

Geological hazards in the vicinity of the San Renovato Dam based on geological-structural characterization, Guanajuato, Mexico.

Peligros geológicos en las inmediaciones de la Presa San Renovato con base en una caracterización geológico-estructural, Guanajuato, México

Edgar Angeles-Moreno¹, Pamela Ramírez-Torres¹, Diana Gabriela Martínez-Romero¹, Miguel Ángel Herrera-Bermudez², Isidro Loza-Aguirre¹

¹ Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato.

² Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.
e.angeles@ugto.mx

Resumen

La Presa San Renovato es una represa ubicada en la parte oriente de la Ciudad de Guanajuato construida entre 1832 a 1852. Las laderas rocosas que rodean a la presa están formadas por las formaciones geológicas del Conglomerado Guanajuato, Losero y La Bufa; así como por discontinuidades geológicas importantes como fracturas, fallas y discordancias. El desarrollo urbano es evidente en lagunas laderas, y hay varias construcciones históricas que son patrimonio cultural, por lo que es importante mostrar las características geológicas de estas laderas y definir los posibles peligros geológicos. En este trabajo se evalúan las características geológico-estructurales de las laderas rocosas que rodean a la Presa San Renovato y los peligros geológicos asociados. Las metodologías y técnicas empleadas comprendieron cartografía geológica, geología de campo, colecta de datos de geología estructural, análisis estructural y la determinación de posibles zonas de peligros geológicos que pueden ser desencadenados directa o indirectamente por las características geológicas encontradas. Los resultados muestran que en las laderas de la Presa San Renovato, los escarpes rocosos, los derrumbes de rocas y desprendimientos de bloques de rocas son el resultado de la existencia tres grupos de fracturas y fallas geológicas: Cerro de la Bolita, San Renovato y El Faro. Estos grupos de fracturas y fallas definen una zona de acomodo estructural y son diferentes en sus características geológico-estructurales, ya que domina una dirección y cinemática de las fallas, para el grupo de Cerro de la Bolita dominan direcciones NW-SE y N-S, las orientaciones varían de N30°W a N20°W con echados de 65° a 90° al SW y NE; las fracturas y fallas N-S tienen variaciones en rumbos de N20°W a N20°E con echados de 65° a 80° al SE o NW. En el grupo de San Renovato domina una dirección NE-SW con una orientación que varía de N30°E a N50°E y echados que varían entre 90° a 30° al SE y en el grupo de El Faro dominan orientaciones E-W y N-S, pero también hay orientaciones NE-SW y NW-SE. Los resultados de análisis cinemático muestran que las fallas de los tres grupos han tenido movimientos de fallamiento oblicuo y después fallamiento de tipo normal. La presencia de canteras a lo largo de la Formación Losero que es el contacto entre el Conglomerado Guanajuato y la Formación La Bufa origina otro factor de inestabilidad que se suma con la presencia de las fallas y fracturas. Los tipos de fracturas detectados como extensionales y cizalla están en relación con las dimensiones y forma de bloques que dependen de las orientaciones, el número de grupos y la extensión de las fracturas. Estas características definen la presencia peligros y riesgos geológicos como derrumbes de roca de pie de talud, bloques desprendidos de roca, flujos de detritos y vulnerabilidad ante erosión en las laderas. Algunos de estos peligros geológicos determinados con este trabajo como inestabilidad de taludes de roca, desprendimientos de bloques de roca y posibles bloques de roca puedan llegar al represamiento de la presa o afectar construcciones de patrimonio histórico en la ciudad de Guanajuato.

Palabras clave: fallas; San Renovato; peligros; geológicos; fracturas; Guanajuato.

Introducción

Las laderas montañosas alrededor de la presa San Renovato están constituidas de rocas sedimentarias y volcánicas del Eoceno-Oligoceno que conforman parte de la estratigrafía del Distrito Minero de Guanajuato. Desde la Presa de la Olla viendo hacia el oriente llaman la atención los escarpados macizos rocosos, desprendimiento de bloques de roca y laderas inclinadas en donde está ubicado El Faro. El crecimiento urbano de la ciudad de Guanajuato hacia su parte oriente, acompañado de construcción de viviendas hacia las laderas escarpadas que contienen bloques de roca desprendidos de gran tonelaje, hacen necesario que se conozcan las características geológico-estructurales como presencia de fallas y fracturas geológicas que parecen controlar la presencia de algunos peligros geológicos como deslizamientos, derrumbes de roca y caídos de roca. Los derrumbes y caídos de roca pueden afectar a la represa de San Renovato cuando este llena de agua, ya que una entrada abrupta de un derrumbe de rocas puede provocar un oleaje e inundación de manera intempestiva; este proceso puede afectar a infraestructura como la cortina de la presa y otras construcciones aguas abajo. En la historia, por ejemplo, se recuerda la inundación de 1905 que devastó a Guanajuato y que provocó cambios importantes en la planeación urbana (Audefroy, 2014; Dolores-Lorenzo, 2021). La presencia de las fallas y fracturas en las laderas de los alrededores de la Presa de San Renovato ya se conocen desde épocas del desarrollo de la actividad minera de Guanajuato, ya que muchas fallas y fracturas encajonan a vetas de minerales de plata y oro. En las áreas localizadas aguas abajo de la Presa San Renovato se encuentra la Presa de la Olla, así como construcciones arquitectónicas históricas a lo largo del Paseo de la Presa (Zamora-Ayala & Mejía-Morales, 2017), que son patrimonio cultural de la ciudad. La importancia de los estudios por amenaza y afectación de los procesos geológicos hacia sitios de patrimonio cultural en varias ciudades se ha incrementado en últimos años (López-Doncel *et al.*, 2006; Bonini *et al.*, 2023). En este trabajo se evalúan las características geológico-estructurales de las laderas en los alrededores de la Presa San Renovato mostrando la distribución espacial de las fracturas, tipos de fallas geológicas y se realiza un análisis estructural de estas estructuras geológicas. Al final, se establece una relación de estas características geológico-estructurales con los posibles peligros geológicos que se pueden originar en las laderas de los alrededores de la Presa San Renovato.

Contexto geológico

La zona de estudio está ubicada dentro el Distrito Minero Guanajuato comprende a la Presa San Renovato y sus alrededores (Figura 1), las coordenadas extremas en UTM-WGS84 del área de estudio son: 267251mE, 2324454mN y 268230mE, 2323630mN. Las formaciones rocosas de los alrededores de la Presa San Renovato están constituidas por rocas que pertenecen a las unidades geológicas de las Formaciones: Conglomerado de Guanajuato, Loseros y La Bufa (Figura 1 y Figura 2). En los estudios de la estratigrafía del Distrito Minero de Guanajuato estas formaciones han sido estudiadas en varios trabajos (Wandke & Martínez, 1928; Nieto-Samaniego *et al.*, 2015; Angeles-Moreno, 2018) esto por su importancia económica como rocas que encajonan a las vetas epitermales con oro y plata (Echegoyén-Sánchez *et al.*, 1970). Las fallas geológicas y fracturas asociadas con estas estructuras se han estudiado a lo largo del Distrito Minero de Guanajuato en donde se han encontrado fallas de tipo normales y fallas oblicuas con direcciones NW-SE, NE-SW y N-S (Nieto-Samaniego *et al.*, 2015; Angeles-Moreno, 2018). Estas fallas se han formado en distintos tiempos geológicos desde el Eoceno, luego Oligoceno y por último en el Mioceno, varios trabajos documentan estas edades (Botero-Santa *et al.*, 2015; Angeles-Moreno *et al.*, 2017; Del Río-Varela *et al.*, 2020). Las características geológicas a manera de síntesis son las siguientes:

La Formación Conglomerado de Guanajuato está constituida de una secuencia de conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas con intercalaciones lavas andesíticas de una edad eocénica (Aranda-Gómez & McDowell, 1998). Esta unidad es interpretada de acuerdo con sus características sedimentarias en ambientes de abanicos aluviales y cuencas fluviales (Puy-Alquiza *et al.*, 2017).

La Formación Losero de acuerdo con Puy-Alquiza *et al.* (2014) está constituida de areniscas de tipo litarenitas y arkosas con partículas de origen volcánico con composiciones félsicas y con estructuras sedimentarias (marcas de corriente, rizaduras, laminaciones) formadas en ambientes fluviales poco profundos.

Formación Bufa está compuesta de rocas piroclásticas (algunas ignimbritas) que representaron flujos piroclásticos con pómez y ceniza volcánica de composición riolítica (Nieto-Samaniego *et al.*, 2015). Estas rocas representaron erupciones volcánicas explosivas.

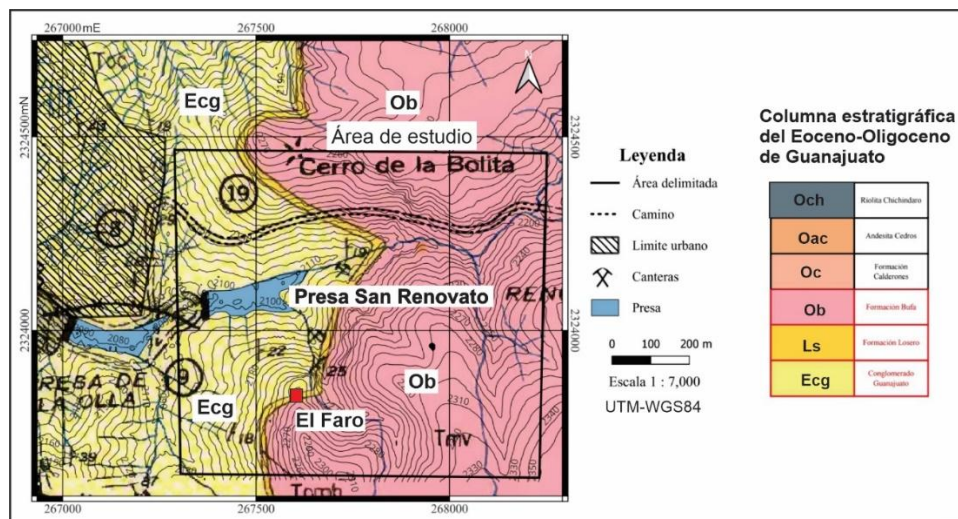


Figura 1. Área de estudio y contexto geológico (Modificada de Carta geológica de Edwards, 1955).

Presas San Renovato

La Presa San Renovato se encuentra a lo largo del arroyo nombrado arroyo de la Olla pertenece a la cuenca hídrica del río Guanajuato (Figura 1). Esta presa fue construida entre 1850 y 1852 para suministro de agua y también como control de avenidas de las aguas hacia la Presa de la Olla (Vidaurre-Aréchiga, 2020). La Presa de la Olla se construyó entre los años de 1741 a 1749 por el Ayuntamiento de la entonces Villa de Guanajuato para almacenar y aprovechar el agua; esta presa se asentó en el paraje conocido como Rancho de la Hoya Grande (Vidaurre-Aréchiga, 2020). La comunicación entre las aguas de ambas presas ocurrió a finales del siglo XIX (Vidaurre-Aréchiga, 2020). Enfrente de la cortina de la Presa San Renovato se encuentra el jardín de las Acacias que cubre la conexión entre las presas. El vaso de la presa de San Renovato contiene material de azolve y actualmente se desconoce la cantidad de sedimento que contiene, pero en época de secas se observa que presenta un nivel alto de sedimentos. La corona de la cortina de la presa ha sido rebasada por avenidas de agua en varias ocasiones, esto durante lluvias intensas como lo atestiguan inundaciones históricas de la ciudad de Guanajuato que han ocurrido desde el siglo XVII (González, 1905), a veces trágicas, como la inundación de la ciudad en 1905 (González, 1905).

En la laderas sur y suroriente del vaso de la Presa de San Renovato se pueden observar taludes con inclinaciones verticales y se observan los terreros de pedacería de varias canteras de roca arenisca de color verde de la Formación Loseros ubicadas en el pie de los taludes (Figura 2). Los taludes rocosos presentan varias fracturas y fallas geológicas que en este trabajo se estudiaron. Las canteras existentes se han estudiado desde el enfoque litológico, petrofísico, y químico-mineralógico (Puy-Alquiza *et al.*, 2013), esto por su importancia para los edificios arquitectónicos históricos de la ciudad de Guanajuato y que son patrimonio cultural por la UNESCO. De acuerdo con Alcocer-Martínez (1983) la actividad de las canteras parece haber iniciado desde el siglo XVI, alcanzando su máximo punto de extracción de roca en la época del porfiriato y todavía hoy día continúa la actividad en el Cerro de El Tepozán para restauración de edificios históricos (Puy-Alquiza *et al.*, 2013).

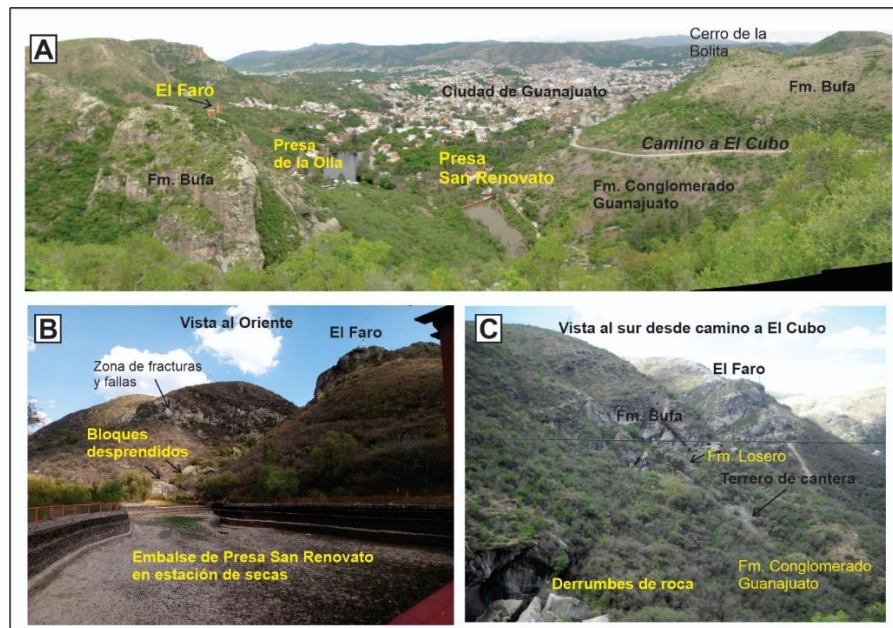


Figura 2. Laderas y taludes rocosos alrededor de la Presa San Renovato. A. Vista en dirección poniente, se observa la barranca de la Olla. B. Vista hacia dirección oriente taludes rocosos en rocas de la Formación Bufo en zona fracturada. C. Formaciones geológicas Conglomerado Guanajuato, Losero y Bufo, con terreros de roca de minas de cantera.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Metodología

En este trabajo para lograr el objetivo principal de la caracterización geológico estructural de las laderas de los alrededores de la Presa San Renovato. Se aplicaron las siguientes metodologías (Figura 3): compilación de información geológica, fotointerpretación geológica de imágenes de satélite de Google Earth, cartografía geológica digital, geología de campo, colecta de datos geológico-estructurales con su análisis estructural y reconocimiento de peligros geológicos. Se empleó la cartografía geológica existente de los trabajos de Edwards (1955) para analizar el contacto entre la Formación Losero con el Conglomerado y la Formación Bufo. Se realizó una fotointerpretación geológica de imágenes de Google Earth interpretando lineamientos estructurales y contactos litológicos para el área de estudio empleando algunos principios de Guerra-Peña (2003). Se llevo a cabo un trabajo de campo con una cartografía geológica digital a escala 1:5000. Las metodologías de geología de campo son las propuestas en varios documentos (Compton, 1985; Barnes & Lisle, 2004; Silva-Romo *et al.*, 2001). La colecta de datos estructurales en campo se realizó empleando brújula tipo Brunton, un receptor GPS y colocación de puntos con estaciones de observaciones geológicas en un mapa base topográfico.

Para cada superficie de fractura se registraron los datos de orientación de rumbo y echado (buzamiento). En el caso de fallas se colectó rumbo, echado, así como la presencia de estrías, indicadores cinemáticos (como escalones de falla), y la dirección y sentido de desplazamiento en conjunto con el dato de ángulo de pitch o rake de la estría. Los datos de geología estructural de campo se registraron e integraron en una carta geológico-estructural para entender la distribución espacial de las estructuras y sus relaciones geométricas.

El análisis estructural consistió en el registro y procesamiento de datos, clasificación de las estructuras, y la integración de datos con su análisis. El registro se realizó en hojas de cálculo (Excel). Los datos estructurales fueron procesados en proyecciones estereográficas con el apoyo de los softwares stereonet y faultkin (Allmendinger *et al.*, 2012). Algunos de los criterios empleados en el análisis estructural de las fracturas y fallas fueron la influencia de la litología, orientación, cinemática, relaciones geométricas y relaciones de corte.

El reconocimiento de los peligros geológicos se realizó con base en que el peligro natural es una componente del riesgo socionatural (componentes del riesgo: peligro, vulnerabilidad, exposición y resiliencia) (UNISDR, 2009). De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de la ONU (UNISDR) de 2009, “un peligro geológico es un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales”. Los peligros geológicos tienen sus propias características geológicas que dependerán de sus relaciones ambientales con otros factores naturales como, por ejemplo, topográficos, climáticos, hidrológicos u otros aspectos ambientales. En este trabajo se aplicaron estas definiciones y relaciones para reconocer peligros geológicos en el área de estudio.

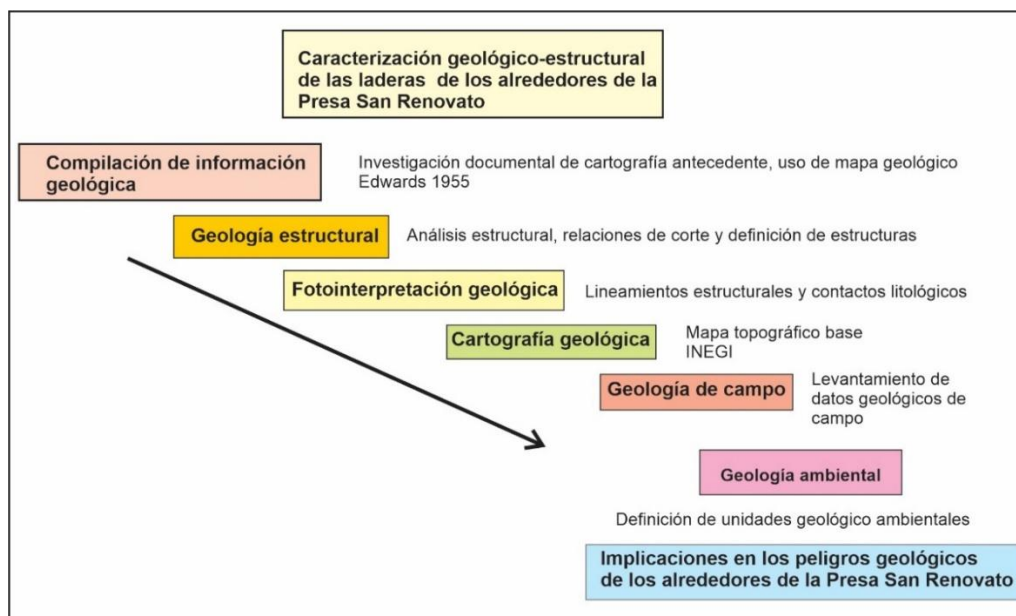


Figura 3. Esquema metodológico del trabajo de investigación.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Resultados

En este trabajo para lograr el objetivo principal se aplicaron las metodologías mencionadas en la sección anterior, definiéndose las siguientes unidades geológico-ambientales de los alrededores de la Presa San Renovato. De igual manera se muestran los resultados del análisis estructural de los datos geológico-estructurales y los posibles peligros geológicos.

Unidades geológico-ambientales

Las Formaciones geológicas que se encuentran en las laderas de los alrededores de la Presa San Renovato son: la Formación Conglomerado Guanajuato, Formación Losero y Formación Bufo (Figura 4). Se reconocen adicionalmente varias unidades geológico-ambientales como unidad de depósitos de talud, unidad de terreros de cantera, depósito de bloques de roca, suelos erosionados y zona de inundación (Figura 4).

Formación Conglomerado Guanajuato. Esta unidad es el basamento del vaso de la Presa, está formado de conglomerados, areniscas y areniscas conglomeráticas, y en menor cantidad de limolitas. Las partículas sedimentarias o clastos contenidos son de rocas sedimentarias (areniscas) e ígneas (rocas volcánicas y granodiorita). De acuerdo con Puy-Alquiza *et al.* (2017) los clastos encontrados son de granito, caliza, riolita, andesita, diorita y arenisca. Las capas están basculadas en general hacia el oriente, con una actitud estructural que varía de $350^{\circ}/22^{\circ}\text{NE}$, N-S con 20°E , los contactos entre capas del conglomerado se observan onduladas con espesores variables. El Conglomerado subyace concordantemente a rocas volcanosedimentarias de la Formación Losero (Figura 4), en la posición de este nivel estratigráfico se observa

que el Conglomerado Guanajuato está compuesto de areniscas de grano fino y limolitas hacia la parte superior.

Formación Losero. Esta formación de acuerdo con Puy-Alquiza et al (2014), está constituida de areniscas de tipo litarenitas y arkosas. En este trabajo se observó en campo areniscas y limolitas tobáceas aparecen sobreyaciendo concordantemente a areniscas y limolitas del Conglomerado Guanajuato. Las estructuras sedimentarias observadas en este trabajo son laminaciones paralelas y laminaciones cruzadas. La edad de esta unidad se desconoce, pero como esta está localizada entre el Conglomerado Guanajuato de 49.1 millones de años (Aranda-Gómez & MacDowell, 1998) y de la Formación La Bufa de 33.53 millones de años (Nieto-Samaniego *et al.*, 2015), su edad estaría entre 49.1 y 33.53 millones de años (Eoceno-Oligoceno).

Formación Bufa. En este trabajo se observó que está compuesta de rocas piroclásticas riolíticas, que presenta variaciones litológicas y texturales desde su cima a la base. En la parte superior en las cercanías con la población de Calderones se presenta como flujo piroclástico con pómez y ceniza con líticos volcánicos de riolita. En la parte intermedia contiene una consolidación mayor, aparece como ignimbrita con mayor cantidad de vidrio volcánico y cristales de cuarzo y feldespatos, en esta parte se confunde con una riolita con textura porfídica. En la zona de El Faro presenta la roca piroclástica bloques volcánicos en una matriz de ceniza volcánica y una apariencia rugosa con estratificación burda y gruesa. A la base se observa el aumento de líticos volcánicos (riolita, dacita, líticos volcánicos cloritizados), volcanoclasticos y fragmentos de areniscas conglomeráticas del Conglomerado Guanajuato; esto origina que la base se considere una brecha piroclástica lítica con matriz arenosa cloritizada. El contacto con la Formación Loseros es una discordancia erosiva con geometría ondulada, se expresa como una superficie de erosión que corta las laminaciones paralelas (estructuras sedimentarias primarias) de las areniscas tobáceas y se observan entrantes de la brecha piroclástica lítica.

Depósitos de talud naturales. Estos depósitos se ubican a la base de los escarpes verticales (Figuras 4 y 5), en el cambio de pendiente del Conglomerado Guanajuato con la Formación Bufa. Están compuestos de bloques de varios tamaños de roca piroclástica riolítica (Formación Bufa) y fragmentos angulosos de areniscas de la Formación Losero.

Depósitos de terreros de cantera. Estos depósitos están localizados en el pie de talud, a la salida y al frente de las canteras de arenisca de la Formación Losero (Figuras 4 y 5). Los fragmentos son pedacitos de areniscas de color verde y rojiza de varios tamaños desde centímetro a metro, con bordes que varían de angulosos a subangulosos. Las canteras de donde se extrajeron estas rocas presentan cavidades con una geometría controlada por la estratificación de las capas de areniscas. Estas canteras son resultado de actividad económica de extracción de placas de roca arenisca para su uso en las construcciones de patrimonio cultural de edificios con valor histórico (Puy-Alquiza *et al.*, 2013).

Bloques desprendidos sobre la ladera y en cañadas. Existe la presencia de grandes bloques de dimensiones variables de aproximadamente entre 8 m³ a 30 m³. Estos bloques son de roca piroclástica riolítica que pertenecen a la Formación Bufa. Los bloques desprendidos llegan hasta las cercanías del embalse de la presa San Renovato y otros están sobre el arroyo de la Olla (Figuras 4 y 5). Se desconoce la mecánica y la edad del desprendimiento, pero las características geológicas-estructurales, como las fallas y fracturas tienen una relación directa con estos desprendimientos.

Suelos erosionados. En las laderas al pie de talud, lo que comprende a los afloramientos del Conglomerado Guanajuato. Se observan relictos de suelo esto debido a proceso de erosión intensa. Los suelos presentan espesor delgado.

Zonas de inundación. Las zonas propensas a inundación se encuentran ubicadas a lo largo del arroyo de la Olla y en el vaso de la presa de San Renovato. Existen depósitos de grava y arena aluviales a otros niveles de elevación por encima del cauce actual del arroyo de la Olla, y también existen algunas estructuras de retención, pero si son pocas y debido al encajonamiento natural de la cañada es propensa a avenidas repentinas. Se observaron grandes bloques de roca desprendidos de los taludes de las partes altas sobre el arroyo. De acuerdo con registros históricos han existido desbordamientos de agua en la cortina de la Presa San Renovato, como también a lo largo de la cañada de la Olla (González, 1905; Dolores-Lorenzo, 2021) y todavía hoy día ocurren con lluvias intensas repentinas o lluvias prolongadas.

Geología estructural

Se realizó un mapa geológico-estructural y análisis estructural de la zona de estudio. De acuerdo con los resultados, en la zona de estudio se evidencia que los escarpes rocosos en la parte alta y alrededor de la Presa San Renovato representan una zona de acomodo estructural y de intersección de varios grupos de fracturas y fallas. Los grupos comprenden las fracturas y fallas del Cerro La Bolita (NW-SE, N-S y NE-SW), las fallas y fracturas San Renovato (NE-SW), el grupo de fracturas y fallas el Faro (E-W, N-S, NE-SW) y posiblemente un grupo de fracturas inducidas por actividad de extracción de piedra de los canteros loseros.

Grupo de fracturas y fallas Cerro de La Bolita

En este trabajo se reconocen en el área de estudio el grupo de fracturas y fallas NW-SE que se ubican en la parte norte del área de estudio (camino de subida al Cubo) y parecen interactuar con el grupo de fracturas y fallas de San Renovato. En el área existen cuatro orientaciones, las NW-SE, N-S, NE-SW y E-W. Las fracturas y fallas NW-SE tienen longitudes mínimas que varían de 100 m a 600m. Las orientaciones varían de N30°W a N20°W con echados de 65° a 90° al SW y NE. Los tipos de falla son normales y oblicuas. Las fracturas y fallas N-S tienen variaciones en rumbos de N20°W a N20°E con echados de 65° a 80° al SE o NW. Las fracturas y fallas NE-SW varían en rumbo N30°E a N65°E en echados de 40° a 90°. Las fracturas y fallas E-W varían en echados de 50° a 90° ya sea N o S. Los núcleos de falla están constituidos de brechas de falla y en ocasiones salbanda, afecta rocas de las tres Formaciones Conglomerado Guanajuato, Losero y Bufo. En el área parece que hay una relación cortante entre el grupo de fallas NW-SE por las fallas NE-SW, en donde las fracturas NE-SW son del grupo de fracturas San Renovato. Las relaciones entre los grupos de fracturas NW-SE y NE-SW determinan una compleja interacción de fracturas y fallas que determinan una geometría de bloques de roca prismáticos y columnares en las rocas piroclásticas de la Formación Bufo, presentándose abundantes derrumbes de roca a lo largo del camino al Cubo.

Grupo de fallas y fracturas San Renovato (NE-SW)

Es un grupo de fracturas y fallas bien definido en su expresión en el terreno, se ubica en el cambio de pendiente de la ladera suroriente de la Presa San Renovato y son los escarpes de roca más espectaculares por presentar grandes bloques de roca con desprendimientos de la Formación Bufo. La longitud de las fallas de este sistema varía de 100 m a 500 m. Este grupo de fracturas tiene una orientación que varía de N30°E a N50°E y presenta echados que varían entre 90° a 30° al SE principalmente y con menor cantidad de datos con echados al NW. Las fallas tienen un comportamiento cinemático de fallas oblicuas y fallas normales. Los tipos de roca de falla que se observan en sus núcleos son brechas de falla con distintos grados de intensidad de abrasión mecánica. Al interior de los bloques desprendidos de roca piroclástica se presentan también fallas N-S que tienen echado al este con dos cinemáticas sobreimpuestas de falla oblicua con componente derecha y falla normal. Estas fallas afectan a las rocas de la Formaciones geológicas: Conglomerado Guanajuato, Losero y Bufo. Se infiere que la edad de estas fallas pueda ser Oligoceno de acuerdo con la documentación de otras fallas del Distrito Minero de Guanajuato y que afectan a las rocas piroclásticas de la Formación Bufo.

Grupo de fracturas y fallas El Faro

Este grupo de fracturas y fallas se localizan en donde precisamente se localiza la construcción de El Faro. Es una zona de complejidad estructural ya que se tienen varias direcciones de fracturas y fallas con orientaciones NE-SW, NW-SE, E-W y cercanas a orientaciones N-S. Las direcciones NE-SW pertenecen al grupo de fracturas San Renovato, las direcciones E-W se presentan como fallas normales y las direcciones NW-SE pertenecen al sistema de las vetas-falla principales del Distrito Minero de Guanajuato. Los desplazamientos son complejos y no fáciles de determinar. Las fallas NE-SW tienen una cinemática de fallas oblicuas, las fallas E-W como fallas de tipo normal y las fallas NW-SE aparecen como fallas normales y otras oblicuas. Algunos grupos de fallas NW-SE en el Faro son desplazados por las fallas NE-SW del grupo de fracturas de San Renovato. Las fallas E-W parecen cortar a las fallas N-S y a las fallas NW-SE. Todas estas relaciones de corte sugieren que existe un acomodo estructural en El Faro y en la parte sur poniente del grupo San Renovato (NE-SW).

Los núcleos de las fallas (E-W, NE-SW, NW-SE, N-S) presentan rocas de falla de tipo brecha de falla, salbanda con fragmentos de roca piroclástica riolítica de la Formación Bufo. Afecta los niveles estratigráficos de las Formaciones: Conglomerado Guanajuato, Losero y Bufo.

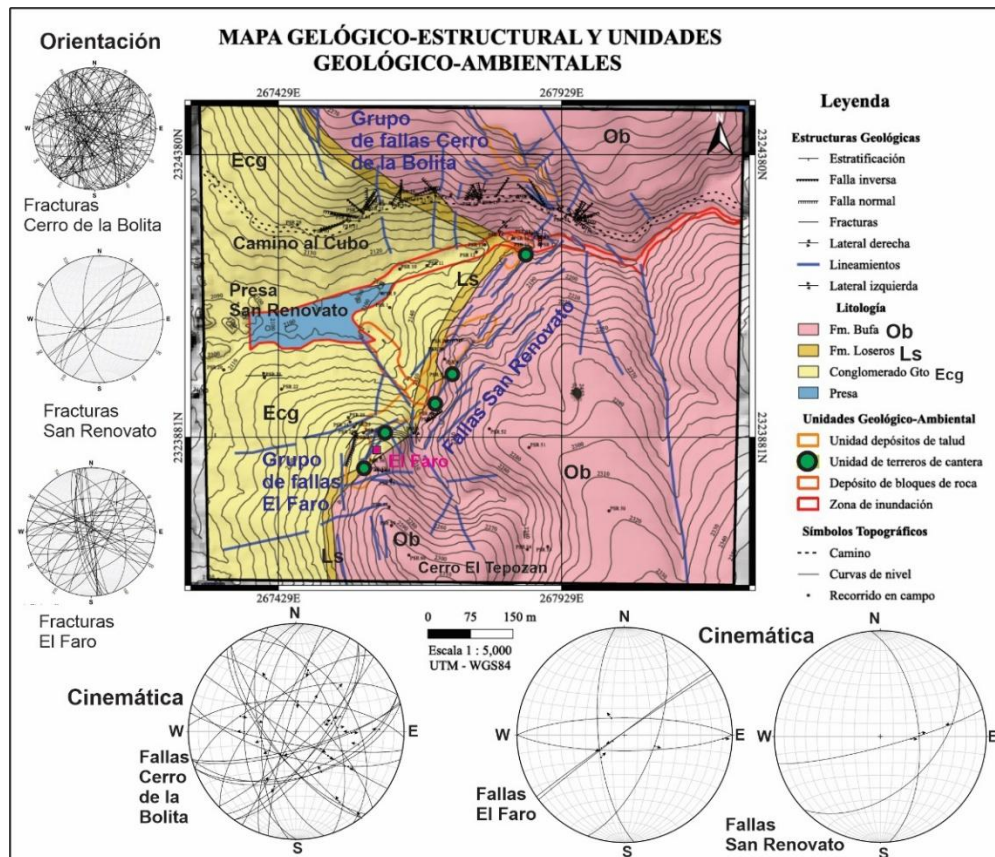


Figura 4. Mapa geológico estructural y unidades geológico-ambientales con orientaciones de los grupos de fallas y fracturas (stereonet) y comportamiento cinemático de estas fracturas (faultkin).

Fuente: Elaboración propia 2025 y mapa geológico modificado de Edwards 1955.

Peligros geológicos

Los peligros geológicos detectados a partir de las observaciones de campo (Figuras 4 y 5) se pueden definir como la presencia de fallas y fracturas El Faro, y fracturas inducidas por extracción de piedra de canteras, derrumbes de roca de pie de talud y bloques desprendidos de roca, zona de inundación y erosión de suelos.

La existencia de una zona compleja y de acomodo geológico-estructural en las laderas de los alrededores de la Presa San Renovato y del arroyo de la Olla debido a la presencia de los grupos de fracturas y fallas de San Renovato (NE-SW) y El Faro (NW-SE, NE-SW y E-W) originan bloques de roca piroclástica riolítica de dimensiones de más de 10 m³ que se desprenden y ruedan ladera abajo.

En los lugares donde existen las canteras de extracción de placas de areniscas de la Formación Losero se observan intersecciones entre las fracturas y fallas de los grupos definidos en este trabajo con las superficies de estratificación, la discordancia de la base de la Formación Bufo y la obra excavada. Esta conjunción de características origina la formación de fracturas inducidas que provocan desplomes de bloques de roca; los desplazamientos de los bloques a lo largo de la superficie de la falla inducida siguen los planos de falla antiguos.

Los bloques desprendidos de las partes altas del talud rocoso se acumulan en el pie del talud, con tamaños de bloques desde centímetros hasta de escala métrica (Figuras 4 y 5). Estas acumulaciones o depósitos de bloques desprendidos es un peligro, ya que están apilados uno sobre otro de manera inestable y por su ubicación al pie de talud y al inicio de la ladera inclinada (Figuras 4 y 5). Se observan algunos derrumbes de roca en las laderas y en las cañadas. Algunas cañadas son controladas por fracturas y en estas hay depósitos de antiguos derrumbes de rocas.

Los bloques desprendidos de roca piroclástica (Formación Bufo) de la zona de fallamiento y fracturamiento San Renovato y El Faro están distribuidos en algunas partes a lo largo del arroyo de la Olla y cerca del vaso de la represa de San Renovato (Figura 5). Otros depósitos de bloques desprendidos se observaron a lo largo del Camino a la subida a Calderones y El Cubo en donde se ubica la intersección de fallas y fracturas del grupo San Renovato (NE-SW) con el sistema de fracturas y fallas NW-SE, que es otra zona de acomodo estructural; en esta parte es muy angosto el camino de terracería de la subida al Cubo y donde hay peligro de derrumbes.

La presencia de algunas terrazas fluviales con depósitos de gravas y arenas aguas arriba de la cortina de la Presa San Renovato pone de manifiesto que han existido distintos niveles de inundación, sin embargo, estos depósitos aluviales son escasos debido a la configuración topográfica de la cañada con valle estrecho, y en donde predomina la erosión en sus laderas.

En las laderas de pie de monte con dirección hacia el arroyo de la Olla, se pueden ver relictos de antiguos desarrollos de suelos, así como depósitos de detritos o bloques de roca erosionados y laderas desnudas sin desarrollo de suelo. Esto atestigua laderas muy activas con procesos de erosión. La pérdida de suelo en las laderas puede ser un factor ambiental que contribuya a un deslizamiento o derrumbe de rocas, ya que no hay un soporte natural para evitar el derrumbe o deslizamiento.

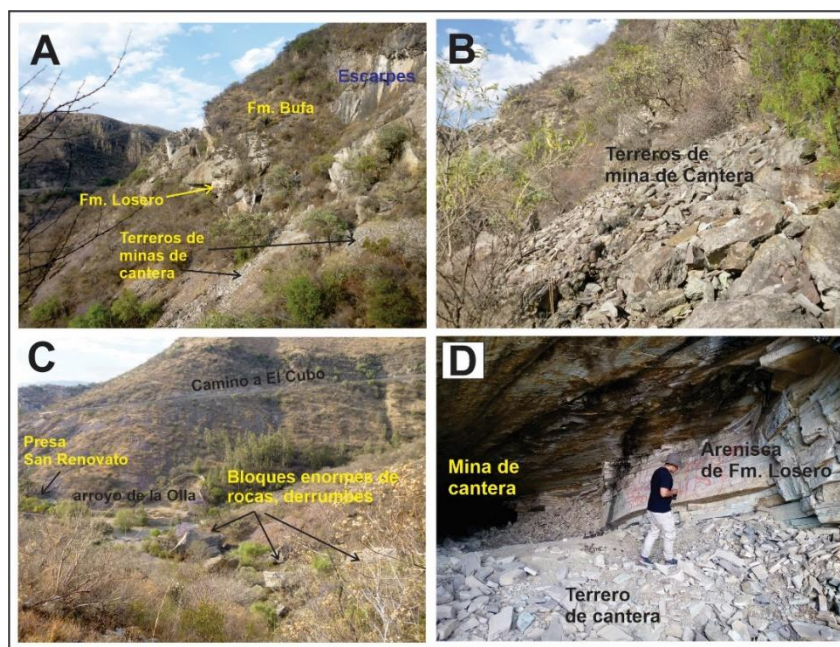


Figura 5. Fotografías de los tipos de peligros geológicos. A) Escarpes fracturados y bloques dimensionados. B) Depósitos de pie de talud y material de terrero de cantera. C) Bloques grandes de roca en las laderas. D) Cantera de roca arenisca Loseros al pie de talud rocoso.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Discusión y conclusiones

Los resultados geológico-estructurales muestran que las laderas y taludes rocosos de la Presa San Renovato contienen varios grupos de fracturas y fallas geológicas. Es una zona de acomodo estructural en donde los grupos de fracturas y fallas San Renovato con direcciones NE-SW interactúa con fracturas de otros grupos de fallas en su parte Norte y Sur. En la parte Norte con el grupo de fracturas y fallas Cerro La Bolita, y en su parte sur, con el grupo de fracturas El Faro. El grupo de fracturas y fallas San Renovato presenta bloques de roca piroclástica riolítica de dimensiones considerables desprendidos de la Formación Bufo. Las estrías de falla muestran por lo menos dos movimientos en las fallas una componente oblicua y otra de tipo normal. Esto sugiere una evidencia de reactivación de fallas en distinto tiempo durante el Oligoceno. En el Distrito Minero de Guanajuato se han documentado claramente dos grupos de fallas NW-SE y NE-SW (Nieto-Samaniego *et al.*, 2015), las fallas NW-SE algunas encajonan a vetas epitermales de oro y plata, y las fallas NE-SW aparecen cortando a las vetas-falla NW-SE; estas fallas NE-SW coinciden con los diques de andesita en la zona de Calderones (Nieto-Samaniego *et al.*, 2015) y fallas como El Carrizal y falla de Aldana. Estos sistemas de fallas están presentes en el área de estudio, y parecen tener una reactivación en sus movimientos.

Los peligros geológicos determinados en este trabajo como los desprendimientos de grandes bloques de roca piroclástica riolítica (Fm. Bufo) y areniscas (Fm. Losero) están controlados por la interacción y las relaciones de corte de los grupos de fallas San Renovato, Cerro de la Bolita y El Faro. Los escarpes de roca vistos desde la Presa San Renovato hacia el Oriente y Suroriente son una expresión de las fallas y fracturas descritas en este trabajo. Los derrumbes de bloques de rocas y depósitos de talud en la parte del camino a El Cubo son controlados por las intersecciones de los grupos de fallas NE-SW de San Renovato con el grupo de fallas NW-SE y N-S presentes en el Cerro de la Bolita. En la barranca en donde cambia el predominio del grupo de fallas de San Renovato (NE-SW) al bloque de roca El Faro, la cañada límite es una falla NW-SE en donde esta oculta por depósito derrumbe de bloques muy grandes de roca piroclástica. Los estudios referentes a peligros geológicos en el área fueron realizados en 2008 por el Servicio Geológico Mexicano y dependencias de obras y seguridad públicas del estado de Guanajuato (Oregel-Romero *et al.*, 2008), estos estudios fueron realizados en el Cerro de la Bolita y El Faro determinando direcciones de algunas fracturas, análisis cinemático de estabilidad de taludes y medición de algunos parámetros geomecánicos. Los grupos de fracturamiento y fallamiento de este trabajo, mapa geológico estructural y unidades geológico-ambientales y controles estructurales en derrumbes y permiten entender mejor los resultados de Oregel-Romero *et al.* (2008). En este trabajo se resalta la importancia de que las intersecciones y relaciones de corte entre los diferentes grupos de fallas y fracturas eocénico-oligocenas son zonas de debilidad en la roca que permiten la existencia de fracturas extensionales y cizalla inducidas por inestabilidad del talud, a su vez esta inestabilidad detonada por actividades antropogénicas o fuerzas gravitacionales. Los tipos de fracturas detectados están en relación con las dimensiones y forma de bloques que dependen de las orientaciones, el número de grupos y la extensión de las fracturas. Estas características definen la presencia de derrumbes de roca de pie de talud, bloques desprendidos de roca, flujos de detritos y vulnerabilidad ante erosión en las laderas.

La importancia de estos estudios geológico-estructurales pone de manifiesto considerar los peligros geológicos (como derrumbes de rocas, deslizamientos de detritos y erosión de suelos) en sus relaciones con la afectación de sitios de patrimonio cultural e histórico en la ciudad de Guanajuato ya que en varias ciudades se ha incrementado en últimos años las afectaciones a construcciones de patrimonio cultural (López-Doncel *et al.*, 2006; Bonini *et al.*, 2023). Existen medidas de mitigación y gestión del riesgo ante estos peligros geológicos que se pueden implementar como la colocación de un sistema de alerta temprana que puede ser un monitoreo constante con drones o colocación de marcadores de movimiento en grietas de roca, así como colocar barreras de protección dinámicas, barreras flexibles de anillos y realizar tratamientos de taludes (anclajes, mallas, protección contra erosión y modificaciones geométricas o constructivas de los taludes).

Bibliografía/Referencias

- Alcocer-Martínez, A. (1983). *El agua en la ciudad de Guanajuato: problemas de siglos*. Proyecto Puentecillas. Universidad de Guanajuato. Observatorio Astronómico y Meteorológico, Museo de la Alhóndiga de Granaditas (Guanajuato, Gto.). Gobierno del Estado de Guanajuato. 84 p.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. & Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology*. Cambridge University Press, 289 pp.
- Angeles-Moreno, E. (2018). *La evolución tectónica cenozoica de las Sierras de Guanajuato y Codornices, México*. [Tesis Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM. 193 p. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3457522>
- Angeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, A. F., Ruiz-González, F. J., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S. A., Olmos-Moya, M. D. J. P., Xu, S. & Miranda-Avilés, R. (2017). The transition between shortening and extensional regimes in central Mexico recorded in the tourmaline veins of the Comanja Granite. *Journal of South American Earth Sciences*, 73, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.004>
- Aranda-Gómez, J. J. & McDowell, F. W. (1998). Paleogene Extension in the Southern Basin and Range Province of Mexico: Syndepositional Tilting of Eocene Red Beds and Oligocene Volcanic Rocks in the Guanajuato Mining District. *International Geology Review*, 40(2), 116–134. <https://doi.org/10.1080/00206819809465201>
- Audefroy, J. (2014). Inundaciones en Guanajuato: una lectura histórico-urbana. En Joel Audefroy (coord.), *Arquitecturas en riesgo, México*. Ediciones Navarra, p. 155-174.
- Barnes, W. & Lisle, J. (2004). *Basic Geological Mapping*. (4th edition), Wiley, England. 190 p.
- Bonini, J. E., Vieira, B. C., Corrêa, A. C. d. B. & Soldati, M. (2023). Landslides and Cultural Heritage—A Review. *Heritage*, 6, 6648–6668. <https://doi.org/10.3390/heritage6100348>
- Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S. & Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 84-98. <https://rmcg.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/277>
- Compton, R. R. (1985). *Geology in the field*. John Wiley and Sons. 398p.
- Del Río-Varela, P., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Angeles-Moreno, E., Escalona-Alcázar, F. J., & Pilar-Martínez, A. (2020). Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 72(1), e071019. <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a071019>
- Dolores-Lorenzo, M. (2021). La prensa ante la inundación de Guanajuato, 1905 cohesión, altruismo y denuncia. En M. Dolores-Lorenzo, M. Rodríguez y D. Marcihacy (coordinación). *Historiar las catástrofes*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas. Cuadros, figuras y fotografías. (Historia General 38) p. 249-278. <https://ru.historicas.unam.mx/handle/20.500.12525/758>
- Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez, S. & Velázquez-Silva, S. (1970). Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato. *Boletín Consejo de Recursos Minerales no Renovables*, 75, 48.
- González, J. G. (1905). *La inundación de Guanajuato*. León, Guanajuato, Imprenta de J. Rodríguez e Hijo, 1905. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080018170/1080018170.html>
- Guerra-Peña, F. (2003). Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, 50, 42-66. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100008
- López-Doncel, R., Mata-Segura J. L., Cruz-Márquez, J., Arzate-Flores, J., & Pacheco-Martínez, J. (2006). Riesgo geológico para el patrimonio histórico. Ejemplos del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana Tomo LVIII, 2, 259-263. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a9>

- Nieto-Samaniego, A. F., Báez-López, J. A., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., Noguez-Alcántara, B. & Solé-Viñas, J. (2015). New stratigraphic, geochronological, and structural data from the southern Guanajuato Mining District, México: implications for the caldera hypothesis. *International Geology Review*, 58(2), 246-262.
<http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1072745>.
- Oregel-Romero, A., Frias-Guerrero, T., Porras-Ramírez, S. E., Cazares-Ventura, A., & Martínez-Murillo, P. (2008). *Estudio de peligros geológicos y de hidrología en ocho zonas de la Ciudad de Guanajuato*. Reporte de Convenio de colaboración entre el Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Obras Públicas y de Seguridad Pública del estado de Guanajuato.
https://drive.google.com/file/d/1XVI00F1j2j5UhFo_fTsO478PYMGYhlob/view?pli=1
- Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Cruz-Cruz, M., Pérez-Arbizu, O., Vega-González, M. & Zanol, A. G. (2014). Geochemistry and depositional environment of the Losero Formation in the Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(3), 413-430.
<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2014v66n3a1>
- Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., García-Barragán, J. C., Loza-Aguirre, I., Li, Y. & Zanol, A. G. (2017). Facies analysis, stratigraphic architecture and depositional environments of the Guanajuato conglomerate in the Sierra de Guanajuato, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 385-408. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n2a5>
- Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Salazar-Hernández, C., Vega-González, M., & Cervantes-Jauregui, J. A. (2013). Characterization Petrophysical of the Losero Formation in the Historical Architecture of the Guanajuato city, Mexico. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(2), 191-205.
- Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C. C. & Campos-Madrigal, E. (2001). *Elementos de Cartografía Geológica*. UNAM, Facultad de Ingeniería. 292 p.
- UNISDR (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastre*. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés UNISDR) Suiza.
https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Vidaurre-Aréchiga, J. E. (19 junio 2020). *Los orígenes de la presa de la Olla y su paseo (Segunda parte)*. Portal Guanajuato. México. <https://portalguanajuato.mx/2020/06/los-origenes-de-la-presa-de-la-olla-y-su-paseo-segunda-parte/>
- Wandke, A. & Martínez, J. (1928). The Guanajuato mining district, Guanajuato, Mexico. *Economic Geology*. 23(1), 1-44.
- Zamora-Ayala, V. C. & Mejía-Morales, N. (2017). Transformación del entorno urbano del paseo de la presa, Guanajuato. S. XVIII-XX. En A. Vega-Corona & D. V. Ramírez-Deantes, (cords.). *Arquitectura y Urbanismo en el Paseo de la Presa Guanajuato Gto*. Ideas CONCYTEG. Año 12, No. 153.