

Inventario de caídas de rocas, análisis estadístico y mapeo geomorfológico de la Localidad Área Nueva en la porción NE de la Sierra de Guadalupe, Estado de México

Rockfall inventory, statistical analysis and geomorphological mapping of the Area Nueva Locality in the NE portion of the Sierra de Guadalupe, State of Mexico

Isabel Hernández Avelino,* José Fernando Aceves Quesada** y Gabriel Legorreta Paulín***

Recibido: 09/12/2022. Aprobado: 07/02/2023. Publicado: 22/03/2023.

Resumen. La localidad Área Nueva, se ubica, en la porción NE de la Sierra de Guadalupe, en la ladera sur del domo La Cantera, el cual presenta un escarpe intensamente diaclasado y fracturado, de 450 m de longitud. En este estudio se realizó un inventario de 114 depósitos de caídas de rocas, en los que se obtuvo para los bloques mayores, su posición geográfica, altitud, pendiente, distancia del escarpe, volumen y adherencia del bloque sobre la superficie del terreno. Con esta información y el uso de sistemas de información geográfica, se elaboraron los mapas de pendientes, curvatura del terreno y geomorfológico. Para complementar el inventario de depósitos de caídas de rocas, se obtuvo la imagen de un dron de baja altitud, cuyo sobrevuelo fue a 80 m de altura y posteriormente se procesó la información. Además, se realizó un análisis estadístico, con la finalidad de determinar la distribución de los bloques y su posible relación con los factores que puedan influir en el tamaño del bloque y la distancia potencial de recorrido del mismo. El grado de la pendiente influye de manera significativa en el alcance potencial del

recorrido de los bloques rocosos inestables, que pudieran desprenderse del escarpe. La distancia de recorrido de las rocas, es menor cuando las pendientes son mayores de 45°, correspondientes a la ubicación del escarpe y los bloques de menor volumen, son los que alcanzan distancias mayores; sin embargo por la cercanía de los asentamientos humanos a 120 m del escarpe y la intensidad de la deforestación, por la presión que ejercen los habitantes en la zona, incrementa la posibilidad de que los bloques que se desprendan del escarpe, incrementen su alcance potencial de recorrido y lleguen a impactar sobre las casas y las personas, ocasionando daños considerables. El aumento de la deforestación, ha dejado al descubierto bloques rocosos inestables, que aunado, a eventos detonantes de los desprendimientos de rocas, por las grandes avenidas durante lluvias torrenciales y la sismicidad, incrementa la susceptibilidad a caídas de rocas.

Palabras clave: domo, escarpe, pendiente, deforestación, asentamientos humanos.

* Posgrado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6645-2104>. Email: Isaha2001@hotmail.com. Autora de correspondencia

** Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-7381>. Email: acevesquesada.fernando@gmail.com

*** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7830-400X>. Email: egorretag@geografia.unam.mx

Abstract. Among the natural events that have caused great human and economic damage in the world, rockslides occurring on unstable slopes, due to their geological and geomorphological characteristics, together with the triggering factors (earthquakes, torrential rains, anthropogenic processes) that accelerate their fall, stand out. Population growth and the economic position prevailing in many social nuclei, mostly in extreme poverty and in need of housing, is reflected in the occupation of hillside areas, without considering the dangers of rock falls. In areas susceptible to this process, studies have been carried out using various methodologies to determine its causes, the degree of impact on the population living there and the probability of preventing or mitigating it. Since the industrialization during the 1970s in part of the Basin of Mexico and adjacent to the Sierra de Guadalupe, migrants from different states arrived in search of employment, which increased the demand for urban land and, consequently, the territorial occupation of the hillsides of the sierra, where some leaders offered them land at low cost, without considering the risk to which they are exposed by landslides and falling blocks, mainly during the rainy season or when seismic events occur. The formation of the sierra derives from Pleistocene volcanic activity, which has given rise to several volcanoes, domes and spills that present fractures (diaclasses) and faults of tectonic origin, with a predominant NW-SE and E-W direction. Prior to intense urbanization the area was used to exploit material banks, which was often done with the help of dynamite for the extraction of materials, which in some areas intensified the fracturing by blasting effects. During the earthquakes that occurred in September 2017, 2 large unstable blocks detached from the dome called “Cerro Gordo”, located in the southern portion of the study area. The study area corresponds to the locality of Área Nueva, which is located in the NE portion of the Sierra de Guadalupe, on the southern slope of the La Cantera dome, and which presents an intensely diaclassed and fractured escarpment, 450 m long and an average height of 30 m. In this study, an inventory of 114 rockfall deposits was carried out, in which the geographic position, altitude, slope, distance from the escarpment, volume and adherence of the block to the ground surface were obtained for the blocks. With this information and the use of geographic information systems, slope, terrain

curvature and geomorphological maps were prepared. The vegetation index (NVDI) was obtained with Sentinel satellite information (analysis of satellite images from 2016 to 2021). In addition to the inventory of rockfall deposits, images of the study area were obtained from a low-altitude drone, whose overflight was at an altitude of 80 m, and the information was subsequently processed to obtain the orthophoto and digital elevation model (DEM). With this information, a statistical analysis was carried out to determine the distribution of the blocks, their size and their potential travel distance. From the results obtained, it was observed that the slope grade significantly influences the potential travel distance of the unstable rock blocks. The distance of travel of the rocks is less when the slopes are greater than 45°, corresponding to the location of the escarpment, and the blocks of smaller volume are those that reach greater distances; however, due to the proximity of human settlements (120 m from the escarpment) and deforestation, the possibility of the blocks breaking off and impacting houses and people increases, causing considerable damage. This risk increases due to the fact that informal constructions continue to be built on the hillside (the “Ricardo Flores Magón” educational complex) and a dirt road cut located between the lower part of the dome and the residential area that connects with other neighborhoods located behind it, which means that there is continuous traffic of inhabitants and their recreational activities. Likewise, deforestation has exposed potentially unstable blocks, which, together with triggering events such as torrential rains and regional and local seismicity, increases the susceptibility to rock falls.

Based on the statistical analysis and the field inventory, it is recommended that the larger unstable blocks be stabilized with anchors, prevent further construction by establishing a safety strip of at least 100 meters from the base of the escarpment, and carry out reforestation programs with forest plantations native to the region.

Raise awareness among the population about the risks of rockfall events in the area and restrict access in order to prevent and mitigate any event that could occur due to this type of process.

Keywords: dome, escarpment, slope, deforestation, human settlements.

INTRODUCCIÓN

Las afectaciones socioeconómicas por las caídas de rocas se han incrementado por el crecimiento poblacional que se extiende hacia zonas de ladera y cantiles inestables. La ocupación de estas áreas susceptibles a caídas de rocas ha generado un incremento en el riesgo latente asociado a este tipo de procesos (Aristizábal y Gómez, 2019).

La determinación de las causas y el alcance de los desprendimientos de bloques permitió identi-

ficar las zonas más susceptibles con el fin de mitigar sus efectos. Los factores que condicionan el deslizamiento de masas y desprendimiento de bloques están en función del tipo de roca y suelo, la orientación de fracturas en el terreno, el aumento de la precipitación, la actividad sísmica y las obras humanas (Lugo *et al.*, 1995; Dikau *et al.*, 1996; Lugo *et al.*, 2005; Lazari *et al.*, 2006; Devoli *et al.*, 2007). Cabe destacar que los cortes para caminos, calles y carreteras favorecen las caídas de bloques e incrementan de manera importante la inestabilidad de taludes.

Bragagnolo *et al.*, (2020), mencionan la importancia del desarrollo de metodologías y herramientas que permitan identificar las áreas susceptibles de una manera económica y eficiente para la prevención y mitigación de los daños potenciales. Durante el periodo de 1940 a 1970 se concentraron un gran número de industrias en la zona que corresponde a la Cuenca de México en su colindancia con la Sierra de Guadalupe, lo cual trajo como consecuencia un gran flujo de personas migrantes de diferentes estados en busca de empleo, y por consiguiente, una demanda de suelo urbano y una expansión territorial hacia las laderas de la sierra, sin tomar en cuenta las características geológicas y geomorfológicas de la misma.

La localidad Área Nueva se ubica sobre la Cañada de Almárcigo y en las laderas del domo cerro La Cantera, en la porción NE de la Sierra de Guadalupe, la cual está densamente poblada y la mayoría de los habitantes viven en condiciones de hacinamiento (INEGI, 2021). El domo “La Cantera” está localizado en la porción norte de la localidad y presenta un escarpe de 450 m de longitud, una altura que varía entre 29 y 30 m; el macizo rocoso está intensamente fracturado y diaclasado debido al enfriamiento de la lava. En algunos sitios adyacentes a la localidad también hay presencia de bancos de material inactivos desde hace más de 30 años, pero que de alguna forma también intensificaron el fracturamiento de

las rocas, lo que implica un riesgo latente para la población que ahí se asienta. Algunos pobladores indicaron que se han desprendido varios bloques que han alcanzado distancias mayores a los 300 m, siendo que las construcciones se localizan tan solo a 120 m del escarpe, lo que ha derivado en lesiones a algunas personas. A 30 m del escarpe existía un salón de clases en condiciones precarias (Figura 1), construido con madera y que posteriormente se inhabilitó debido a los desprendimientos de bloques y el consecuente riesgo para los alumnos, sin embargo, los habitantes siguen ejerciendo presión social, ambiental y urbana al colonizar (urbanizar) áreas que presentan una probabilidad alta a ser afectadas por procesos gravitacionales. En el límite con la zona habitacional existe una carretera de terracería denominada “Santa María”, y hacia la parte norte, muy cerca del salón inhabilitado, en el año 2021 se construyó formalmente el complejo educativo “Ricardo Flores Magón”, cerrado temporalmente. Al urbanizarse áreas y cambiar el uso de suelo natural de la zona, con fuerte pendiente, se propician procesos gravitacionales y de erosión. Además, la zona de estudio presenta una desertificación por la alteración de la cubierta vegetal, la cual es removida en algunas porciones de la ladera, favoreciendo la erosión y dejando al descubierto bloques diaclasados; esto en conjunción con otros factores intrínsecos (litología: dacitas alteradas, la altura del terreno y sus pendientes pronunciadas y abruptas, etc.)



Figura 1. Salón de clases en condiciones precarias que estaba ubicado exactamente en la porción sur del bloque, a 30 m del escarpe.

y extrínsecos (sismicidad y lluvias torrenciales), favorecen los procesos gravitacionales y en específico las caídas de roca potencialmente inestables.

Los procesos de remoción en masa, procesos gravitacionales o procesos de ladera se refieren a movimientos descendentes, bruscos de rocas, derrubios o tierra que se desprenden de laderas empinadas o acantilados y el material al caer golpea el talud inferior en un ángulo menor que el ángulo de caída, lo que origina que rebote (Highland y Bobrowsky, 2008; Alcántara, 2000; Cruden, 1991). Los desprendimientos de rocas en las laderas potencialmente inestables suceden de forma rápida, debido a cortes carreteros, pendientes pronunciadas y acantilados, los cuales caen, con posibilidad de rodar y rebotar a lo largo de su trayectoria, dependiendo de las condiciones geológicas y geomorfológicas del terreno y del material mismo; los bloques rocosos al caer pueden fragmentarse y generar nuevos trozos con diferentes trayectorias, dependiendo de la energía del impacto con el suelo, que pueden empezar a rodar en las pendientes más pronunciadas hasta que el terreno se aplanan (Highland y Bobrowsky, 2008; Matas *et al.*, 2017).

El Proyecto EPOCH (1991-1993), a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), elabora una clasificación de los procesos de remoción en masa (desprendimientos, vuelcos o desplo-

mes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos) involucrando el tipo de movimiento o mecanismos de falla y los materiales.

Durante los sismos de 2017 ocurrieron varios desprendimientos de bloques en la Sierra de Guadalupe, en áreas cercanas al área de estudio (Localidad La Presa y Cerro Gordo), lo cual se pudo verificar con visitas, anterior y posteriormente al evento y por información de los habitantes.

Durante los últimos años, en la Sierra de Guadalupe se han incrementado diversos eventos por deslizamientos de tierra y desprendimientos de bloques, derivado de las lluvias atípicas y caída de granizo, principalmente durante los meses de septiembre y octubre. En la Tabla 1 se especifican las colonias afectadas por algunos eventos y en el mapa (Figura 2) los sitios donde han ocurrido.

Los enfoques cuantitativos para identificar zonas susceptibles a deslizamientos y caídas de rocas en el mundo se han utilizado con más frecuencia durante los últimos años. Se han realizado diversos estudios mediante análisis estadísticos para seleccionar y analizar los factores condicionantes que generan deslizamientos o caídas de rocas; modelos para determinar el índice de susceptibilidad a deslizamientos de tierra: bivariado (Naranjo 1994; Suzen y Doyuran 2004; Thiery *et al.* 2008; Yalcin 2008) o modelos multivariados (Baeza y Coro-

Tabla 1. Eventos por caídas de rocas y deslizamientos de tierra en la Sierra de Guadalupe.

Colonia	Evento	Fecha	Afectaciones materiales	Afectaciones humanas
Col. Benito Juárez (Mpio. de Ecatepec)	Deslizamiento de tierra y rocas	2004, junio de 2010, julio de 2016	Casas y vialidades	Desalojo de personas
Col. Viveros Tulpetlac (Mpio. de Ecatepec)	Deslizamiento de tierra y rocas	2004 y febrero de 2017	Casas afectadas	2 personas lesionadas
Col. La Palma (Mpio. de Ecatepec)	Caída de bloques	Abril de 2017, septiembre de 2021	2 casas afectadas	Autos afectados
San Andrés de la Cañada. Mpio. Ecatepec	Deslizamiento de tierra, y caída de rocas	agosto de 2021	Vialidades	
Col. Santa Clara Coatitla (Cerro Gordo). Ecatepec	Caída de bloques	Septiembre de 2021	Viviendas afectadas	
Col. Rinconada de San Marcos, Mpio. Tultitlán	Deslizamiento de tierra y rocas	agosto de 2022		

Tabla 1. Continuación.

Colonia	Evento	Fecha	Afectaciones materiales	Afectaciones humanas
Col. Lázaro Cárdenas (Cerro del Chiquihuite)	Caída de bloques y deslizamiento de tierra	Junio 2000, septiembre de 2021	15 casas afectadas	Personas sepultadas
Col. Cuauhtémoc, Tulpetlac, Mpio. Ecatepec	Deslizamiento de tierra y rocas	Octubre de 2020	3 viviendas afectadas	21 personas desalojadas
Col. Santa María Tulpetlac y Col Tepeyac, Hidalgo. Ecatepec	Desprendimiento de un macizo rocoso y un alud de tierra	Septiembre de 2021, septiembre de 2022	Viviendas afectadas	1 persona herida
Col. Lázaro Cárdenas, Mpio. Tlalnepantla	Derrumbe de rocas y deslizamiento de tierra	Septiembre de 2021	Viviendas dañadas	

Fuente: Notas periodísticas (Gaceta Mexicana, El Universal, El Sol de Toluca, Infobae, El Sol de México, Milenio, A fondo Estado de México, TV Azteca Noticias, 24 Horas El Diario Sin Límites, Crónica.com.mx, La Jornada, Excelsior, Comunicado de Prensa Gobierno de México).

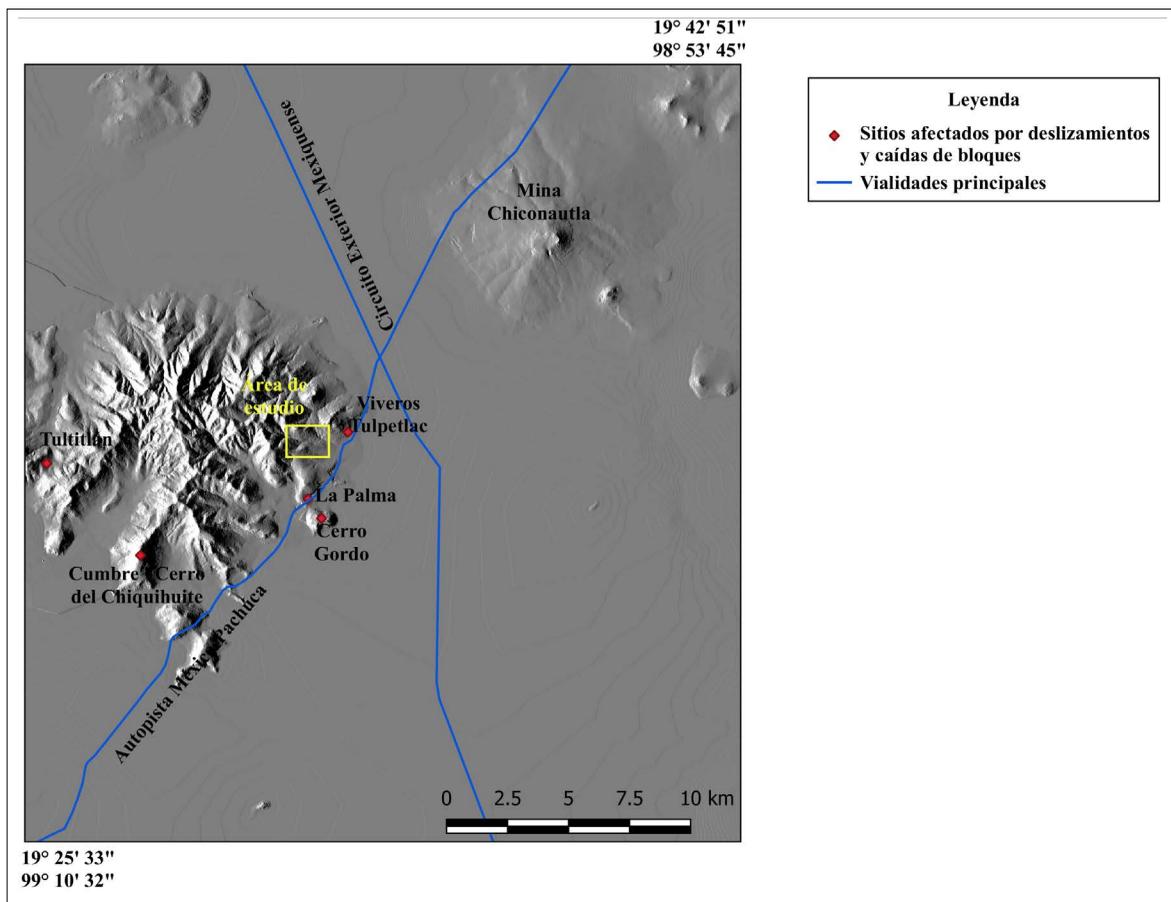


Figura 2. Zonas de la Sierra de Guadalupe, donde han ocurrido desprendimientos de bloques y deslizamientos de tierra y escombros en los últimos años. Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar INEGI, 2010

minas 2001; Carrara 1983; Chung *et al.* 1995), y geoestadística para la evaluación de deslizamientos de tierra y desprendimientos de roca (Ríos *et al.*, 2015; Goyes y Hernández, 2021). Recientemente destacan nuevas técnicas referidas a modelos de redes neuronales artificiales (ANN), las cuales utilizan algoritmos para construir modelos de clasificación y, mediante estos, predecir información con datos de entrenamiento (Soyoung *et al.*, 2013; Tarwat, 2021; Goyes y Hernández, 2021).

ZONA DE ESTUDIO

La localidad Área Nueva se ubica en la porción NE de la Sierra de Guadalupe, sobre la Cañada de Almárcigo, en la ladera del domo La Cantera (Figura 3). La Sierra de Guadalupe está a su vez inmersa en la porción centro-norte de la Cuenca de México, y forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana. De acuerdo con Lugo (1990), la Sierra de Guadalupe corresponde a una estructura de forma más o menos circular, con un diámetro aproximado entre 12 y 13 km, constituida por andesitas y dacitas del Mioceno y está considerada entre las estructuras más antiguas dentro de la Cuenca de México (Mooser, 1975).

La geología de la Sierra de Guadalupe ha sido estudiada por diferentes autores como Ordoñez (1895), Campa (1965) y Lozano (1968). Está constituida fundamentalmente por dacitas (Ordoñez, 1895), con edades K-Ar de 14-15 Ma (Lozano, 1968). Lugo y Salinas (1996) mencionan que los volcanes que conforman la Sierra de Guadalupe son de tipo compuesto, los cuales tuvieron su origen en erupciones explosivas que culminaron con actividad extrusiva y efusiva, en su mayoría predominan los domos originados por los derrames de lava y su posterior denudación debida a la erosión, lo cual ha removido los materiales menos resistentes del tipo de los materiales piroclásticos.

En la Sierra de Guadalupe afloran generalmente dacitas en forma de derrames y domos volcánicos (Tapia y López, 2002). El domo la Cantera tiene una altura de 2600 msnm, con un escarpe longitudinal de 450 m a una elevación de 2480-2520 msnm, casi vertical y es de composición dacítica.

La cima del domo está constituida por brechas autoclásticas de composición riolítica y flujos piroclásticos de bloques y cenizas y hacia el oeste se sobrepone a derrames de lava del domo Cabeza Blanca, ubicado al SW del área. Los flujos tuvieron una pequeña dispersión y representan etapas tardías del crecimiento del domo La Cantera y que junto

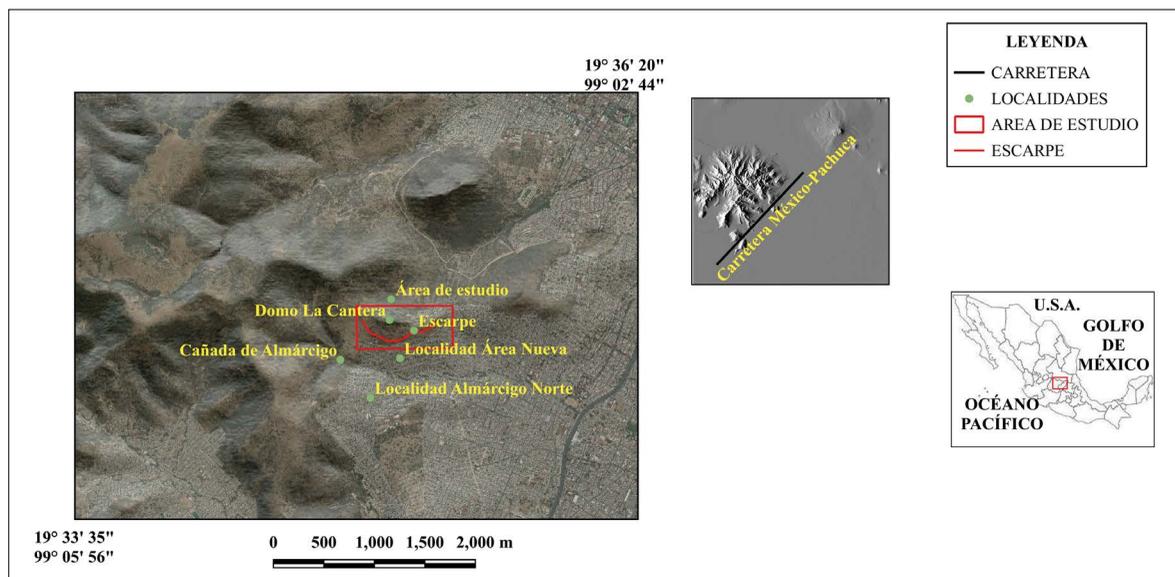


Figura 3. Localización de la localidad “Área Nueva” en la ladera sur del cerro La Cantera. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

con el domo Tulpetlac, al SE del domo La Cantera forman un lineamiento NE-SW, probablemente asociados a fallas con la misma orientación. (Ramírez, 2011) (Figura 4).

El escarpe presente en el domo está fuertemente fracturado y diaclasado, lo que implica un riesgo latente de que se produzca un desprendimiento

generado por gravedad, aunado a las sobrecargas que ejerce la población asentada en las laderas del mismo, además de otros eventos naturales como la sismicidad, las grandes avenidas durante lluvias torrenciales y la desertificación (Figura 5).

El escarpe es casi vertical, con intenso fracturamiento y diaclasamiento y la presencia de

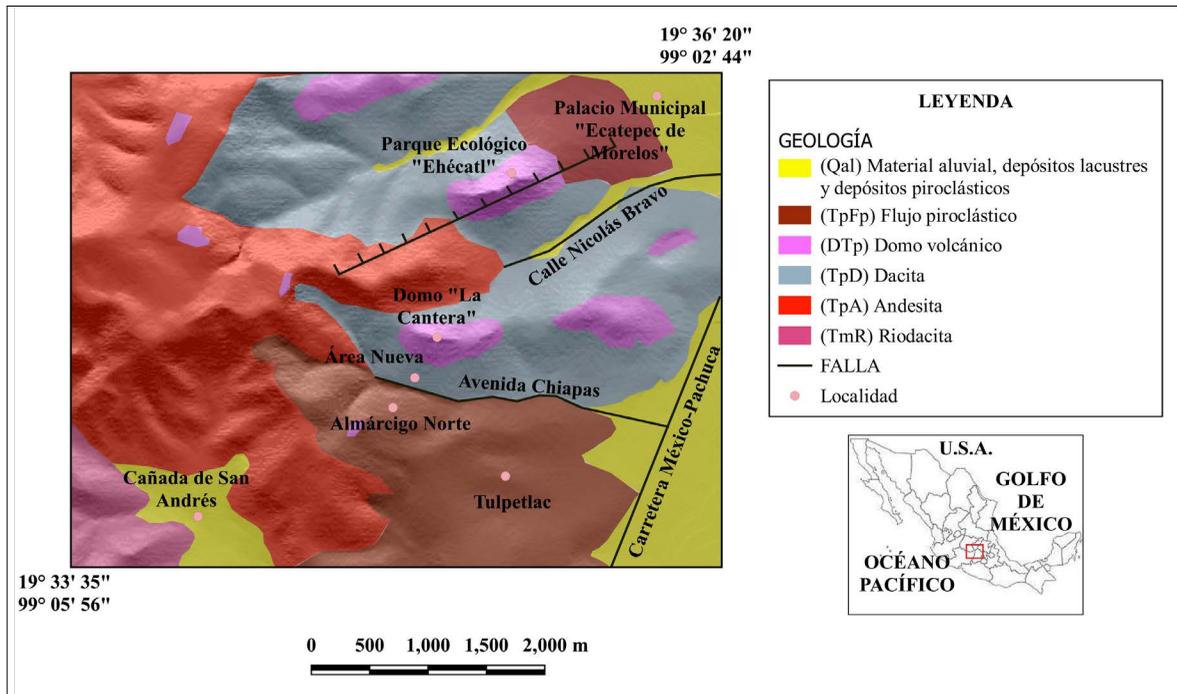


Figura 4. Geología del área de estudio, representada por un domo de composición dacítica. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

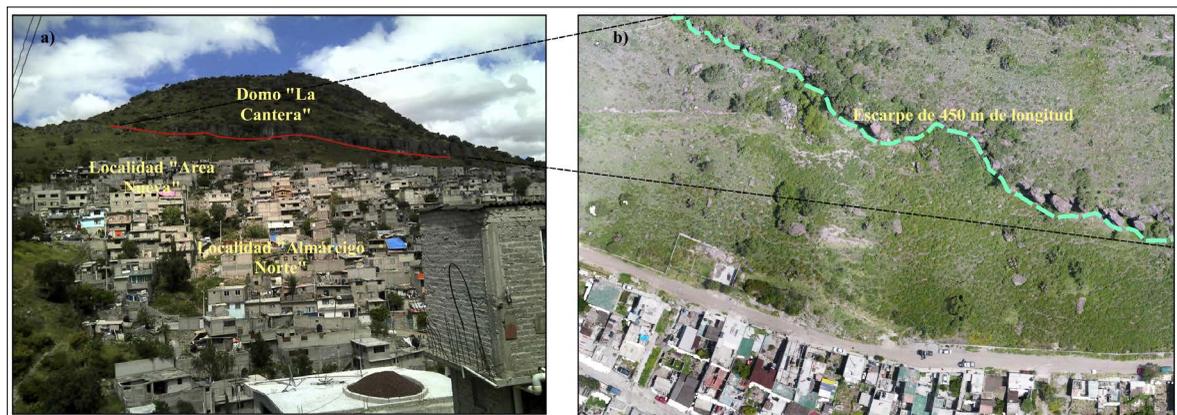


Figura 5. a) Panorámica del domo “La Cantera” donde se aprecia la expansión urbana en la ladera; b) imagen obtenida mediante un dron, donde se observa el escarpe con una longitud lineal de 450 m con una altura promedio de 30 m y la cercanía de la zona habitacional.

bloques desprendidos cubren el 40% del área, con volúmenes diversos que varían desde unos cuantos centímetros hasta más de 100 m³. Se pudo observar en algunas partes del escarpe, que la base de los bloques está constituida por brechas volcánicas, lo cual implica mayor riesgo, ya que son menos resistentes a los procesos erosivos (Figura 6).

Las diaclasas columnares que conforman el escarpe podrían desencadenar volteo de bloques, que involucra la rotación hacia delante de un bloque rocoso en una ladera, resultante de las fuerzas debidas al peso, alrededor de un eje o punto de equilibrio, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden y Varnes, 1996) o volteo por flexión generado en macizos rocosos con un sistema de discontinuidad preferente con fuerte buzamiento hacia el interior de la ladera, presentando columnas en cantiliver (Highland y Bobrowsky, 2008). Cuando ocurre el desprendimiento, el bloque desciende a través de la ladera, principalmente en caída libre, sin embargo, puede rebotar o rodar. Las caídas de bloques pueden ser primarias, cuando se desprenden del sitio original, o secundarias cuando los bloques, previamente desprendidos y detenidos en algún sitio de la ladera, nuevamente se desprenden ahora de este sitio (Cruden y Varnes 1996).

En el área de estudio predominan las pendientes cóncavas y convexas y áreas con vegetación mixta en las laderas y sin vegetación hacia las partes más bajas del domo y donde se ubican los asentamientos humanos. Las elevaciones varían de 2400 msnm,

donde se localiza la zona urbanizada, a 2600 msnm que corresponde con la altura del domo La Cantera. Las pendientes en donde se localizan los depósitos de los bloques cartografiados son, en su mayoría, pendientes de 20-30° y 30-45°, más de 45° cerca del escarpe y en las laderas donde se ubican los asentamientos humanos predominan pendientes de 10-20°.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es realizar un inventario de los depósitos de caídas de rocas e identificar sus características geomorfológicas, así como determinar la distribución de los bloques y su posible relación con los factores que puedan influir en el tamaño del bloque y la distancia potencial que éstos puedan alcanzar a fin de hacer un análisis estadístico.

METODOLOGÍA

Se hicieron recorridos de campo en la localidad Área Nueva y se midieron detalladamente 3 corredores de depósitos de caída de bloques, de los que se obtuvo, para los bloques mayores, su posición geográfica, altitud, pendiente, distancia del escarpe, tamaño, volumen y adherencia del bloque sobre la superficie del terreno (Porcentaje de la superficie del bloque rocoso descubierta por la acción de la erosión (Rendón, 2007) (Figura 7).



Figura 6. a) Bloque potencialmente inestable de 12 m de altura, apoyado sobre una brecha volcánica, localizado a 100 aproximadamente de las casas; b) se observa que las diaclasas columnares de enfriamiento son casi verticales, lo que podría desencadenar volteo por flexión y volteo de bloques, así como caídas primarias y secundarias.

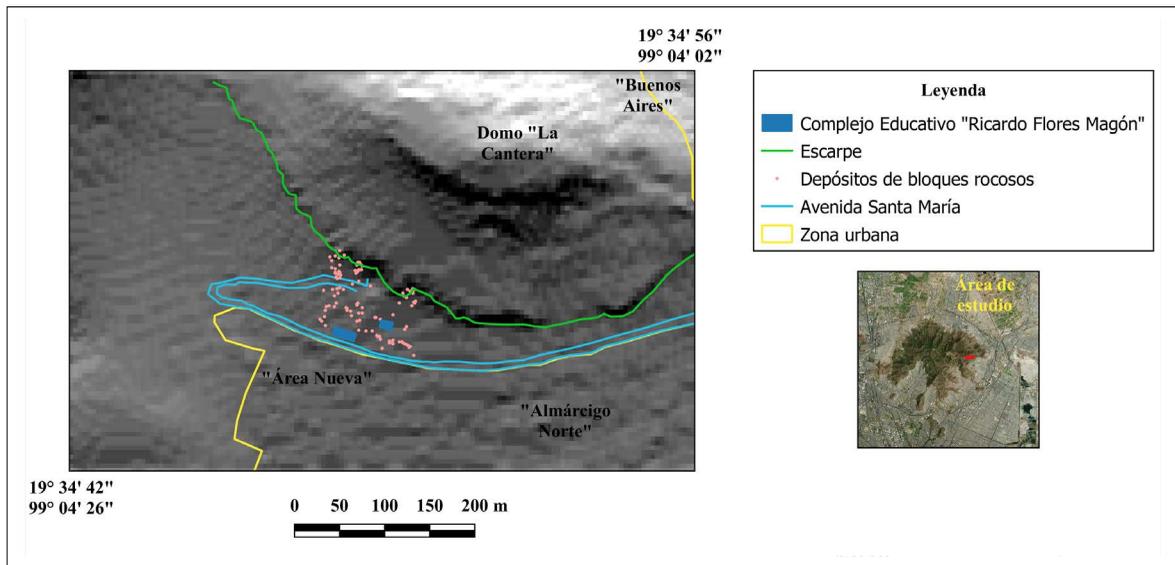


Figura 7. Tres corredores de depósitos con caídas de bloques, de los que se obtuvo la información de los bloques mayores (posición geográfica, altitud, pendiente, distancia del escarpe y volumen). Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

Para determinar la distribución de los bloques se midió el ancho, la altura y longitud del bloque y la distancia recorrida. La información recopilada para el inventario de depósitos de caídas de rocas y las dimensiones de los bloques se realizó en abril de 2017, en septiembre del mismo año se obtuvo una imagen del área, con el apoyo de un dron de baja altitud (sobrevuelo a 80 m de altura), cuya información obtenida fue procesada para su análisis y en octubre de 2019 se realizaron recorridos nuevamente para comparar los cambios que pudieran haberse presentado.

Para estimar la distancia potencial de recorrido de los bloques, se consideró la línea de energía o coeficiente de fricción de Heim (Hsü, 1975; Sheridan y Macías, 1995, Ramírez *et al.*, 2012; Barrantes y Malavassi, 2014). La línea de energía (f) se refiere en este caso de estudio a la relación que existe entre la altura del escarpe, del cual se desprende el bloque y la longitud de la distancia recorrida por este y corresponde a la tangente de la pendiente. La fórmula del coeficiente de fricción o línea de energía es: $f = H/L$, donde: f es la línea de energía; H es la altura del escarpe al depósito de bloques; y L: La distancia recorrida por el bloque.

Para valorar las distancias potenciales de recorrido de los bloques desde el escarpe, se consideraron el volumen del bloque y la línea de energía. Posteriormente se realizó un análisis heurístico de la información obtenida para las variables (litología, grado de la pendiente, aspecto de la pendiente, tipos de ladera, curvatura de la pendiente, curvatura perpendicular a la pendiente, índice de vegetación (NVDI) obtenido de la información satelital Sentinel, considerando las variaciones del año 2016 a 2021 (Figura 8) y el uso de suelo, a fin de determinar si éstas pudieran influir en el tamaño del bloque y su alcance potencial al desprenderse del escarpe. Para determinar la información de las variables se obtuvieron las curvas de nivel del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con intervalos de 10 m, y posteriormente mediante el software ArcGis se obtuvieron a intervalos de 5 m. La información para las variables se desarrolló y analizó mediante un sistema de información geográfica (SIG ArcGis, Ilwis, Qgis), de donde se obtuvieron los mapas ráster a partir de un modelo de elevación: hipsométrico (Figura 9), de pendientes (Figura 10), morfográfico (Figura 11), curvatura de la pendiente, curvatura perpendicular a la pen-

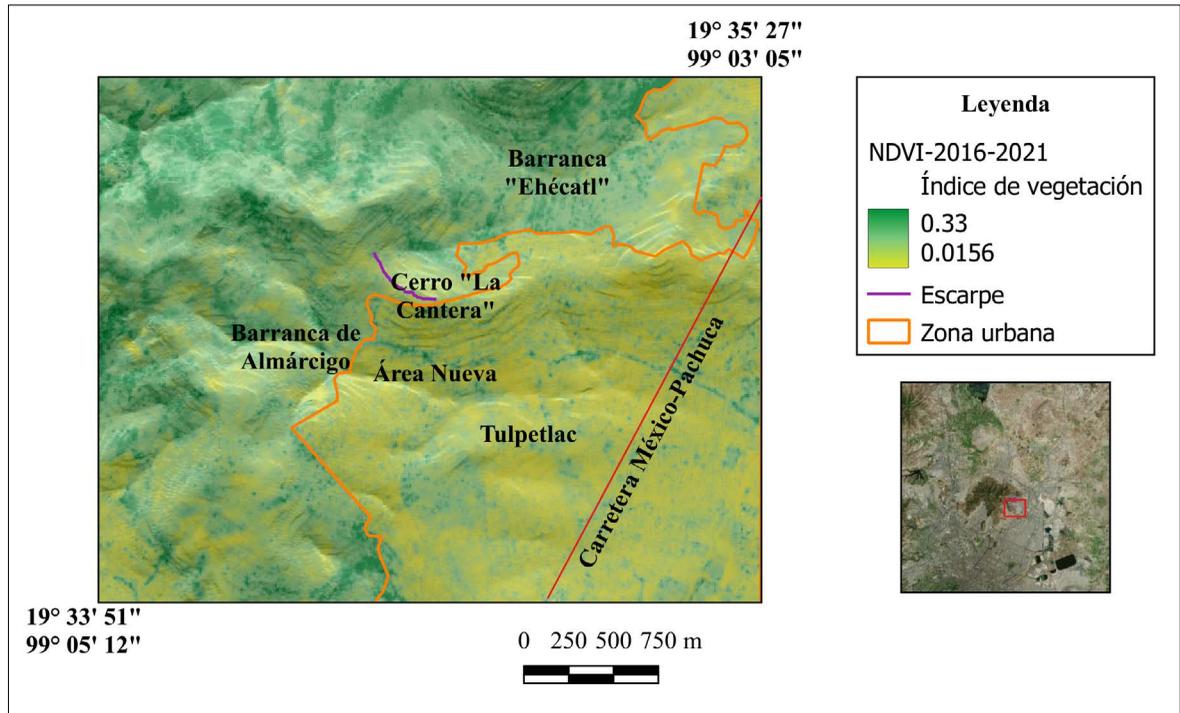


Figura 8. Mapa del NDVI donde se observa principalmente, vegetación mixta, poco densa y sin vegetación hacia las partes bajas del área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de la información satelital Sentinel.

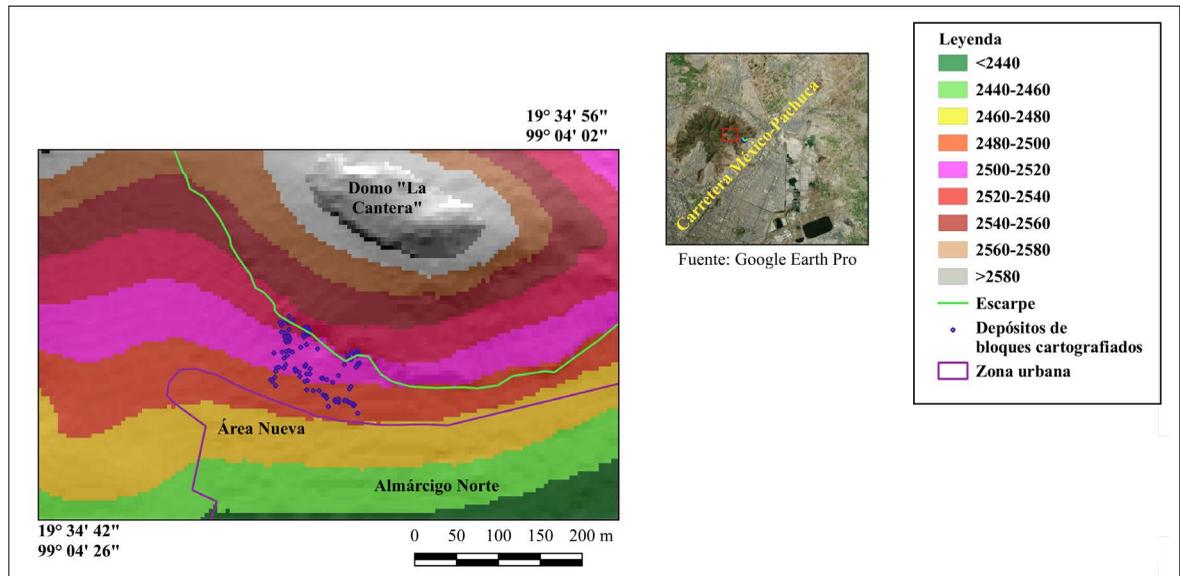


Figura 9. Mapa hipsométrico. Las elevaciones varían de 2400 msnm, donde se localiza la zona urbanizada, a 2600 msnm que corresponde con la altura del domo La Cantera y el escarpe se ubica a una altura entre 2480 a 2520 msnm. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

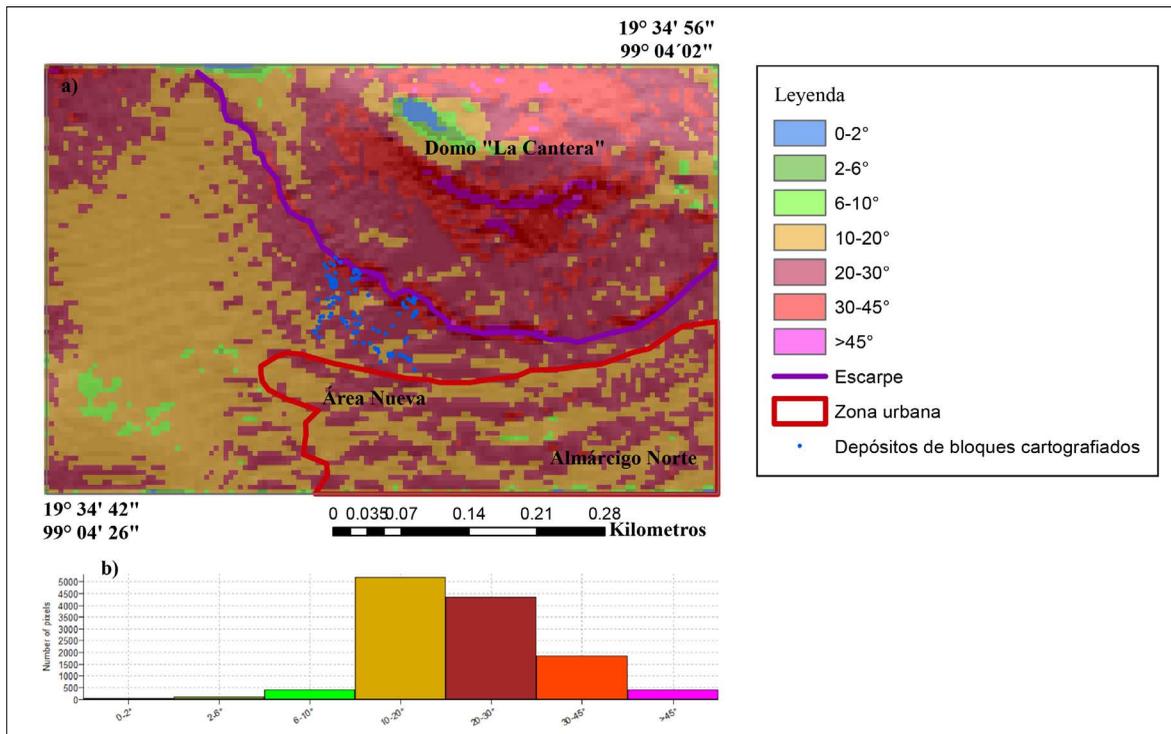


Figura 10. a) Mapa de pendientes, los depósitos de bloques cartografiados se localizan principalmente en pendientes de 20 a 30° y 30 a 45°; b) La tendencia de pendientes en el área varía en su mayoría de 10 a 20° en las partes bajas del domo, 20 a 30° y 30 a 45° en la ladera y de 30 a 45° y más de 45° cerca del escarpe y en la parte alta del domo. Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar INEGI, 2010.

diente, aspecto de la pendiente y vegetación. Los datos para las diferentes variables independientes, utilizadas en cada uno de los puntos cartografiados en campo y trasladados a los SIGs, se obtuvieron considerando la condición representativa para cada pixel y así determinar la información de cada uno de los puntos del inventario.

Con el mapa de curvatura de la pendiente se identifican los tipos de laderas (cóncavas, convexas o planas) y que condicionan el incremento de velocidad al presentarse un desprendimiento de un bloque rocoso. Las pendientes cóncavas favorecen el incremento de la velocidad de un bloque al caer. Con el mapa de curvatura perpendicular a la pendiente se identifican las pendientes convergentes que es donde se incrementa la velocidad, cuando ocurre un deslizamiento o caída de rocas (Figura 12); con ambos mapas se definieron, las áreas con mayor erosión y que son, áreas susceptibles para

favorecer deslizamientos, sobre todo de bloques pequeños. Los depósitos de bloques se ubican principalmente en pendientes convexas y en menor proporción en pendientes cóncavas (Figura 13). El 23% del área de estudio presenta mayor susceptibilidad a la erosión.

Se realizó el análisis estadístico inferencial mediante el procesamiento de la información en el programa IBM SPSS Statistics, la cual se importó del Sistema de información geográfica (SIG ArcGis, Ilwis, Qgis) y de los datos obtenidos en campo.

Se realizaron las pruebas estadísticas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, para determinar el comportamiento de los datos y las pruebas no paramétricas de correlación Rho de Spearman, para determinar si existe correlación entre la línea de energía y las variables: volumen del bloque, pendiente, curvatura de la pendiente y uso de suelo.

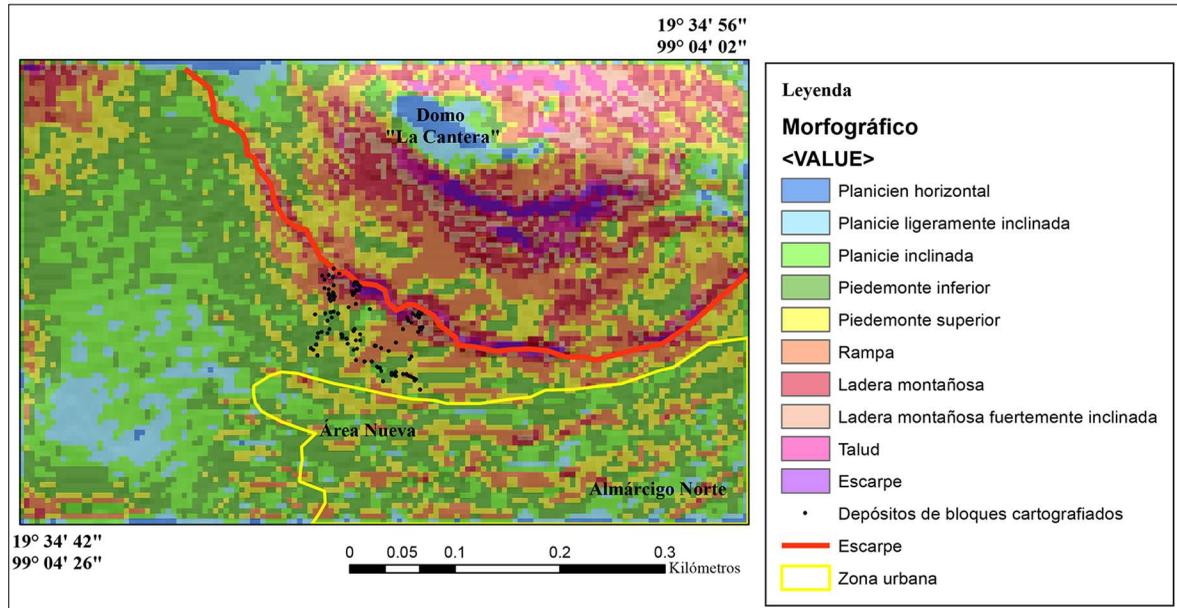


Figura 11. Donde se localiza la zona urbana predominan pendientes de rampas y piedemonte superior y los depósitos de bloques cartografiados están principalmente sobre laderas montañosas y laderas montañosas fuertemente inclinadas. Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar INEGI, 2010.

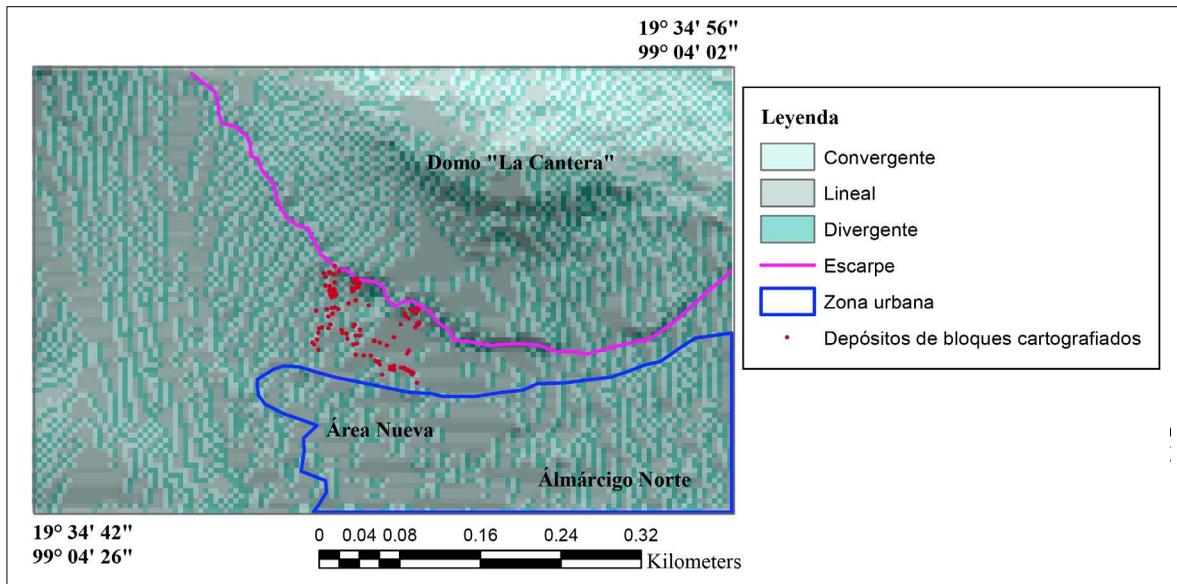


Figura 12. Mapa de la curvatura perpendicular a la pendiente. Los depósitos de bloques cartografiados, en su mayoría se localizan en pendientes divergentes y en menor proporción en pendientes convergentes. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

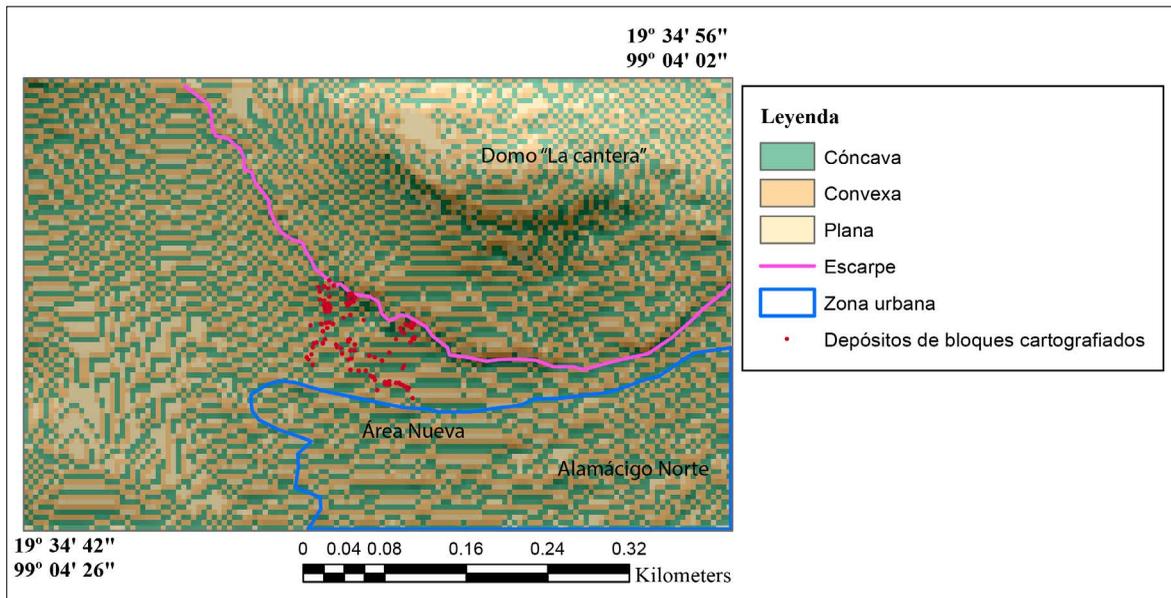


Figura 13. Mapa de la curvatura de la pendiente. Los depósitos de caídas de bloques se ubican principalmente en pendientes convexas y con menor proporción en pendientes cóncavas. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de analizar la información de los mapas generados por los SIG, así como de los datos y observaciones obtenidos en campo, se concluyó que las variables más relevantes que pudieran influir en las eventualidades del tamaño del bloque y la distancia potencial que éste pueda alcanzar son: la pendiente, curvatura de la pendiente y uso de suelo. Varnes (1984), menciona que la pendiente de la ladera, se debe de considerar como un factor condicionante en la inestabilidad de los bloques. En muchos estudios de peligro por caídas de rocas, se considera el ángulo de la pendiente, como una variable independiente y mediante un factor de seguridad cuantifican su tendencia a desestabilizarse (Cruden y Varnes, 1996). Asimismo, las pendientes cóncavas representan mayor riesgo de que los bloques puedan rodar pendiente abajo.

El uso de suelo se consideró, debido a que la población que habita muy cerca del área ejerce fuerte presión sobre el mismo, ya que transita constantemente por el área y realizan, entre otras, actividades deportivas (Figura 14). Se descartó la

información obtenida en los mapas de geología, aspecto de la pendiente, curvatura perpendicular a la pendiente y tipos de ladera.

Se utilizaron los datos de tamaño del bloque y la distancia recorrida desde el escarpe, para determinar la tendencia de distribución de los bloques en el terreno; esto se aplicó para los 3 corredores con los datos mapeados (30, 32 y 52 muestras). En las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk (Tabla 2), se determinó que los datos no siguen una distribución normal. Únicamente se presenta el diagnóstico de normalidad para uno de los corredores, ya que ninguno cumple con el supuesto de normalidad.

Se analizó la distribución de los datos procesados, mediante las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk (Tabla 3), para los tres corredores, considerando las variables: línea de energía (H/L), el volumen del bloque, pendiente, curvatura de la pendiente y el uso de suelo. Del resultado de las pruebas, se comprobó que los datos no siguen una distribución normal.

Para evaluar, el alcance potencial de recorrido de los bloques, a partir del escarpe y conociendo,

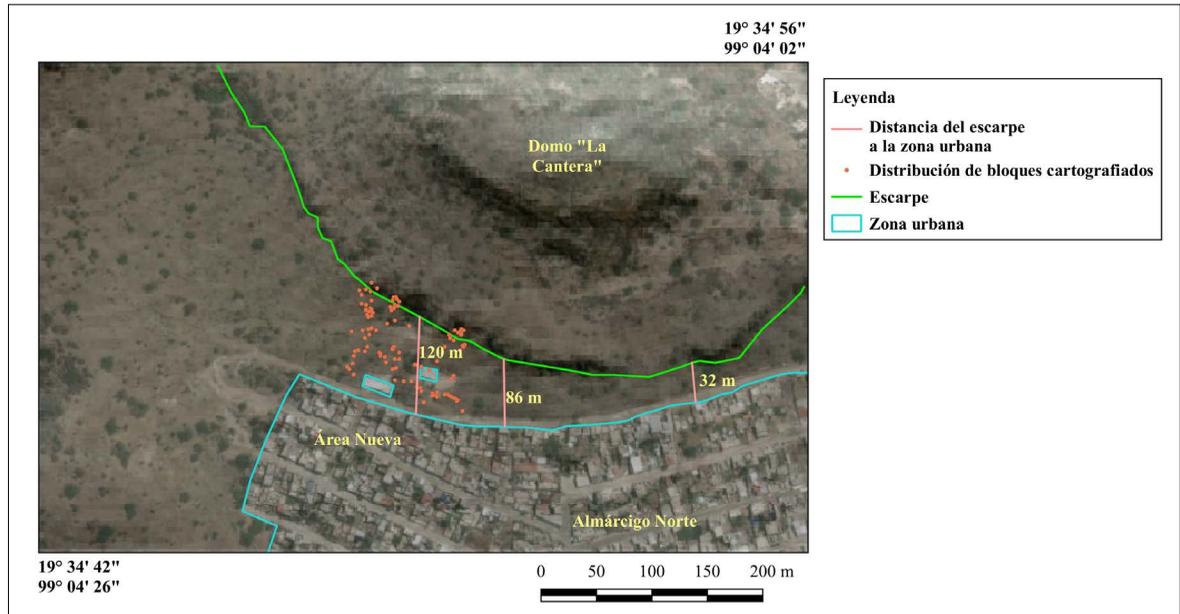


Figura 14. Los asentamientos humanos, se localizan muy cerca del escarpe y ejercen fuerte presión sobre la ladera. Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales 1:50,000 INEGI.

Tabla 2. Prueba de normalidad entre el tamaño del bloque y la distancia recorrida desde el escarpe hasta la ubicación de los depósitos en uno de los corredores muestreados en el domo La Cantera de la localidad Área Nueva.

Prueba de normalidad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Volumen del bloque	0.287	30	0.000	0.675	30	0.000
Distancia	0.164	30	0.039	0.907	30	0.012

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: Datos obtenidos mediante el programa IBM SPSS Statistics con información obtenida del Sistema de Información Geográfica (SIG ArcGis, Ilwis, Qgis) a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar (INEGI, 2010) y de los datos obtenidos en campo.

Tabla 3. Pruebas de normalidad para las variables: línea de energía, volumen del bloque, pendiente, curvatura de la pendiente y uso de suelo de los datos obtenidos.

Prueba de Normalidad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
H/L	0.141	52	0.012	0.880	52	0.000
Volumen de bloque	0.331	52	0.000	0.447	52	0.000
Pendiente	0.296	52	0.000	0.850	52	0.000
Curvatura de la pendiente	0.349	52	0.000	0.718	52	0.000
Uso de suelo	0.453	52	0.000	0.574	52	0.000

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: Datos obtenidos mediante el programa IBM SPSS Statistics con información obtenida del Sistema de Información Geográfica (SIG ArcGis, Ilwis, Qgis) a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar (INEGI, 2010) y de los datos obtenidos en campo.

que los datos no cumplen con el supuesto de normalidad, se realizaron las pruebas no paramétricas de correlación, Rho de Spearman.

De los resultados obtenidos se determinó que entre la línea de energía (H/L) y las variables independientes, uso de suelo, pendiente y volumen del bloque, sí existe correlación (Tabla 4).

Para el uso de suelo se obtuvo una correlación considerable, y es altamente significativa, con un coeficiente de correlación, Rho de Spearman de 0.750, $p = 0.002$; para la pendiente se tiene una correlación inversa o negativa media y es altamente significativa, con un coeficiente de correlación de -0.412, $p = 0.002$; y para el volumen del bloque se obtuvo una correlación negativa débil, significativa, con un coeficiente de correlación de -0.334, $p = 0.016$. Para la clasificación de la correlación, se consideró la escala de Hernández-Sampieri (2018).

De los resultados obtenidos se comprueba que el grado de la pendiente influye de manera significativa en el alcance potencial del recorrido de los bloques rocosos inestables, que pudieran desprenderse del escarpe. Los bloques rocosos inestables de mayor tamaño, en eventualidades de desprendimientos y caídas, recorren distancias cortas, debido a que cerca del escarpe (casi vertical), las pendientes son mayores de 45° y en menor proporción de 30 a 45° ; Los bloques de menor tamaño son los que alcanzan distancias de recorrido mayores, donde las pendientes son en su mayoría de 20 a 30° en la ladera del domo La cantera y de 10 a 20° , donde se localiza la zona habitacional, a

una distancia de 120 m del escarpe. El incremento descontrolado de la deforestación en el área, ha dejado al descubierto bloques de rocas, cerca de la zona habitacional, lo cual aunado al tránsito continuo de los habitantes y sus actividades recreativas, la presencia de construcciones informales y de un corte carretero de terracería (localizado entre la parte baja del domo y las casas), todo ello intensifica el potencial alcance de los bloques al caer del escarpe. Asimismo, por las condiciones alteradas del suelo, los bloques rocosos, pueden rebotar y alcanzar distancias mayores. El rebote se presenta cuando la roca desprendida impacta contra la superficie del talud y la magnitud del rebote está definida por los coeficientes de restitución energética que indican la cantidad de energía disipada durante el impacto; el coeficiente de restitución depende de la velocidad y corresponde a la relación entre la velocidad del bloque antes del impacto y la velocidad después del impacto y esta se puede descomponer en dos direcciones: normal y tangencial (coeficiente normal y coeficiente tangencial). Para conocer las trayectorias de los bloques y la distancia a la cual éstos se detienen después de su caída, es importante conocer la geometría del talud, ya que está íntimamente ligada con los coeficientes de restitución (Arango, 2014). Prades *et al.* (2017) consideran que la propagación del bloque, está condicionada por su volumen, la geometría de la vertiente, las propiedades elásticas del terreno y la presencia de obstáculos, lo que es fundamental para definir las trayectorias de los bloques, la altura de los rebotes

Tabla 4. Correlación Rho de Spearman entre la línea de energía (H/L) y el uso de suelo, pendiente y volumen del bloque en la localidad Área Nueva.

Correlación		H/L	Uso de suelo	Pendiente	Volumen de bloque
Rho de Spearman	Coefficiente de correlación	1	0.750**	-0.412**	-0.334*
	H/L		0.000	0.002	0.016
	Sig. (bilateral)				
	N	52	52	52	52

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

**.. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Datos obtenidos mediante el programa IBM SPSS Statistics con información obtenida del Sistema de Información Geográfica (SIG ArcGis, Ilwis, Qgis) a partir del Modelo Digital de Elevación Lidar (INEGI, 2010) y de los datos obtenidos en campo.

que se puedan producir, las velocidades y los puntos de impacto.

La distancia promedio a partir del escarpe a la ubicación de los depósitos de bloques cartografiados en la ladera, con volúmenes mayores (de 8.7 a 52.5 m³) es de 30 m y a los depósitos de los bloques cartografiados de volúmenes menores (de 0.5 a 8.6 m³) es en promedio de 100 m, limitando con la carretera de terracería en la parte baja de la ladera. Hay muchos bloques de menor tamaño sobre toda la ladera, cubriendo un 40% del área, además de que varios tienen una adherencia al suelo del 10%.

El 46% de la superficie considerada para este estudio está conformada por pendientes cóncavas y éstas favorecen el aumento de la velocidad de los bloques al caer pendiente abajo. El 50% de los depósitos de bloques cartografiados, se ubican en pendientes cóncavas de laderas montañosas y laderas montañosas fuertemente inclinadas a una elevación entre 2466 y 2518 msnm. El 28% del área de estudio presenta zonas de erosión y en varios sitios de la ladera, identificadas con este proceso, se observaron cantidades considerables de rocas de menor tamaño, con posibilidades de acarreo de escombros, por las grandes avenidas durante la presencia de lluvias torrenciales. La tendencia de orientación de las pendientes es en general N-NW.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Sierra de Guadalupe fue declarada en 1923 como Zona de Protección Forestal y, posteriormente, en 1976, Área Natural Protegida (ANP), sin embargo, los asentamientos humanos sobre las laderas se intensificaron a partir de la década de 1970 a la fecha, a pesar de las medidas implementadas por los gobiernos. Por naturaleza de formación de la sierra, derivada de eventos volcánicos, existe intenso diaclasamiento y fracturamiento, aunado a que en varias partes de la misma había explotación de bancos de material, lo que intensificó el fracturamiento por efectos de voladura. Asimismo las condiciones geológicas, geomorfológicas y la fuerte presión ambiental, social y urbana que se ejerce sobre la Sierra de Guadalupe, aunado a eventos

naturales como lluvias torrenciales y la actividad sísmica, detonan en los desprendimientos de rocas y deslizamientos de escombros aumentando el riesgo para la población. En los últimos años con las grandes avenidas durante las lluvias torrenciales se han originado desprendimientos de bloques y flujo de escombros en varias zonas de la sierra, y durante los sismos ocurridos en 2017 se desprendieron varios bloques hacia la parte sur del área de estudio en el domo Cerro Gordo.

La zona de Almárcigo donde se localiza la localidad Área Nueva es considerada como una de las áreas de mayor riesgo debido a que los asentamientos se localizan a 120 m aproximadamente del escarpe altamente diaclasado y fracturado, ahí se localizan las colonias Almárcigo Norte, Almárcigo Sur y Santa Cruz. Algunos habitantes de la localidad Área Nueva nos comentaron que en algunas ocasiones se han presentado caídas de bloques sobre la localidad, alcanzado distancias mayores a 300 m (Figura 15).

Se realizó el análisis estadístico inferencial mediante el procesamiento de la información en el programa IBM SPSS Statistics. Se determinó la tendencia de distribución de los bloques en el terreno, con los datos de tamaño del bloque y la distancia recorrida desde el escarpe, mediante las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, que indican que el tamaño del bloque y la distancia recorrida desde el escarpe no presentan una distribución normal.

Las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk permitieron estimar las distancias potenciales del viaje del bloque, y usando la línea de energía (H/L) y las variables: volumen del bloque, el grado de pendiente y uso de suelo; se determinó que los bloques no siguen una distribución normal, y la correlación Rho de Spearman muestra que sí existe correlación entre las variables mencionadas y la línea de energía. Para el uso de suelo se obtuvo una correlación considerable, y es altamente significativa, que para la pendiente se tiene una correlación inversa o negativa media y es altamente significativa y para el volumen del bloque se obtuvo una correlación negativa débil, significativa.

El grado de la pendiente es un factor condicionante significativo que determina el alcance

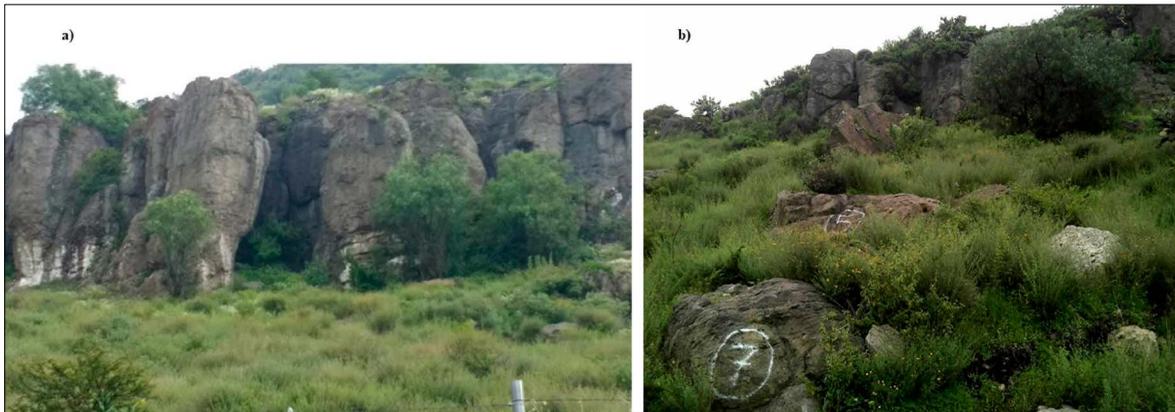


Figura 15. a) Escarpe del domo La Cantera, el cual presenta fuerte diaclasamiento por enfriamiento y fracturamiento; b) bloques desprendidos del escarpe por volcamiento y su posterior deslizamiento sobre la ladera.

potencial del recorrido de los bloques, que pudieran desprenderse del escarpe. Los bloques rocosos de mayor tamaño, al desprenderse, recorren distancias cortas, debido a que cerca del escarpe (casi vertical), las pendientes son mayores de 45° y en menor proporción de 30 a 45° . Los bloques de menor tamaño son los que alcanzan distancias mayores, donde las pendientes son en su mayoría de 20 a 30° en la ladera del domo La cantera y de 10 a 20° , donde se localiza la zona habitacional, a una distancia de 120 m del escarpe. Un factor importante que se debe considerar es el coeficiente de restitución que indica la cantidad de energía conservada tras el impacto sobre la superficie y que determina la magnitud de los rebotes. El coeficiente de restitución depende de la velocidad del bloque desprendido al impactar sobre la superficie, la geometría de la pendiente, las propiedades elásticas de la ladera y la presencia de obstáculos, siendo que en gran parte de la ladera la vegetación es casi imperceptible, el espesor del suelo es de unos cuantos centímetros, además del fracturamiento y diaclasamiento presente, puede ocasionar que los bloques al desprenderse puedan rebotar y alcanzar trayectorias mayores.

La zona de estudio presenta desertificación por la alteración de la cubierta vegetal, en algunas porciones de la ladera su ausencia deja al descubierto bloques diaclasados. El crecimiento urbano continúa invadiendo las partes altas, construyendo casas y escuelas (Complejo Educativo “Ricardo

Flores Magón”), además de caminos de terracería, incrementando la posibilidad de que los bloques rocosos alcancen distancias mayores e impacten sobre las casas, ocasionando daños considerables a sus habitantes. Además siendo la zona susceptible a lluvias torrenciales y sismos aumenta la probabilidad de ocurrencia a estos eventos. La distancia máxima promedio a partir del escarpe a la ubicación de los depósitos de bloques cartografiados en la ladera, con volúmenes mayores (de 8.7 a 52.5 m^3) es de 30 m y a los depósitos de los bloques cartografiados de volúmenes menores (de 0.5 a 8.6 m^3) es en promedio de 100 m. Hay muchos bloques de menor tamaño sobre toda la ladera, cubriendo un 40% del área, además de que varios tienen una adherencia al suelo del 10% .

El 46% de la superficie de la zona de estudio, está conformada por pendientes cóncavas. El 50% de los depósitos de bloques cartografiados, se ubican en pendientes cóncavas de laderas montañosas y laderas montañosas fuertemente inclinadas a una elevación entre 2466 y 2518 msnm. El 28% del área presenta zonas de erosión y algunas coinciden con depósitos de rocas de menor tamaño, en donde existe la susceptibilidad por deslizamientos de escombros, durante las grandes avenidas cuando se presentan lluvias torrenciales. La tendencia de orientación de las pendientes es en general N-NW.

El escarpe está fuertemente diaclasado y fracturado por enfriamiento, siendo un factor relevante

para determinar el tamaño de los bloques rocosos con peligro de desprenderse.

La sismicidad es un factor detonante para los desprendimientos de bloques inestables toda vez que la zona de estudio está enclavada en la Faja Volcánica Transmexicana, y derivado de los sismos ocurridos en 2017, se presentaron eventos de caídas de bloques en el Cerro Gordo, en la porción sur del área.

Otro factor muy importante, que se debe considerar para un estudio posterior, es el referente a las condiciones hidrometeorológicas, ya que durante los últimos años en la Sierra de Guadalupe se han dado un aumento de eventos por deslizamientos de tierra y desprendimientos de bloques, derivados de las lluvias atípicas y caída de granizo, principalmente durante los meses de septiembre y octubre.

Se recomienda que los bloques inestables de mayor tamaño se estabilicen mediante anclajes, evitar se sigan realizando construcciones, estableciendo una franja de seguridad de al menos 100 metros a partir de la base del escarpe hasta los límites con la carretera de terracería y llevar a cabo programas de reforestación con plantaciones forestales propias de la región.

Concientizar a la población sobre los riesgos en la zona por eventos de caídas de rocas y de alguna manera restringir el acceso a fin de prevenir y mitigar algún evento que se pudiera presentar por este tipo de procesos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT # IN100223), UNAM.

REFERENCIAS

- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimiento del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 41, 7-25.
- Arango, I. (2014). *Desprendimiento de rocas en laderas: una guía para la evaluación del riesgo en vías*. Medellín, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT.
- Aristizábal, E., Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 17-30.
- Baeza, C., Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf Proc Land* 26(12), 1251-1263. <https://doi.org/10.1002/esp.263>
- Barrantes G., Malavassi E. (2015). Mapa de peligros del volcán Poás, Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, 24 (2), 157-172. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50219>
- Bragagnolo, L., da Silva, R.V., Grzybowski, J. M. V. (2020). Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks. *Environmental Modelling and Software*, 123(1), 104565. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104565>
- Campa, M. F. (1965). *Breve análisis petrográfico de la Sierra de Guadalupe*. Tesis. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- Carlos, V. (2004). *Zonificación de peligros por inestabilidad de taludes en la Sierra de Guadalupe y propuesta geotécnica de mitigación*. Tesis. Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Carlos, V., García-Palomo, A., López-Miguel, C., Galván-García, A. H. (2007). Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo couleé: cerro El Tenayo, Tlalnepantla, estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2), 183-201. <https://doi.org/10.18268/BSG-M2007v59n2a4>
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology* 15(3), 403-426. <https://doi.org/10.1007/BF01031290>
- Chung, C. F., Fabbri, A. G., Van Westen, C. J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. En A. Carrara, F. Guzzetti (Eds.), *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 107-133). Kluwer Publishers, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_7
- Cruden, D. M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden D. M. y Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes. En A. K. Turner y R. L. Shuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board, Special Report, 247
- Devoli, G. Strauch, W., Chávez, G., Haeh, K. (2007). A landslide database for Nicaragua: a tool for landslide-hazard management. *Landslides*, 4, 163-176. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0074-8>

- Dikau, R., Brunsten, D., Schrot, L., Ibsen, M. L. (1996). *Landslide recognition*. Chichester, John Wiley & Sons.
- EPOCH (European Community Programme). (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. Flageollet, J. C., 3 volumes, Contract no 90 0025.
- García A., Carlos, V., López, C., Galván, A. Concha, A. (2006). Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana*, LVIII(2), 195-204. <https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a2>
- Goyes, P., Hernández, A. (2021). Doble evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa basada en redes neuronales artificiales y pesos de evidencia. *Boletín de Geología*, 43(1), 173-191. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021009>
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: Mc Graw Hill. <https://doi.org/10.17993/CcyLl.2018.15>
- Highland L. y Bobrowsky, P. (2008). *El manual de deslizamientos: una guía para entender los deslizamientos*. Virginia U.S. Geological Survey Circular 1325.
- Hsü, K. J. (1975). Catastrophic debris streams (Sturztroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 129-140. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<129:CDSSGB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<129:CDSSGB>2.0.CO;2)
- Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. En C. Bonnard (Ed.), *Proceedings Fifth International Symposium on Landslides* (pp. 3-35). Rotterdam: Balkema.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021, Enero 26). En el Estado de México somos 16 992 418 habitantes: Censo de Población y Vivienda 2020 [Comunicado de Prensa No 55/21]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso2020_EdMx.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. México en cifras. INEGI. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=150330001#collapse-Resumen>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2010). Conjunto de datos vectoriales Hoja Cuautitlán, escala 1:50 000. Topografía (INEGI). Recuperado en 2010 de: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Lazari, M., Gherardi, E., Lappena, V., Loporte, A. (2006). Natural hazards vs human impact: an integrated methodological approach in geomorphological risk assessment on the Tursi historical site, Southern Italy. *Landslides*, 3, 275-287. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0055-y>
- Lozano L. (1968). *Geología de la Sierra de Guadalupe*. México, D. F. Tesis. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.
- Lugo, J. (1990). El relieve de la República Mexicana. *Revista del Instituto de Geología, Instituto de Geología, UNAM*, 9(1), 82-111.
- Lugo J., García T., Zamorano J. J., Salas O., Gallegos G. (1995). Deslizamiento de tierras en Metztlán, Hidalgo. *Ciencia y Desarrollo*, 20(121), 323-343.
- Lugo, J., Salinas, A. (1996). Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), 240-251.
- Lugo, J., Zamorano, J. J., Capra, L., Invar, M., Alcántara, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J. A., Ruiz, R., Prades, A. (2017). Modelización de desprendimientos rocosos considerando la fragmentación. *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 881-892). Santander, CIMNE.
- Mooser, F. (1975). Historia Geológica de la Cuenca de México. En *Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo*. México: Departamento del Distrito Federal.
- Naranjo, J. L., van Westen, C.J., Soeters, R. (1994). Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis: a case study in Colombia. *ITC Journal*, 3, 292-300.
- Ordoñez, E. (1895). Las rocas eruptivas del suroeste de la Cuenca de México. *Instituto Geológico de México, Boletín 2*.
- Prades, A., Matas, G., Nuñez, A., Bill, F., Lantada, N., Corominas, J. (2017). Determinación de trayectorias de bloques rocosos en ensayos mediante videogrametría. *Primer Congreso en Ingeniería Geomática* (pp. 1-7). Valencia. <https://doi.org/10.4995/CIGeo2017.2017.6617>
- Ramírez, L. M. (2011). *Estudio vulcanológico de la Sierra de Guadalupe, norte de la ciudad de México*. Tesis. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- Ramírez, M. T., Moshe I., Legorreta G. (2012). One hundred years of the rock fall triggered by the 1912 Acambay earthquake, Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 56(4), 495-505. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0084>
- Rendón, A., Vargas, R. D., Arias, A. (2007). Propuesta metodológica para priorizar áreas con amenaza por caída de rocas en entornos urbanos, como base para

- el reordenamiento urbano y la mitigación del riesgo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 21, 59-69.
- Ríos R., Ribó A., Mejía R., Molinas, G. (2015). Combinado redes neuronales y geoestadística para evaluación de deslizamientos de tierra del área metropolitana de San Salvador, El Salvador. *Revista de Matemática: Teoría y aplicaciones*, 23(1), 155-172. <https://doi.org/10.15517/rmta.v23i1.22439>
- Sheridan, M. F., Macías, J. L. (1995). Estimation of risk probability for gravity-driven pyroclastic flows at Volcan Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66, 251-256. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00058-O](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00058-O)
- Shirzadi, A., Saro, L., Joo, O. H., Chapi, K. (2012). A GIS-based logistic regression model in rock-fall susceptibility mapping along a mountainous road: Salavat Abad case study, Kurdistan, Iran. *Natural Hazards*, 64, 1639-1656. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0321-3>
- Soyoung, P., Chuluong C., Byungwoo, K., Jinsoo, K. (2013). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area. *Korea Environ Earth Science*, 1443-1464. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1842-5>
- Suzen, M. L., Doyuran V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5), 665-679. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8>
- Tapia, G., López, J. (2002). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 50-5.
- Tharwat, A. (2021). Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*, 17(1), 168-192. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.003>
- Thiery Y., Malet J. P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O. (2008). Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. *Geomorphology* 92, 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.020>
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. En R. L. Schuster y R. L. Krizek (Eds.), *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (pp. 11-33). Washington: TRB, National Research Council.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice: IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements*. Paris: The UNESCO Press, United Nations Educational.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Tukey): Comparisons of results and confirmations. *Catena*, 71, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>