cultura

hídrica y rescatar información histórica que proporciona datos representativos de los eventos meteorológicos y climáticos que impactan en una región cuyos recursos naturales han estado bajo presión intensa desde hace más de 400 años.

En Febrero de 2010 se registraron lluvias invernales que dejaron más de 200 mm en la región de Guanajuato, lo que significa más de 10 veces lo normal de 30 años (Martínez, 2012). Ligado a estos eventos meteorológicos, la geomorfología de la cuenca es fundamental para evaluar los escurrimientos, influye directamente en los índices de erosión y transporte (Ortega-Chávez, 2010) lo cual también aporta elementos para hacerle frente a los riesgos hidrológicos.

Localización

La Ciudad de Guanajuato se encuentra en la estructura conocida como Sierra de Guanajuato, la cual es una zona de transición entre provincias fisiográficas y climáticas (Figura 3). Esta variante de relieve y clima propicia que los centros poblacionales vivan expuestos a eventos extraordinarios hidrometeorológicos.

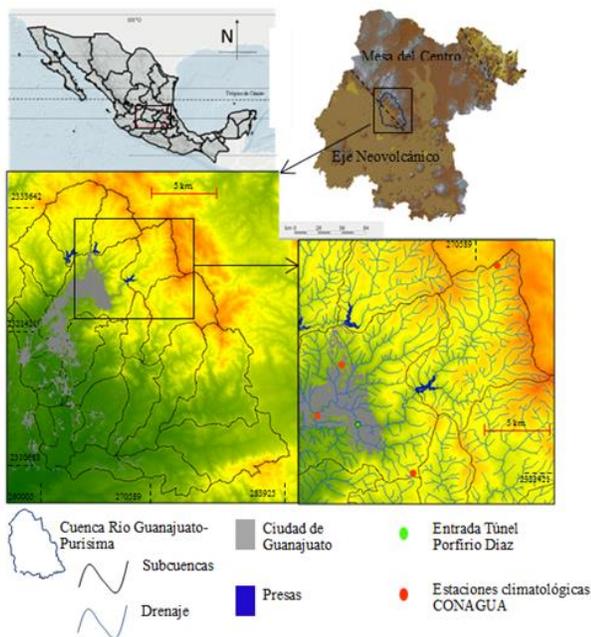


Figura 3. Localización geográfica cuenca del río Guanajuato

Al norte de la sierra se extiende la Mesa Central y al sur el Eje Neovolcánico Transversal. (Lugo, 2008). La falla del bajío es el rasgo estructural que define la transición entre estas dos provincias fisiográficas (Vasallo y col., 1996) las cuales tienen diferente clima, la Sierra de Guanajuato es un regulador de la lluvia, la temperatura y vegetación. En esta estructura nace el río Laja y el río Guanajuato, los cuales representan más del 70% de la hidrografía del estado y son

aportes importantes del sistema hidrológico Lerma Chapala. En la región se presentan lluvias frontales y convectivas, estas dinámicas se fortalece por el efecto orográfico, hay más de 1000 metros de gradiente topográfico en la subcuenca del río Guanajuato-La Purísima (Figura 3). La Ciudad de Guanajuato tiene una precipitación media de 708 mm con máximos en la sierra de 2210 mm y mínimos de 220 mm en el valle (Martínez, 2012). Los efectos de estas condiciones ponen en riesgo a la población de la ciudad y los medios de producción. El cambio de uso de suelo ha sido muy fuerte, históricamente la minería, el sobrepastoreo y la deforestación han incrementan los riesgos hidrológicos.

Objetivos

Usar la memoria histórica y la modelación hidrológica como herramientas para generar una menor vulnerabilidad frente a los riesgos hidrológicos y del cambio climático.

Integrar proyectos interdisciplinarios del agua con el fin de fortalecer las estrategias de adaptación y minimización del cambio climático.

Determinar las dinámicas hidrológicas superficiales en cuencas urbanas para la prevención de riesgos hidrológicos que afectan la infraestructura y a la población de Guanajuato.

Metodología

A través de un proyecto de colaboración estudiantil entre la Brigham Young University, Universidad Autónoma de Zacatecas y la Universidad de Guanajuato, se determinaron escurrimientos pico de las cuencas urbanas de Guanajuato, y con la herramienta computacional WMS© (Watershed Modeling System) de AQUAVEO™ se calculó el gasto máximo y el hidrograma de salida. Se simularon diferentes escenarios de riesgos hidrológicos, en este texto solo se presentan resultados de la caracterización hidrológica y los gastos máximos esperados para 10 y 100 años de período de retorno. Con la red de estaciones climatológicas de CONAGUA se identificaron las más próximas y con los registros históricos de lluvia se obtuvieron las precipitaciones máximas en 24 horas. El cálculo de las lluvias máximas esperadas (P) para las diferentes duraciones (d) y periodos de retorno (T) se realizó a partir de la siguiente fórmula:

$$P = e^{az+pd} d^n \quad (1)$$

Se decidió realizar un ajuste de datos por mes, donde a una precipitación se le asignó una probabilidad dependiendo de las veces que se había excedido en el registro de ese mes. Ejemplo: En el mes de julio, 48 veces llovió >30 mm en un día, en 33 años de registro de una estación. La probabilidad de que llueva >30 mm en al menos un día de julio en un año cualquiera es:

$$P = 1 - e^{-48/33} = 0.766$$

Lo anterior se realizó para cada mes y se calculó una probabilidad anual para varias precipitaciones arbitrarias. Con estos datos para diversas duraciones (24, 48, 72, 96 y 120 horas) se ajustó el modelo para calcular las curvas intensidad-duración-periodo de retorno (i-d-T). Con mapas temáticos de INEGI escala 1:50,000 e imágenes satelitales se clasificó el uso de suelo y tipo de suelo, el cual influye directamente en los escurrimientos. Los valores obtenidos fueron a una escala de resolución 1:10,000. De los factores que intervienen directamente en el escurrimiento se analizaron los mapas de:

- Uso de Suelo
- Tipo de Suelo
- Precipitación
- Geología
- de la Pendiente

A partir del modelo digital de elevación y de los puntos de salida de las cuencas se realizó la delimitación de la cuenca y se determinó las propiedades geométricas y geomorfológicas. Empleando el modelo HEC-HMS y la información de la precipitación se determinaron los hidrográmas.

Sobre la información histórica consultada sobre los riesgos hidrológicos se visitó la Biblioteca Armando Olivares de la Universidad de Guanajuato, ahí se encuentran libros que han rescatado la memoria histórica social, cultural y política, también se describen fenómenos meteorológicos y climáticos que han influido en el desarrollo de la sociedad de Guanajuato y sus alrededores.

Resultados

En la Figura 4 se presentan las curvas i-d-T las cuales nos indican la lluvia acumulada en 120 horas con diferentes periodos de retorno. El valor máximo esperado es de 610 mm en poco más de cuatro días, lo que significa más del 80% de la lluvia esperada en un año. Con esta lluvia máxima probable en 100 años y en 10 años se estimaron los escurrimientos máximos y el hidrograma de salida, que arroja el programa WMS©. En la Tabla 1 se presentan los factores morfológicos de la cuenca.

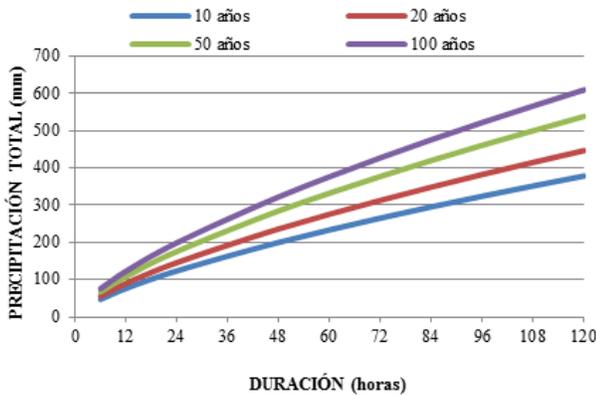


Figura 4. Curvas i-d-T para la estación Santa Rosa Mineral

En la Figura 5 se presentan las isoyetas de la precipitación normal anual sobre la cuenca Monte de San Nicolás, se nota una influencia de la altitud. Hay una diferencia de más de 100 mm entre la parte más baja y más alta. Esta cuenca es estratégica para conocer le potencial de escurrimiento y evitar los riesgos hidrológicos. Actualmente esta cuenca tiene actividad minera y el deterioro de los servicios ambientales está generando que se incremente el riesgo por sequías y avenidas máximas.

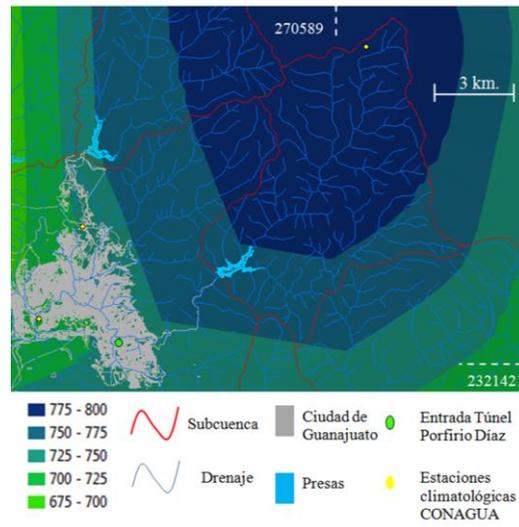


Figura 5. Distribución de la precipitación anual [mm].

Debido a que los coeficientes de escurrimiento varían en el tiempo y en el espacio, a través de esta herramienta y los tipos de suelo, en la Tabla 2, se propusieron valores del número de curva (N) para diferentes estados de humedad, las categorías son: seco, normal y saturado. En la Tabla 3 se presenta estos valores y los gastos máximos obtenidos.

Las características morfológicas de la cuenca permiten conocer la respuesta de la superficie ante una tormenta. Con estos parámetros se calcularon los tiempos de concentración y tiempos picos. Para implementar un sistema de alertamiento es necesario conocer estos parámetros de manera puntual y su variación en el espacio.

La cuenca en estudio tiene un uso de suelo que va de los bosques de encino, pastizales y agricultura de temporal, los pastizales erosionados son los que predominan en la zona media y baja de la cuenca, solo un 30% esta cubierto de bosque. Aunque existen localidades dentro de la cuenca, éstas no afectan a gran escala al escurrimiento. Sin embargo, la infraestructura minera que se desarrolla dentro de la cuenca si afecta, por ejemplo, las presas de jales mineros y las exploraciones.

Tabla 1. Características físicas de la cuenca Monte de San Nicolás

Área (km ²)	23.02
Pendiente de la cuenca	0.329
Flujo superficial	0.18
Porcentaje orientado Norte	0.44
Porcentaje orientado al Sur	0.56
Distancia máxima de flujo (km)	8.57
Pendiente máxima de flujo	0.062
Longitud máxima de corriente (km)	8.1
Pendiente máxima de corriente	0.053
Longitud de la cuenca (km)	7.22
Perímetro de la cuenca (km)	31.02
Factor de Forma	2.26
Factor de sinuosidad	1.12
Elevación media (msnm)	2444

Tabla 2. Numero de Curva según tipo de suelo

Tipo de Suelo	Grupo Hidrológico	
	B	C
Ciudad	92	94
Agricultura	80	87
Bosques	60	70
Pastizales	62	74
Pastizales con Erosión Leve	69	79
Pastizales con Erosión Moderado	80	87

En las Figura 6 y 7 se presenta el hidrográma de salida de dos de las cuencas que aportan al centro de la ciudad, con periodos de retorno de 10 y 100 años. Muchas de las obras hidráulicas construidas siglos atrás, llegaron a su vida útil, sin embargo, hay obras de desviación y presas que aún se mantienen trabajando y salvando a la población de inundaciones y sequías. Con este estudio se pretende recobrar el uso de la memoria histórica y reforzar con las herramientas de modelación que existen para evaluar el estado actual de las cuencas urbanas y de obras hidráulicas históricas. En ambas Figuras se puede observar los hidrográmas de salida alcanzando valore máximos de 85 m³/s y 9 m³/s estas dos cuencas son las que entran al túnel Porfirio Díaz.

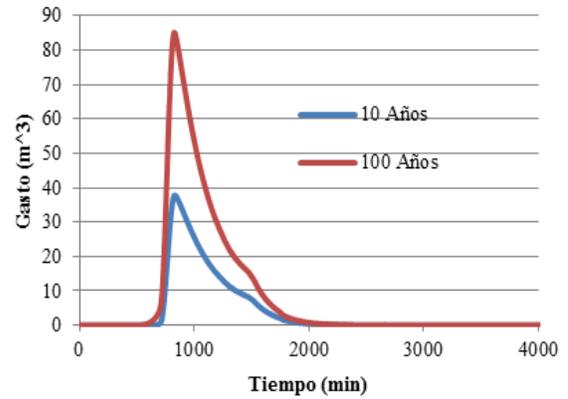


Figura 6. Hidrogramas y gasto pico, cuenca Monte de San Nicolás

Los Hidrográmas de la Figura 8 son una simulación en la que se considera que toda la cuenca estuviese bajo un uso de suelo de características poco permeables, el grupo hidráulico determina las capacidades de infiltración del suelo (Tabla 1).

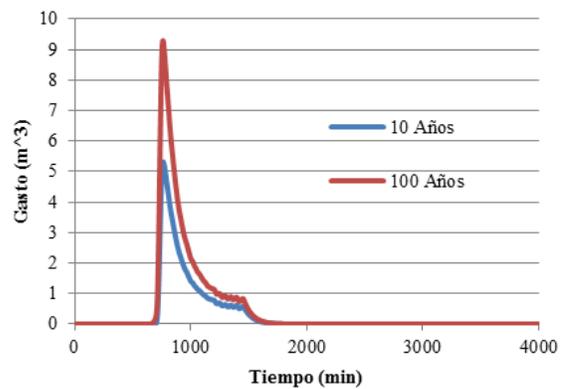


Figura 7. Hidrogramas y gasto pico, cuenca Presa de la Olla

En la Tabla 3 se muestra los valores de N y las condiciones del terreno, presentándose esta variación en cada una de las estaciones del año. Estos valores de gasto se determinaron para la salida de la ciudad, es decir que el área de captación aumenta a 48.7 km² y se hace con una lluvia de 100 años de retorno.

Tabla 3. Numero de Curva Compuesto, CN, cuenca Monte de San Nicolás

Condición	Seco	Normal	Saturado
CN	78	90	96
Gasto Máximo (m ³ /s)	155.5	196.6	211.4

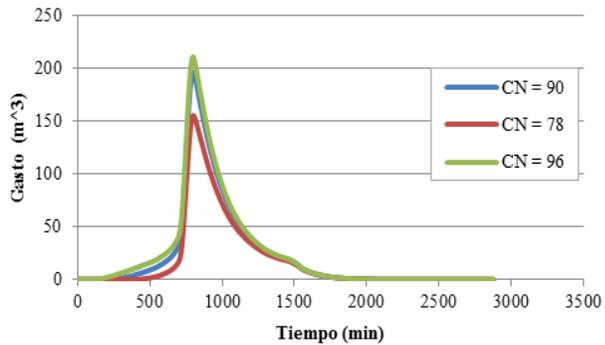


Figura 8. Hidrogramas para los valores propuestos de N

Conclusiones

Debido a las condiciones fisiográficas e hidrológicas de la región, la Ciudad de Guanajuato ha estado en constante lucha con eventos hidrometeorológicos extremos, por lo que ha desarrollado notable infraestructura hidráulica. Este tipo de eventos y la memoria histórica deben de servir para preparar a la población y conocer el grado de vulnerabilidad de la ciudad.

Con el modelado hidrológico se calculó un gasto máximo en la entrada del túnel Porfirio Díaz de $98 \text{ m}^3/\text{s}$ una diferencia de 20 m^3 con respecto a lo que calculó el Ingeniero Ponciano Aguilar a principios del siglo XX. Con esta herramienta de modelación se obtuvieron los hidrogramas de salida del gasto producido en una cuenca erosionada en la parte baja y con la actividad minera se influye en la dinámica del escurrimiento. El manejo de los programas de cómputo para determinar los hidrogramas es una gran herramienta, no obstante se debe de enseñar en la academia de ingeniería la importancia de las técnicas base, ya que son un eje para seguir desarrollando nuevas metodologías.

Es importante evaluar los peligros y riesgos hidrológicos. A lo largo de la historia de una ciudad o región, los ingenieros han tenido que desarrollar y aplicar metodologías que ayuden a minimizar el impacto de los eventos climáticos y meteorológicos extremos. Recobrar la memoria histórica es una herramienta importante en la implementación de medidas ante el cambio climático.

Actualmente la urbanización en zonas donde el suelo no tiene ese potencial, incrementa la vulnerabilidad ante las contingencias climáticas y meteorológicas.

Es importante mantener lazos de comunicación y colaboración con universidades nacionales e internacionales, la convivencia de alumnos y profesores, además de compartir una visión integral en los estudiantes de ingeniería.

Referencias

1. **Lugo Hubp** (1993). "Relieve de la República Mexicana" Revista Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de México.
2. **Martínez Arredondo JC.** (2012). "Determinación de la influencia de las condiciones hidrológicas y climáticas en el escurrimiento base de la cuenca

Esperanza-Soledad-Santana, del sistema hidrológico río Guanajuato". *Tesis de Maestría Ciencias del Agua. Division de Ingenierías Universidad de Guanajuato.* Guanajuato México.

3. **Ortega Chávez VM.** (2010). "Mapeo geomorfológico para la determinación del peligro por erosión hídrica acelerada en la cuenca del río Guanajuato". *Tesis de Maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.* Ciudad Universitaria, México.
4. **"El agua en la ciudad de Guanajuato, problema de siglos"** Gobierno del Estado, Secretaría de Programación 1983, Guanajuato, Guanajuato. México.
5. **"Breves históricos del agua en la ciudad de Guanajuato"** Especial Aqua fórum, 39-40
6. **Vasallo L. F, Martínez-Reyes J, Paris J.P.** 1996 Estructuras circulares y lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, y su significado en la prospección minera. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 13, número 2, p 252-257.
7. **Mapas temáticos**, escala 1:50000. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.* México