

Flujos de escombros en la cuenca del río Salsipuedes, San Gabriel, Jalisco: procesos de disparo, efecto de suelos afectados por incendios y evaluación de la amenaza asociada

Lizeth Mariela Cortes-López^{1,*}, Lucia Capra Pedol^{1,a}, Lorenzo Borselli^{2,b}, y Sara Solís-Valdez¹

¹ Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro 76230, México.

² Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Manuel Nava #8, Zona Universitaria, C. P. 78290 San Luis Potosí, México.

* Autor de correspondencia (L. M. Cortes López): cortes.wlp.9@gmail.com

^a 0000-0003-3973-7264; ^b 0000-0003-1423-5700

EDITORIA:

Natalia Pardo Villaveces

CÓMO CITAR:

Cortes-López, L. M., Capra Pedol, L., Borselli, L., Solís-Valdez, S. (2026). La geomorfología en el noreste de México: Flujos de escombros en la cuenca del río Salsipuedes, San Gabriel, Jalisco: procesos de disparo, efecto de suelos afectados por incendios y evaluación de la amenaza asociada. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 43(1), 11–30. DOI: <https://dx.doi.org/10.22201/igc.20072902e.2026.1.1917>

Manuscrito recibido: noviembre 24, 2025

Manuscrito corregido recibido: marzo 10, 2026

Manuscrito aceptado: marzo 12, 2026

Publicado en línea: abril 1, 2026

COPYRIGHT

© 2026 Los autores.

Este es un artículo de acceso-abierto publicado y distribuido por la Universidad Nacional Autónoma de México bajo los términos de una [Licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento 4.0 Internacional \(CC BY\)](#), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se de crédito al autor original y la fuente.



RESUMEN

Los flujos de escombros son fenómenos altamente destructivos que se generan con frecuencia durante eventos de lluvias intensas en laderas altamente susceptibles a procesos erosivos, ya sea por el cambio de uso de suelo por actividad antrópica o por incendios. La pérdida de cobertura vegetal y la alteración de las propiedades físicas del suelo limitan la infiltración y favorecen la generación de escorrentía y la removilización de grandes volúmenes de sedimentos, con la formación de flujos de escombros y daños importantes a la infraestructura y a la población. Un caso crítico ocurrió el 2 de junio de 2019 en el municipio de San Gabriel, Jalisco. Intensas lluvias en la cuenca del río Salsipuedes, afectada por incendios ocurridos en mayo del mismo año, desencadenaron flujos de escombros de más de seis metros de profundidad. Estos flujos descendieron por el cauce del río, inundaron el centro urbano del municipio de San Gabriel, provocando la muerte de cinco personas, numerosos damnificados y severos daños materiales. Flujos de escombros han sido frecuentemente observados a lo largo del río Salsipuedes en años anteriores; sin embargo, el evento registrado en el 2019 ha sido uno de los más catastróficos en las últimas décadas. Para entender los factores que propician este fenómeno, se realizó un análisis integral de la cuenca hidrográfica del río Salsipuedes. Esto incluyó un estudio morfológico, un análisis espacio-temporal del cambio de uso de suelo en el período comprendido entre 2014 y 2022 en las 12 subcuencas que alimentan al río y una cuantificación de las áreas quemadas por los incendios forestales de 2019. Además, se evaluó la precipitación histórica (1946-1991) de la estación meteorológica de San Gabriel, para establecer umbrales de lluvia con diferentes períodos de retorno (5, 10, 15 y 20 años), y su relación con la formación de flujos de escombros. Con base en esta información, se analizaron los cambios espaciotemporales de la susceptibilidad del suelo a la erosión y se realizaron simulaciones de lluvia-escurrimiento en tres escenarios críticos de precipitación (90 mm, 100 mm y 150 mm) para cada subcuenca. Las descargas obtenidas se emplearon para modelar flujos de escombros con diferentes reologías, lo que permitió generar un mapa de peligro de inundación por flujos de escombros según diferentes escenarios de lluvias. Estos resultados ofrecen herramientas clave para implementar medidas de mitigación, con el objetivo de reducir la exposición de la población de San Gabriel a este tipo de eventos extremos, especialmente durante la temporada de precipitaciones.

Palabras clave: flujos de escombros; erosión; incendios; FLO-2D; San Gabriel; Jalisco; México.

ABSTRACT

Debris flows are highly destructive geomorphic processes that occur when intense rainfall falls on areas recently affected by wildfires. The loss of vegetation cover and changes in soil properties reduce infiltration, increase surface runoff, and mobilize large volumes of sediment. These flows, driven by gravity, can transport coarse materials such as logs and boulders downslope, causing significant damage to infrastructure and posing serious risks to human life. A critical event happened on June 2, 2019, in the municipality of San Gabriel, Jalisco, when heavy rainfall over a watershed recently impacted by wildfires (in May of the same year) triggered debris flows over 6 meters deep. These flows traveled down the Salsipuedes river channel, leading it to overflow and directly impact the urban center. The event caused five fatalities, displaced many residents, and resulted in extensive material damage. To understand the factors that led to this post-fire debris flow, an integrated assessment of the Salsipuedes river watershed was performed. This included a morphological analysis, a spatiotemporal study of land use changes from 2014 to 2022 across the 12 sub-watersheds feeding the river, and a precise calculation of the areas affected by the May 2019 wildfires. Furthermore, historical precipitation data (1946-1991) from the San Gabriel meteorological station were analyzed to establish rainfall thresholds corresponding to return periods of 5, 10, 15, and 20 years, as well as to evaluate their relationship with debris flow initiation. Using this information, variability in soil erodibility over space and time was determined, and rainfall-runoff simulations were conducted for each sub-watershed under three critical rainfall scenarios: (1) 100 mm with a 5-year return period, (2) 150 mm with a 20-year return period, and (3) 90 mm accumulated in a single day with a 20-year return period. The resulting discharge values were then applied in debris flow models featuring different rheological approaches, enabling the creation of hazard maps that highlight areas potentially at risk of debris flow inundation. The results include a debris flow hazard map under various rainfall scenarios, offering essential insights for risk mitigation efforts. These findings support informed decision-making aimed at reducing the vulnerability of San Gabriel's population to post-fire debris flow events, especially during the rainy season.

Keywords: debris flow; wildfire; erosion; FLO-2D; San Gabriel; Jalisco; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son procesos frecuentes durante eventos hidrometeorológicos extremos. Los principales factores naturales que favorecen la ocurrencia de estos procesos son: la pendiente del relieve, su morfología y la alternancia de suelos y/o sedimentos que pueden generar discontinuidades hidráulicas. Por otro lado, factores asociados a la actividad antrópica, como por ejemplo cambios de uso de suelo por deforestación a favor de cultivos, muchas veces asociados a quemas intensivas, promueven la degradación del suelo y modifican el sistema hidrológico promoviendo el escurrimiento

En México, la ocurrencia de PRM durante eventos hidrometeorológicos extremos ha provocado daños y muertes. Después de varios días de lluvias, debido al paso de los huracanes Ingrid y Manuel, el 16 de septiembre de 2013, en la comunidad La Pintada, en el estado de Guerrero, ocurrió un PRM que destruyó y sepultó viviendas, provocando la muerte de 71 personas. En 1999, durante un evento de lluvias extraordinarias en la Sierra Norte de Puebla, se registró un deslizamiento que afectó la colonia La Aurora, en Teziutlán, en el que fallecieron 130 personas (Cardón, 2020).

El incremento en la ocurrencia de estos fenómenos de inestabilidad de ladera, que llevan a la formación de flujos de escombros, así como el potencial de peligro asociado a los grandes volúmenes de material removilizado, constituyen motivos de estudio para entender los factores desencadenantes y definir las zonas de posible afectación, a fin de mitigar los efectos negativos en escenarios futuros. En este trabajo se analiza el evento ocurrido en el 2019, en el poblado de San Gabriel, Jalisco. A raíz de lluvias intensas ocurridas unos días después de grandes incendios forestales, el 2 de junio de 2019 el municipio de San Gabriel fue afectado por el descenso de un flujo de escombros por el río Salsipuedes, con importantes daños a la comunidad y la pérdida

de cinco vidas. Como sugiere su propio nombre, en la cuenca del río Salsipuedes – zona dedicada a la agricultura intensiva de aguacate – la generación de flujos de escombros durante la temporada de lluvias es un fenómeno recurrente. En este trabajo se analizaron los factores geohidrológicos que favorecen este proceso, con especial énfasis en el cambio de uso de suelo y en el papel de la modificación de la cobertura vegetal tras los incendios ocurridos en 2019. El análisis se realizó en las 12 subcuencas que conforman la cuenca del río, considerando el cambio de uso de suelo a lo largo de los últimos ocho años, así como la identificación de la zona afectada por los incendios registrados en mayo de 2019, a partir de imágenes de satélite (Landsat y Sentinel). El registro de lluvia de 1946 a 1991 permitió realizar un análisis histórico y definir los periodos de retorno de eventos extremos. Considerando los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo y los volúmenes de lluvia con periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años, se empleó el código FLO-2d (O'Brien, 1993) para la realización de simulaciones de lluvia-escurrimiento obteniendo curvas de descargas para identificar los cambios hidrológicos debido a los cambios de uso de suelo (cultivos e incendios) y su impacto en la generación de flujos de escombros. Las mismas curvas fueron posteriormente utilizadas para la definición de las zonas de posible inundación e impacto por flujos de escombros, en caso de que un evento similar al 2019 volviera a ocurrir.

CUENCA DEL RÍO SALSIPUEDES

La zona de estudio se encuentra al sur del estado de Jalisco, en el municipio de San Gabriel. La cuenca hidrográfica tiene un área de 177.83 km². Las elevaciones más altas se presentan en la porción sur, con un valor de 2651 m s.n.m., seguidas de los flancos norte y noreste, con un rango de 2380–2200 m s.n.m. En la parte alta de la cuenca, las pendientes son mayores a 50°, y con inclinaciones mayores a 25° en la

porción sur. La cuenca está formada principalmente por depósitos volcánicos-clásticos del volcán Cántaro, el edificio volcánico más antiguo del Complejo Volcánico de Colima (Cortés *et al.*, 2010). En particular, los depósitos consisten principalmente en flujos piroclásticos de pómez y ceniza, poco consolidados, en los cuales se han desarrollado suelos arcillosos tipo andosoles. Respecto a la hidrología, la corriente de mayor orden es el río Salsipuedes, que atraviesa la parte central de la cuenca y al que drenan los demás drenajes secundarios (Figura 1). La cuenca está intensamente modificada por actividad humana, principalmente por cultivos de aguacate y maguey.

Evento de 2019, San Gabriel, Jalisco

En la tarde del domingo 2 de junio de 2019 el municipio de San Gabriel, Jalisco, fue afectado por el emplazamiento de un flujo de escombros, disparado por la ocurrencia de lluvias intensas en la cuenca hidrográfica del río Salsipuedes que, en semanas anteriores había sido afectada por grandes incendios forestales. A partir de imágenes satelitales Sentinel-2 con fecha anterior y posterior al evento del 2 de junio de 2019, se puede observar la zona inundada que dejó el flujo de escombros, en el poblado de San Gabriel (Figura 2a). Con base en imágenes y videos del evento reportados por noticieros y periódicos, se puede inferir que los flujos de escombros, con hasta seis metros

de profundidad, descendieron por el canal que atraviesa el centro urbano, arrastrando gran cantidad de troncos en superficie (Figuras 2b y 2c). A su paso, el flujo dejó un depósito homogéneo, compuesto principalmente por grava y arena, sin grandes fragmentos de rocas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Geometría de la cuenca

A partir del uso de un Sistema de Información Geográfica (QGIS 3.4.2), se realizó una caracterización morfológica de la cuenca para el cálculo de hipsometría, pendientes y curvatura de laderas, utilizando un Modelo Digital de Elevación (DEM), con una resolución de 12.5 m. obtenido de Alos Palsar (<https://search.asf.alaska.edu/>). Posteriormente, se llevó a cabo un estudio hidrológico con el fin de delinear las subcuencas, así como la red hidrológica. Las subcuencas se caracterizaron mediante el índice de Gravelius K_G (Gravelius, 1914; Bendjoudi y Hubert, 2002), el cual define la relación entre el perímetro de una cuenca (P) y su superficie (A), siguiendo la Ecuación (1)

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

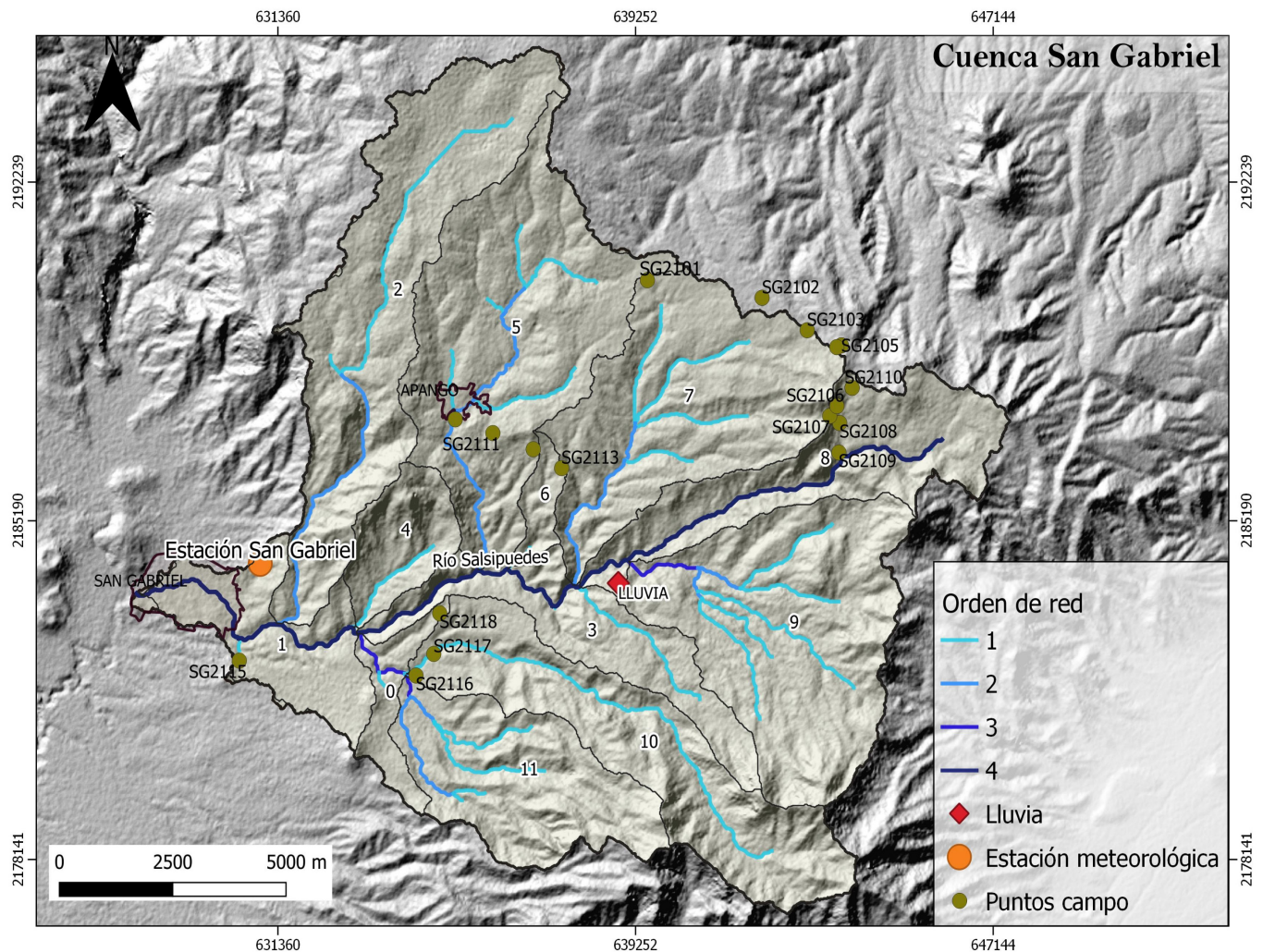


Figura 1. Mapa del área de estudio. Se muestran los límites de las subcuencas, los puntos analizados en campo, así como la ubicación de la estación meteorológica San Gabriel del Servicio Meteorológico Nacional. Punto de lluvia se refiere a la localización utilizada para el muestreo de la base de datos de Carrera-Hernández (2025).

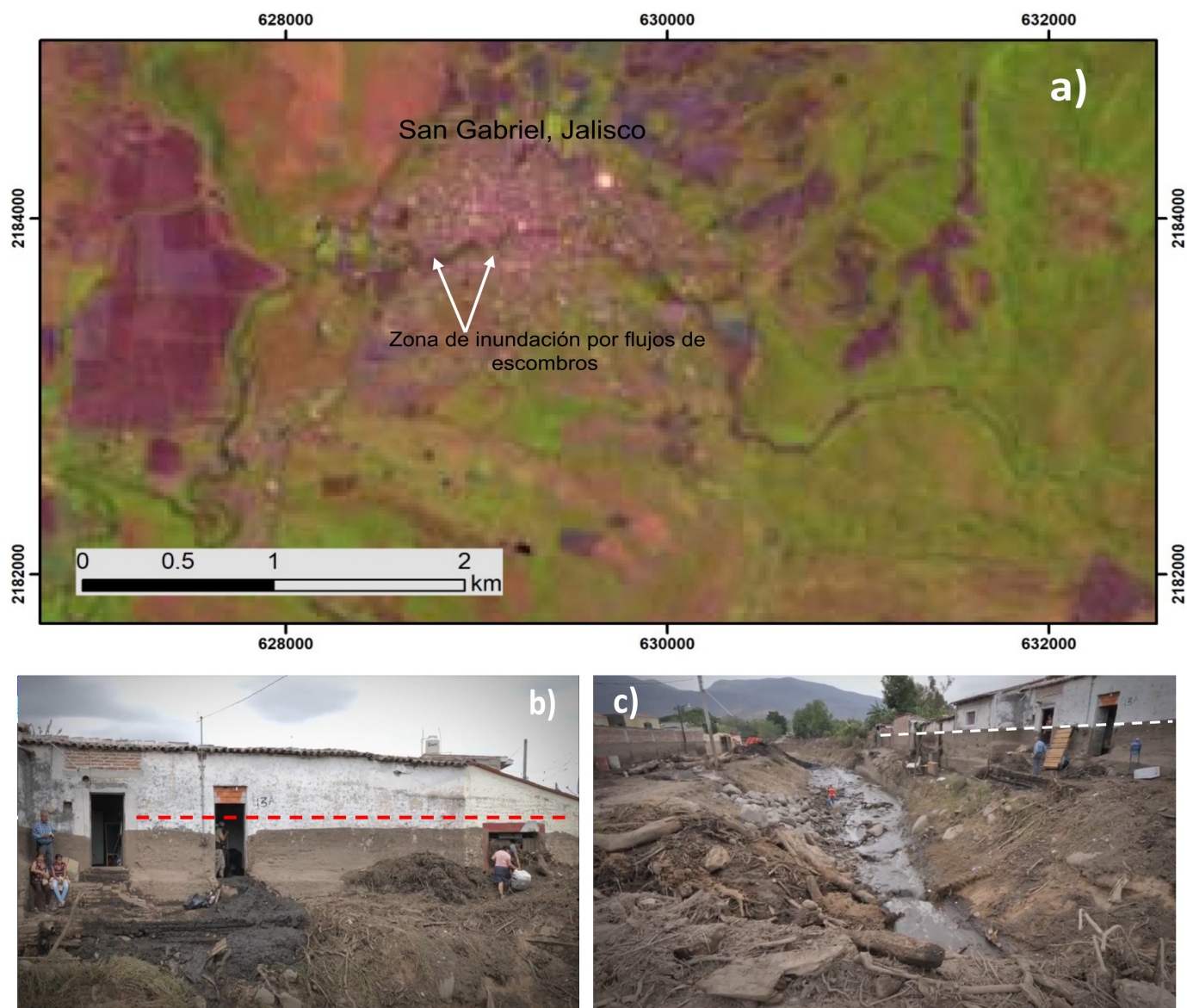


Figura 2. a) Imagen satelital Sentinel-2 obtenida después del evento en donde se puede apreciar la población de San Gabriel y la zona inundada por el flujo de escombros con fecha del 2 de julio de 2019; c y d) Imágenes que muestran los depósitos y marcas de la altura del flujo de escombros en el poblado, con profundidades de hasta 6 m desde la base del canal (imágenes reportadas por noticieros y periódicos INFORMAFOR.MX).

Cambios de uso de suelo y vegetación

Para poder establecer una relación entre la formación de procesos erosivos superficiales y la modificación en la cobertura, se realizó una evaluación espacio-temporal de cambio de uso de suelos en el período de 2014 a 2022 en la cuenca de San Gabriel. En particular, se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 8 con una resolución de 30 metros (Earth Explorer), correspondientes a los años 2014 (fecha más antigua), 2019 (año del evento) y 2022 (fecha actual). Las imágenes fueron segmentadas utilizando la herramienta Clasificación Máxima de Verosimilitud (CMS) de ArcGIS Pro. Para ello, se seleccionaron 30 puntos de muestreo (por cada imagen, según el año) a partir de imágenes de Google Earth para las cinco categorías siguientes: 1. zonas urbanas, 2. cultivos de aguacate, 3. cultivos diversos, 4. vegetación natural y 5. suelos desnudos. Los puntos de control fueron posteriormente utilizados para definir la firma espectral de

los diferentes tipos de uso del suelo. La herramienta CMS, mediante esta firma espectral, clasifica la imagen en las cinco categorías de uso de suelo aquí definidas.

Análisis textural de los suelos

Se efectuó una campaña de trabajo para la descripción y muestreo de los suelos según su uso (zona urbana, cultivo de aguacate, cultivos varios, vegetación natural y suelo desnudo); en total, se recolectaron 16 muestras (Figura 1). Se analizaron las muestras con el propósito de obtener propiedades químicas y físicas de los suelos y obtener los datos necesarios para el análisis de susceptibilidad a la erosión. Cabe destacar que el trabajo de campo se realizó un año después de los incendios, por lo que no fue posible recuperar muestras de los suelos afectados. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Edafología del Instituto de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En la Tabla 1 se describe la metodología utilizada.

Tabla 1. Metodología y ecuaciones empleadas para la obtención de parámetros químicos y físicos de los suelos.

Propiedad	Metodología / Ecuación
Materia Orgánica (MO)	$\% C \text{ orgánico} = \frac{B - T}{g} (N)(0.399) fch$ $\% MO = \% C + 0.794$ <p>B: volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco (ml), T: volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml), N: normalidad exacta del sulfato ferroso utilizado, g: gramos de muestra, fch: factor de corrección de humedad</p>
Textura	Las muestras se colocan en probetas, con un volumen de 1 litro. Con el hidrómetro de Bouyoucos se realizan lecturas a diferentes tiempos: 40 segundos, 1 minuto, 10 minutos, 1 hora, 2 horas y 24 horas; los valores obtenidos son utilizados para el cálculo de las fracciones de arena, limo y arcilla de acuerdo con la metodología sugerida por Departamento de Agricultura de Estados Unidos, (USDA, 2014).
Densidad real	Densidad (ρ) = ps / vs ps:- peso de las partículas del suelo; vs:- volumen de las partículas del suelo.

Análisis de la susceptibilidad a la erosión

Para conocer la susceptibilidad a la erosión presente en la zona de estudio, se utilizó la Ecuación (2) basada en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE) (Benavidez *et al.*, 2018), determinada por Wischmeier y Smith en 1978.

$$SE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

donde SE: susceptibilidad a la erosión superficial; R: índice de erosividad de la lluvia (i.e. cuanta energía erosiva acumulada ejercen las lluvias sobre el suelo en un año promedio); K: erodibilidad del suelo; LS: combinación de longitud y de la pendiente de una ladera; C: cobertura del suelo y P: factor de practica de conservación del suelo. A continuación, se describe como cada factor puede ser estimado.

- Factor R: En el presente trabajo, debido a la falta de datos con alta resolución, se utilizaron los datos de lluvia anuales (P) (Figuroa *et al.*, 1991) y la ecuación propuesta por Cortes (1991) para la región VII de México (Altos de Jalisco):

$$R = -0.33338 P + 0.006661 P^2 (MJ \text{ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}) \quad (3)$$

- Factor LS: Se calcula mediante la Ecuación (4) de Moore y Burch, 1986:

$$LS = [(flow \ accumulation \times cell \ size) / 22.13]^{0.4} \times [\sin(slope) / 0.089]^{1.3} \quad (4)$$

donde *flow accumulation* es el número de celdas que contribuyen al flujo en una celda dada; *cell size* es el tamaño de celda y *sin slope* es la pendiente en radianes.

- El Factor C, o Índice de cobertura del suelo, representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de la lluvia y a la fuerza del flujo superficial. Toma un valor máximo de 1 cuando el suelo presenta un mayor riesgo de

erosión, es decir, está menos protegido, y 0 cuando el suelo está completamente cubierto. Los incendios forestales se consideran un agente importante en la erosión del suelo y, por lo general, se caracterizan por valores muy altos (DeBano *et al.*, 2005; Shakesby, 2011). A cada tipo de uso del suelo y vegetación presente en la cuenca se le asignó un valor numérico, como se muestra en la Tabla 2, donde se da un valor de C para áreas incendiadas, propuesto por Ortiz-Rodríguez *et al.*, (2018).

- El Factor K ($t \text{ ha h } (MJ \text{ mm})^{-1}$) representa la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, y está influenciado por la textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (Borselli *et al.*, 2012). Para su estimación se utilizó el programa libre Kuery 1.5, desarrollado por Borselli (2012), (Tabla 3). El programa se basa en un algoritmo asociado a la combinación del tipo de clima en la zona de estudio y con parámetros texturales del suelo:
 - Distribución granulométrica (Dg) (Torri *et al.*, 1997; 2002): obtenido a través de la separación de las partículas del suelo, usando Hidrómetro de Bouyoucos.
 - Sg: equivalente a la desviación estándar de Dg;
 - Porcentaje de materia orgánica (SOM): se obtuvo mediante la determinación del porcentaje de carbono orgánico, producto de la descomposición de compuestos orgánicos.
 - Porcentaje del contenido de fragmentos de roca (Rk).
- Factor P: se refiere a las prácticas de conservación del suelo. Se asignó un valor de 1, correspondiente a la ausencia de prácticas mecánicas de conservación del suelo en el área de estudio, de acuerdo con lo establecido por Wischmeier y Smith (1978) y Figuroa *et al.*, (1991).

Finalmente utilizando un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.8), se elaboraron mapas tipo ráster para cada factor (LS, C y K). Los factores R y P son valores numéricos constantes para toda la cuenca. Como indica la Ecuación 2, los ráster LS, C, K y los valores de R y P fueron multiplicados utilizando la herramienta Calculadora Ráster, para obtener mapas de susceptibilidad a la erosión en la cuenca, antes y después de los incendios. Los valores absolutos fueron clasificados para la definición de las clases de baja a muy alta susceptibilidad (Srinivasan *et al.*, 2019; Pérez-Salinas *et al.*, 2019).

Análisis de la precipitación

Se realizó un inventario histórico de la precipitación a partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la estación ubicada en San Gabriel (Figura 1). Para el presente trabajo, se definieron períodos de retorno con la lluvia máxima acumulada en un solo día y en un lapso acumulado de 3 a 5 días, intervalo de tiempo que normalmente se considera para la evaluación de eventos extremos (Capra *et al.*, 2018; Cruz-Vázquez *et al.*, 2025).

Tabla 2. Valores utilizados en el Factor C para cada cobertura del suelo.

Cobertura del suelo	Factor C
Zona urbana	-
Cultivos de aguacate	0.30
Cultivos varios	0.10
Vegetación natural	0.001
Suelos desnudos	0.90
Áreas incendiadas	0.95

Tabla 3. Resultados obtenidos en laboratorio para cada muestra. Sub: número de subcuena en la que se ubica la muestra, M.O: materia orgánica, ρ : densidad de los agregados (g/cm^3), A: arenas, L: limos y R: arcillas; el uso de suelo al que pertenecen y valores del factor K ($\text{t ha h (MJ mm)}^{-1}$).

Muestra	Profundidad (cm)	Sub	Uso de suelo	Parámetros		Textura			K
				M.O (%)	ρ (g/cm^3)	A (%)	L (%)	R (%)	
SG2101_1	10	7	Vegetación natural	5.90	1.98	80	8	12	0.0198
SG2101_2	55	7	Vegetación natural	1.19	1.98	82	8	10	0.0244
SG2101_3	90	7	Vegetación natural	1.00	2.44	74	6	20	0.0230
SG2102	20	7	Cultivo de aguacate	7.93	1.72	80	10	10	0.0148
SG2103	50	7	Vegetación natural	2.82	2.16	86	10	4	0.0235
SG2104_1	20	7	Vegetación natural	8.15	2.05	88	8	4	0.0147
SG2104_2	100	7	Vegetación natural	3.76	1.86	86	12	2	0.0202
SG2104_3	160	7	Vegetación natural	4.90	2.09	88	10	2	0.0214
SG2105	0	7	Cultivo de aguacate	10.20	2.41	84	10	6	0.0149
SG2107_1	20	8	Vegetación natural	10.94	2.19	86	10	4	0.0147
SG2107_2	50	8	Vegetación natural	2.90	2.27	80	6	14	0.0226
SG2107_3	130	8	Vegetación natural	0.76	2.02	70	12	18	0.0225
SG2108_1	30	8	Vegetación natural	3.91	1.29	90	8	2	0.0198
SG2108_2	60	8	Vegetación natural	8.17	1.95	88	8	4	0.0147
SG2108_3	80	8	Vegetación natural	4.47	1.88	90	8	2	0.0205
SG2108_4	110	8	Vegetación natural	1.50	3.41	86	10	4	0.0236
SG2109_1	30	8	Vegetación natural	8.44	2.32	82	10	8	0.0149
SG2109_2	110	8	Vegetación natural	4.16	1.82	90	8	2	0.0199
SG2109_3	140	8	Vegetación natural	1.21	2.64	72	18	10	0.0265
SG2110	0	8	Cultivo de aguacate	6.70	1.52	86	10	4	0.0172
SG2111_1	25	5	Vegetación natural	1.60	2.65	82	10	8	0.0227
SG2111_2	75	5	Vegetación natural	0.00	2.56	84	10	6	0.0221
SG2112_1	40	5	Cultivo de aguacate	1.44	2.06	78	10	12	0.0257
SG2112_2	70	5	Cultivo de aguacate	0.35	1.80	90	6	4	0.0226
SG2115_1	40	1	Suelo desnudo	1.28	2.35	86	8	6	0.0223
SG2115_2	125	1	Suelo desnudo	0.32	3.12	78	10	12	0.0200
SG2116	0	10	Cultivos varios	1.39	3.24	78	8	14	0.0232

Para el análisis de la variabilidad de los datos de lluvia y su período de recurrencia, se utilizó la distribución de Gumbel (Gámez-Balmaceda *et al.*, 2020). Se utilizaron datos diarios de la estación de San Gabriel durante el periodo de 1946 a 1991. No se cuenta con datos más recientes de la misma estación, ni con los datos de lluvias del evento aquí estudiado. Los datos fueron organizados en un ranking según el máximo de lluvia acumulada para calcular la probabilidad de excedencia de cada evento en el período considerado, a partir de la cual se obtienen los parámetros estadísticos (mínimo, máximo, promedio y desviación estándar). Con los datos obtenidos y los valores de referencia (Kite, 1977), se definen las curvas de distribución para obtener valores de lluvia acumulada en intervalos de recurrencia. Para el presente trabajo, se tomaron en cuenta periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años.

Debido a la falta de datos más recientes para el área de estudio, se extrajeron datos anuales de la base de datos MExHiResClimDB (Carrera-Hernández, 2025). Esto para poder identificar cambios en el comportamiento de las lluvias a partir de 1992 y, además, para poder calcular el factor R sobre un rango mayor de años. Los datos se extrajeron en un punto representativo de la Cuenca de San Gabriel, ubicado en la parte alta (Figura 1), a partir de los mapas generados con las interpolaciones de las lluvias acumuladas para el periodo 1966-2020 (Carrera-Hernández, 2025).

Simulaciones en FLO2d

El código FLO 2D (O'Brien *et al.*, 1993) se ha utilizado con éxito en terrenos volcánicos para evaluar: 1) la descarga a nivel de cuenca

y 2) los límites de inundación por lahares (Caballero y Capra, 2014; Capra *et al.*, 2018; Cruz-Vázquez *et al.*, 2025). En el presente trabajo, el código FLO 2D fue utilizado para definir las curvas de descarga y volumen total de agua por cada subcuena, según el escenario de lluvia y el tipo de uso de suelo. Las curvas se obtuvieron trazando perfiles transversales en la zona de salida de cada subcuena. Posteriormente, las curvas de descarga aquí obtenidas se utilizaron para construir las curvas hidrográficas de flujos de agua y sedimentos, a fin de definir las zonas de posible inundación a lo largo del río Salsipuedes.

Para realizar las simulaciones de lluvia-escorrentamiento, se consideró el modelo de infiltración del Número Curva (NC), un parámetro hidrológico semiempírico que, a partir del tipo de suelo y de su uso, permite determinar el potencial de infiltración. El valor varía de 0 a 100, donde a mayor valor, menor es la capacidad de infiltración (Hawkins, 1978; Díaz-Carvajal, *et al.*, 2017). El número de curva se puede expresar con la siguiente Ecuación (5):

$$NC = \frac{25.400}{S + 254} \quad (5)$$

donde S es el potencial máximo de retención de agua.

A partir de los valores reportados en la literatura (Hawkins, 1978; Espinales *et al.*, 2021; Alberca *et al.*, 2022), se definió el valor de NC para cada tipo de cobertura (Tabla 4), en condiciones de humedad previa y considerando suelos de categoría franco-arenosa (grupo hidrológico C, Mishra y Singh, 2003). Considerando el elevado número de polígonos arrojado por el análisis de uso de suelo (6530 polígonos),

Tabla 4. Valor del número de curva para cada categoría de uso de suelo.

Tipo de uso de suelo	Número de Curva (NC)
Vegetación natural	70
Cultivo de aguacate	80
Cultivos varios	82
Suelo desnudo	85
Zona urbana	100
Áreas incendiadas	90

se utilizó un valor promedio para cada cuenca, considerando su variabilidad interna.

Para las simulaciones de flujos de escombros (agua + sedimento) los datos de entrada requeridos para la simulación consisten en la curva de descarga del flujo (inflow), la concentración de sedimentos (C_v) y los parámetros reológicos de la fase fluida (viscosidad η y resistencia al corte τ_y). Los parámetros reológicos son aquí definidos con base en las siguientes ecuaciones (O'Brien y Julien, 1988):

$$\eta = \alpha_1 e^{(\beta_1 C_v)} \tag{6}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{(\beta_2 C_v)} \tag{7}$$

donde α y β son coeficientes empíricos definidos experimentalmente por O'Brien y Julien (1988). Además de los parámetros reológicos, es necesario definir los siguientes parámetros:

1. Coeficiente de Manning: define la movilidad de un flujo según el tipo de sustrato.
2. Número de Froude: representa la relación entre la fuerza de inercia y gravedad. Define el régimen del flujo, donde si es menor a 1 indica un flujo subcrítico y mayor a 1 indica que el flujo es crítico.
3. Resistencia al flujo laminar: Depende de las características y la rugosidad de los canales (O'Brien, 2009).

Los valores utilizados aquí se basaron en trabajos previamente publicados que simularon con éxito flujos de escombros en relieves volcánicos con características similares y utilizando el mismo código FLO-2D (Caballero-García *et al.*, 2017; Capra *et al.*, 2014; Zaragoza *et al.*, 2020) (Tabla 5). En particular para el coeficiente de Manning se utilizó un valor promedio de 0.065 que corresponde a un canal en relieves montañosos con un sustrato de grava y bloques (Arcement *et al.*, 1989). Los flujos simulados se consideran un régimen subcrítico ($F < 1$). Con respecto a los coeficientes reológicos, al no contar con datos directos del flujo originado en el 2019, se optó por usar valores previamente utilizados para flujos de escombros en terrenos volcánicos para que los mapas de susceptibilidad a inundación puedan tomar en

Tabla 5. Parámetros reológicos utilizados para las simulaciones de flujos de escombros, O'Brien y Julien, 1998.

	Parámetros reológicos			
	Glenwood 1	Glenwood 2	Glenwood 3	Glenwood 4
Coeficiente de Manning	0.065	0.065	0.065	0.065
Número de Froude	0.9	0.9	0.9	0.9
Viscosidad (η)	$0.00283e^{23C_v}$	$0.0648e^{6.2C_v}$	$0.00632e^{19.9C_v}$	$0.000602e^{33.1C_v}$
Resistencia al corte (τ_y)	$0.0345e^{20.1C_v}$	$0.0765e^{16.9C_v}$	$0.000707e^{29.8C_v}$	$0.00172e^{29.5C_v}$

cuenta la variabilidad en viscosidad y limite plástico que estos flujos pueden presentar (Caballero y Capra, 2014).

RESULTADOS

Geometría de las subcuencas

La zona de estudio presenta elevaciones máximas de 2651 m s.n.m. en la porción sur, hasta valores inferiores a 1500 m s.n.m. en la sección oeste. Respecto a la curvatura de laderas, se presentan porciones cóncavas y convexas de manera intermitente a lo largo de la cuenca, este tipo de geometría interviene en la formación de deslizamientos, ya que pueden representar una zona de acumulación de agua y sedimentos o a ser erosionados más fácilmente. Se clasificaron un total de 12 subcuencas, de las cuales las de mayor área se encuentran en la porción N-NE, mientras que las de menor tamaño se ubican al sur de la cuenca de San Gabriel. En particular, la subcuenca denominada con el número 5 presenta la mayor área con un valor de 26.79 km², seguida de la subcuenca 2 y 9, con 25.77 km² y 24.94 km², respectivamente (Tabla 6).

Los resultados del Índice de Gravelius se presentan en la Tabla 6. Las subcuencas más circulares son las 4 y 9, con valores de 1.57 y 1.49, respectivamente. Sin embargo, la mayoría de las subcuencas en la zona de estudio son elongadas, con valores superiores a 2, como las subcuencas 0, 2, 3, 8 y 10. Estas diferencias en la geometría de las subcuencas se pueden correlacionar con una respuesta en la descarga de agua. En subcuencas circulares todos los puntos son equidistantes al canal principal, por lo que toda la precipitación llegará al canal al mismo tiempo, con la concentración de un gran volumen de agua. En cambio, en una cuenca más alargada, los drenajes laterales drenan rápidamente en distintos puntos y momentos, lo que da como resultado una descarga total más baja (Capra *et al.* 2018).

Estimación de la zona afectada por incendios

El área afectada por los incendios se delimitó a partir de imágenes satelitales de Sentinel 2, adquiridas en mayo y junio de 2019. El incendio inició los primeros días de mayo de 2019; para el 13 de mayo, la zona afectada ya abarcaba un área de 49 km² (Figura 3a), afectando principalmente la subcuenca 8, 10 y 11, y la porción sur de las subcuencas 3 y 9. Finalmente, para la fecha del 6 de junio del mismo año, el área perjudicada fue de 63.30 km², es decir, el 35.5% de la superficie total de la cuenca San Gabriel, siendo la subcuenca 8 la más perjudicada, con hasta el 90% de afectación en su superficie (Figura 3b).

Tabla 6. Geometría de las doce subcuencas e Índice de Gravelius (K_G).

Subcuencas	Área (km ²)	Perímetro (km)	K_G
0	3.12	18.35	2.93
1	9.35	27.12	2.50
2	25.77	48.27	2.68
3	10.41	34.02	2.97
4	5.31	12.85	1.57
5	26.79	39.75	2.17
6	1.78	9.85	2.08
7	22.17	31.67	1.90
8	14.50	35.47	2.63
9	24.94	30.50	1.72
10	19.01	36.52	2.36
11	14.11	24.80	1.86

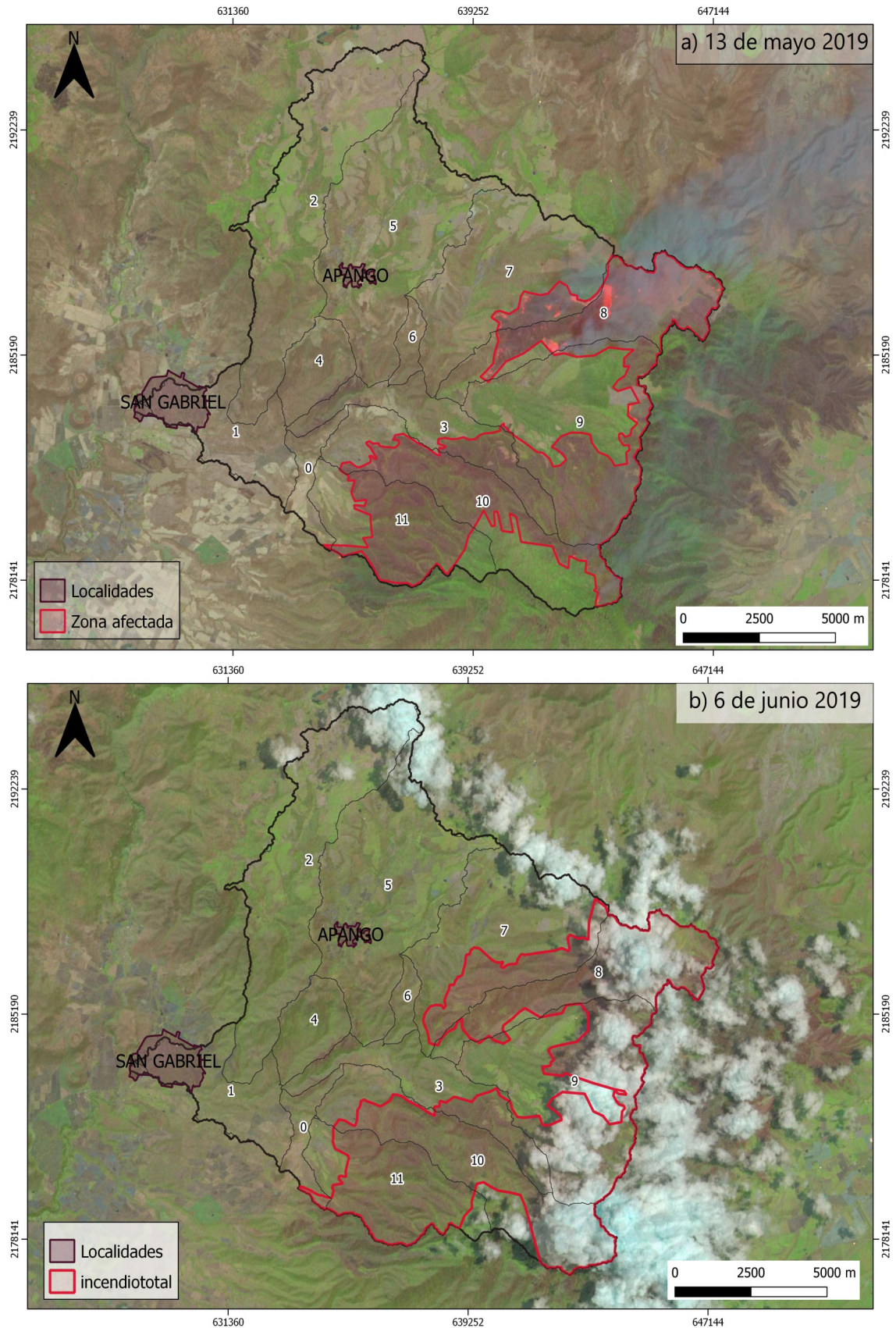


Figura 3. Áreas de la cuenca del río Salsipuedes afectadas por los incendios, delimitadas en color rojo, a partir de imágenes satelitales Sentinel-2, con fechas de (a) 13 de mayo 2019 y (b) 6 de junio de 2019.

Cambios de uso de suelo y vegetación

Con base en el análisis espacio-temporal del cambio de uso del suelo, se observa una tendencia general a la disminución de las áreas con vegetación natural a favor de áreas dedicadas a cultivos, principalmente de aguacate (Figura 4). En particular, las subcuencas 0, 1 y 4 presentan una mayor degradación debido a un cambio drástico en el uso del suelo, de vegetación natural a cultivos. Asimismo, las subcuencas 2 y 5 han sido ampliamente utilizadas para zonas de cultivo en los últimos ocho años, y las subcuencas 6, 7 y 8 han experimentado un cambio gradual, en el que actualmente más del 50 % de la superficie está dedicada al cultivo (Figuras S1 y S2 en el material suplementario y Tabla 7).

Características de los suelos

El área de estudio consiste en depósitos volcanoclásticos, principalmente en flujos de ceniza de varios metros de espesor, no consolidados, asociados a la actividad del volcán Cántaro, cuya actividad finalizó hace aproximadamente 1.0 Ma. (Macías, 2005). Los suelos aquí analizados se formaron en dichas secuencias. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio para cada suelo y en distintas profundidades. Cabe destacar que el trabajo de campo se realizó en 2021, por lo que ya no se tuvo la oportunidad de coleccionar muestras de suelos quemados. Su análisis hubiera mostrado una disminución en el material orgánico, pérdida de estructura y un incremento en su densidad.

Con base en el análisis granulométrico, las muestras analizadas presentan un contenido de arena mayor al 70%, con una fracción de limo entre 6 y 12%, mientras que la fracción arcillosa varía entre 2 y 20%, (Figura 5). El mayor contenido de arcilla se observa en los suelos cubiertos por vegetación natural; sin embargo, se observa una gran variabilidad según el tipo de cobertura y la profundidad de muestreo. De acuerdo con el triángulo textural de la USDA (1977), los suelos analizados pueden clasificarse como arenosos y francoarenosos.

Los resultados de contenido de la materia orgánica (M.O.) muestran una gran variabilidad con los valores más altos en las muestras superficiales correspondientes a suelos naturales o a cultivos de aguacate de hasta 10.94%. Finalmente, en cuanto a la densidad real de agregados, los valores varían de un mínimo de 1.3-1.5 g/cm³ en suelos colectados en zonas de vegetación natural o cultivo varios, hasta un máximo de 3.1 g/cm³ en suelos desnudos.

Análisis de la susceptibilidad a la erosión

El análisis de la susceptibilidad a la erosión se realizó para el año 2019, en condiciones pre y post incendio. El valor promedio obtenido para el parámetro R fue de 4750 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, y los valores de C y K (pre incendio) se incluyen en las Tablas 2 y 3, respectivamente. En el mapa pre incendio (Figura 6a), se observa cómo la zona norte de la cuenca muestra valores más altos respecto a la zona sur. La porción norte se caracteriza por las pendientes más elevadas y, además, corresponde a las subcuencas dedicadas principalmente a la agricultura. Por el contrario, la porción sur, caracterizada principalmente por vegetación natural, muestra los valores más bajos. Hacia las porciones más occidentales de la cuenca, los valores más elevados corresponden a suelo desnudo. Al analizar el mapa post incendio (Figura 6b), se observa un incremento muy importante en las zonas afectadas, principalmente asociado al incremento del coeficiente C de vegetación natural a áreas quemadas (Tabla 2). Cabe destacar que la subcuenca 8 fue una de las más afectadas por los incendios y corresponde a la subcuenca en la que se inicia el sistema fluvial del río Salsipuedes. Como se mencionó anteriormente, no se tuvo la oportunidad de caracterizar los suelos en la zona después del incendio; el valor K se mantuvo igual en ambas estimaciones, por lo que se tiene una ligera subestimación de la susceptibilidad a la erosión para el caso post incendio.

Análisis de la precipitación

La estación de San Gabriel tiene un historial de precipitaciones para los años comprendidos entre 1946 y 1991. Según el análisis, el año con mayor precipitación registrada fue 1958, con un valor de 1160 mm, seguido por 1967 y 1963, con lluvias superiores a 1000 mm. Para el período analizado, el promedio anual de lluvia es de 691.07 mm. Del análisis de los datos obtenidos de Carrera-Hernández (2025), no se observa un cambio evidente a partir del año 1992, con una tendencia al incremento de 1 mm por año (Figura 7). Esta comparación nos permite considerar válido el análisis aquí realizado para la obtención de los periodos de retorno. La Figura 8 representa el máximo diario de todos los años analizados (1946-1991), con un máximo de 96 mm en 1967 y un promedio de 52.6 mm. Para la lluvia acumulada en 3-5 días, los máximos se registran en 1973 y 1985, con valores de hasta 140 mm (Figura 8). Destacan los años 1950 y 1979, con valores más bajos. Los valores obtenidos para los periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años se muestran en la Tabla 8.

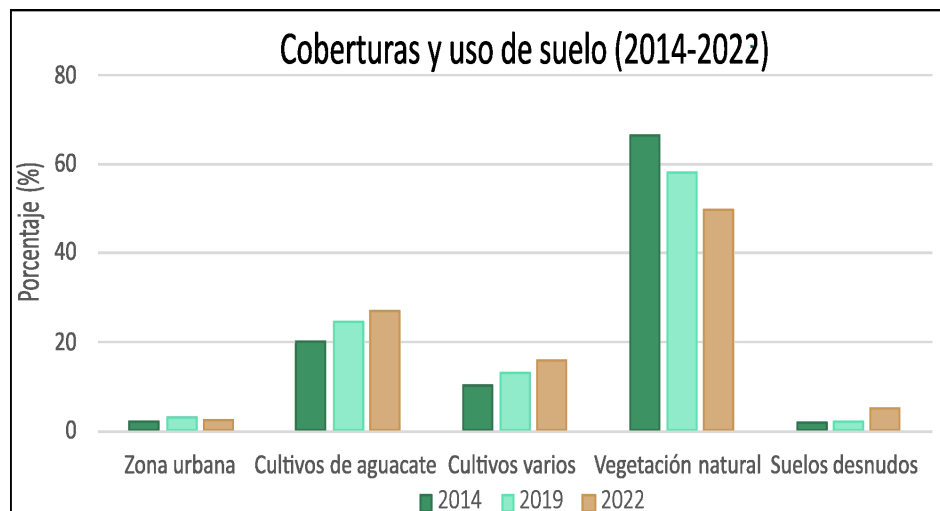


Figura 4. Histograma que muestra los cambios de uso de suelo y vegetación en porcentaje, en la cuenca del río Salsipuedes para los años 2014, 2019 y 2022.

Con base en el resultado de este análisis, se consideraron únicamente dos escenarios para la realización de las simulaciones: la acumulación de lluvia en 3-5 días y con periodos de retorno de 5 años (100 mm) y de 20 años (150 mm). Estos valores corresponden a los eventos más extremos identificados en el análisis. Se consideró un tercer escenario, con un máximo de lluvia acumulada en un día, equivalente a un periodo de retorno de 20 años (90 mm).

Simulaciones en FLO-2d

Simulación de lluvia/escurrimiento

Las simulaciones de lluvia-escurrimiento se realizaron para dos escenarios: 1) 2019, pre y post incendio, con el propósito de detectar la influencia de suelos quemados en los cambios en las descargas de las

subcuencas afectadas; y 2) 2014 *versus* 2022, para analizar variaciones en las descargas en relación con el cambio de uso de suelo. En la Tabla 9 se muestran los valores de NC utilizados según el escenario. De los periodos de retorno calculados, se presentan los resultados obtenidos para los periodos de 5 y 20 años, correspondientes a los escenarios extremos de 3-5 días de lluvia acumulada. Los valores de lluvia acumulada en un periodo de 24 horas resultaron insuficientes para provocar un escurrimiento superficial detectable, por lo que no se consideraron en las simulaciones.

2019, pre y post incendio

Los resultados de las simulaciones para ambos periodos de retorno muestran un cambio evidente en el pico máximo de descarga. En particular, para el periodo de retorno de 20 años, en las subcuencas

Tabla 7. Cambios en el uso de suelo y vegetación expresado en porcentaje, para los años 2014, 2019 y 2022, y % afectado por incendios por subcuenca ocurridos en 2019.

Subcuenca	Cambios en las coberturas del suelo (%)						
	Años	Zona urbana	Cultivos aguacate	Cultivos varios	Vegetación natural	Suelos desnudos	Incendio
0	2014	2.5	42.1	12.7	42.2	0.2	-
	2019	3.1	45.1	9.3	41.1	1.2	-
	2022	3.3	23.8	45.2	12.6	15.9	-
1	2014	23.5	26.2	10.6	35.3	4.2	-
	2019	30.3	30.8	4.2	34.1	0.4	-
	2022	28.5	3.1	29.7	1.4	37.1	-
2	2014	0.7	34.8	19.4	40.6	4.3	-
	2019	1.7	32.1	21.8	41.6	2.6	-
	2022	1.8	42.2	20.8	30.5	4.5	-
3	2014	0.2	8.63	4.2	86.3	0.4	-
	2019	0.9	18.7	4.5	75.5	0.1	37.6
	2022	0.0	18.3	13.3	66.1	2.0	-
4	2014	0.6	46.9	2.0	49.9	0.3	-
	2019	0.9	36.6	4.1	57.4	0.9	-
	2022	0.2	11.7	52.7	23.0	12.1	-
5	2014	1.1	31.8	15.3	49.1	2.5	-
	2019	2.0	35.7	13.7	44.5	3.8	-
	2022	2.7	40.3	14.6	40.5	2.7	-
6	2014	0.1	32.1	7.1	59.9	0.6	-
	2019	0.5	19.6	13.0	64.5	2.2	-
	2022	0.3	18.9	29.2	49.7	1.6	-
7	2014	0.5	16.2	10.6	70.6	1.8	-
	2019	0.8	22.3	18.2	55.6	3.0	28.2
	2022	0.3	33.4	18.5	43.8	3.9	-
8	2014	0.5	13.7	16.9	68.2	0.5	-
	2019	0.5	27.5	26.4	42.6	2.8	90.8
	2022	1.5	35.5	16.2	45.3	1.4	-
9	2014	0.4	7.3	4.0	87.8	0.4	-
	2019	0.7	8.7	11.8	77.7	0.9	62.4
	2022	0.1	16.2	5.9	76.8	0.8	-
10	2014	0.4	6.7	1.3	91.2	0.1	-
	2019	0.4	16.1	6.2	76.1	1.0	70.4
	2022	0.1	18.9	6.4	71.1	3.2	-
11	2014	0.2	8.2	1.4	89.9	0.1	-
	2019	0.7	16.1	2.5	80.2	0.4	78.1
	2022	0.2	13.8	4.9	80.6	0.4	-

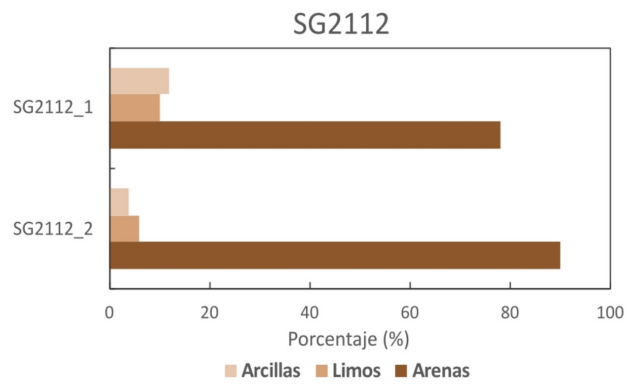
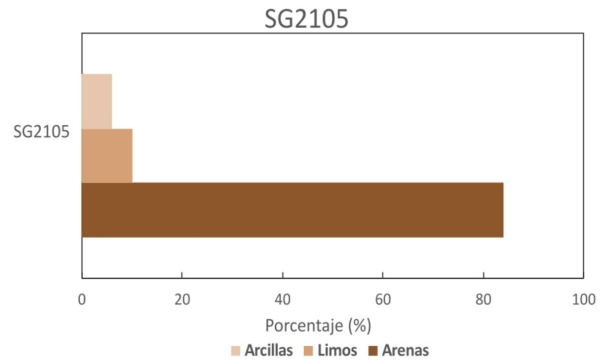
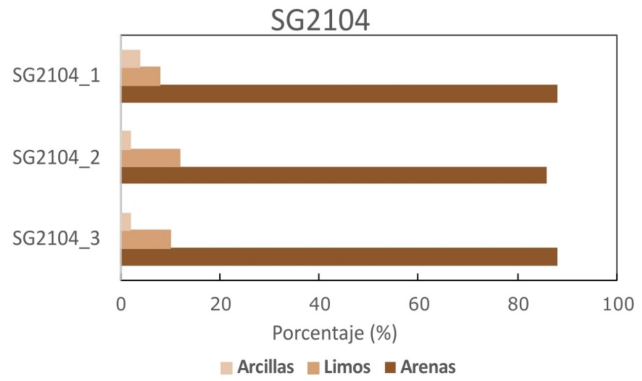
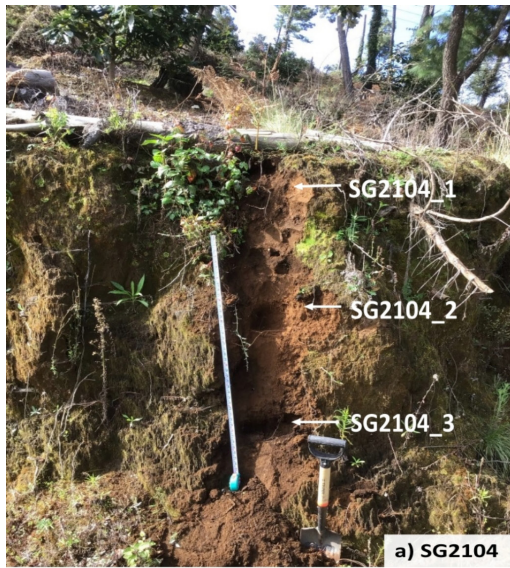


Figura 5. Imágenes de los suelos estudiados y sus características texturales. Muestras denominadas como a) SG2104, b) SG2105 (cultivos afectados por los incendios), y c) SG2112.

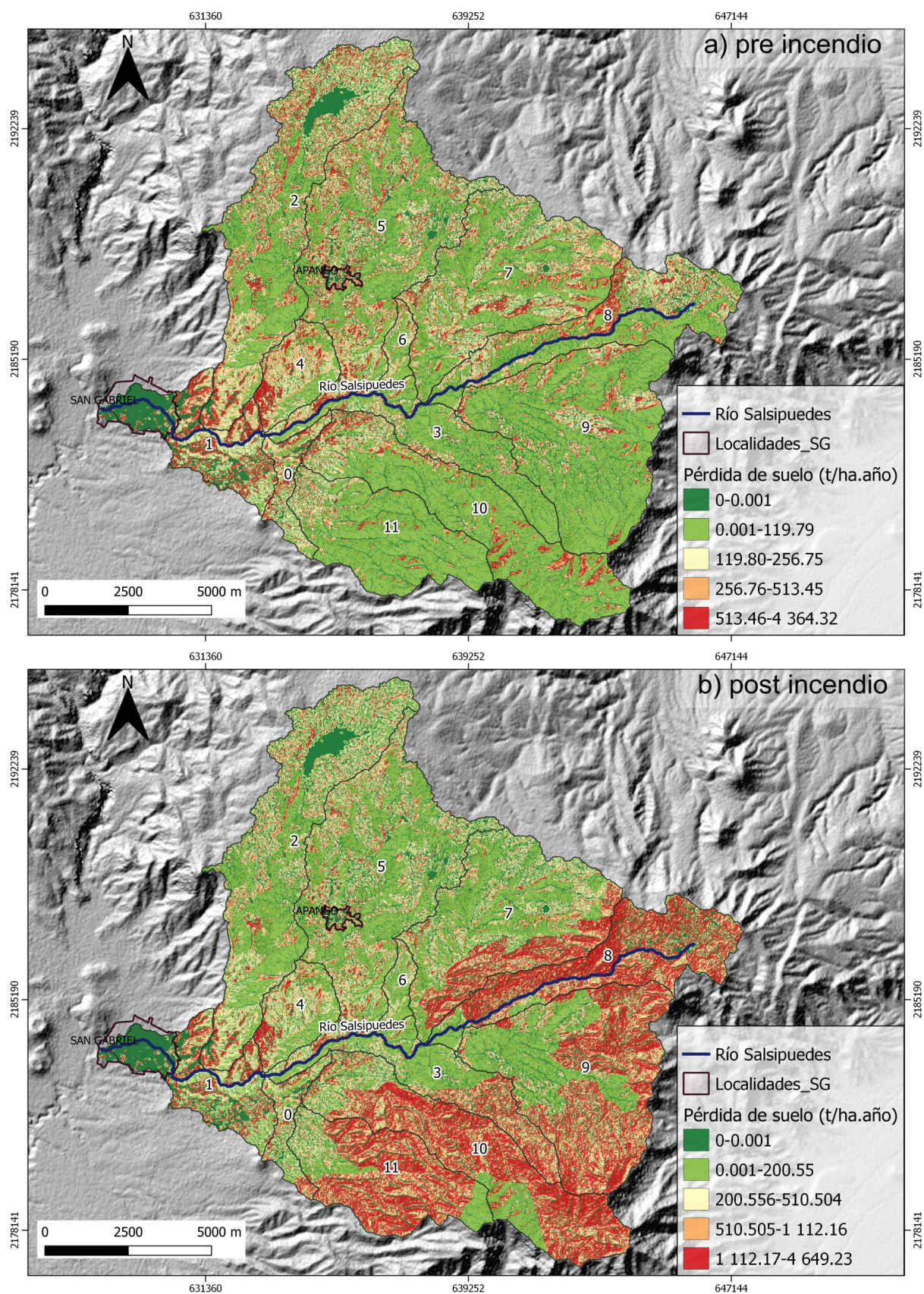


Figura 6. Mapa que muestra la pérdida de suelo debido a la erosión en las subcuencas de San Gabriel con base en el análisis de uso de suelo del 2019. a) Escenario pre-incendio y b) escenario post- incendio.

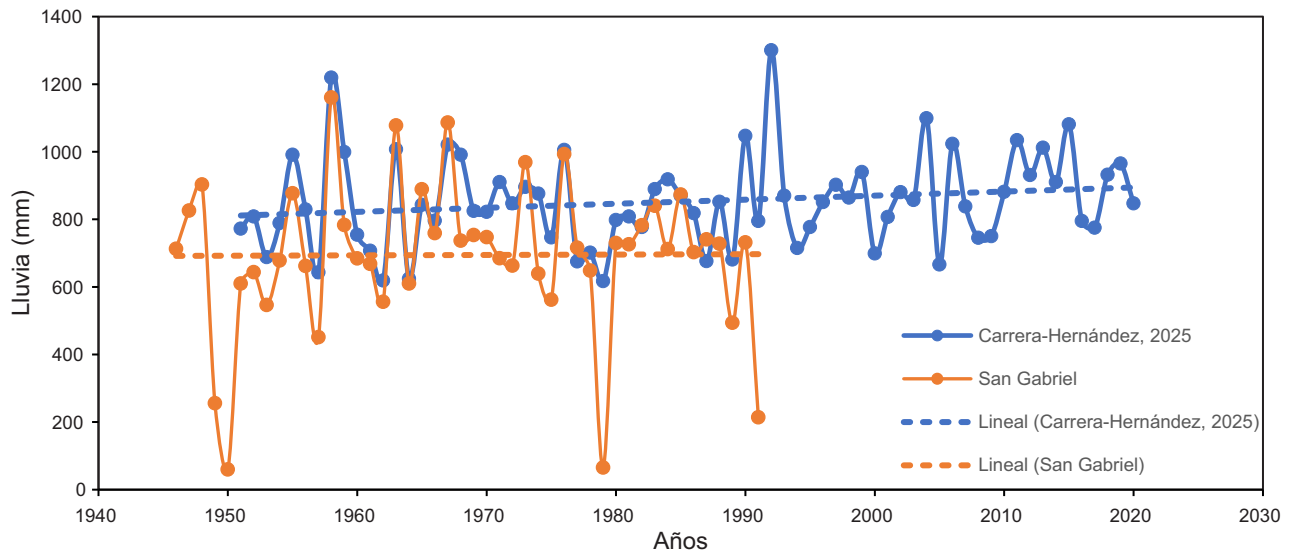


Figura 7. Gráfica de los niveles de lluvia obtenidos de la estación de San Gabriel (color naranja), en comparación con aquellos datos obtenidos de Carrera-Hernández, 2025.

0, 1 y 3, las descargas máximas aumentan de 10–20 m³/s a un máximo de 120 m³/s, con un volumen máximo de agua de 2633000 m³ en la subcuenca 1, que recibe las contribuciones de todas las demás (Tabla 10, Figura 9 y material suplementario). En las subcuencas mayormente afectadas por los incendios, como son las 8, 9, 10 y 11, se observa un comportamiento similar, con un incremento en la descarga, hasta valores de 43 m³/s, para la subcuenca 8. Es notable, además, que en el escenario post-incendio, los tiempos de llegada de la descarga máxima se reducen (Tabla 10 y material suplementario).

Cambio de uso de suelos 2014-2022

Para el escenario de cambio de uso de suelo en el período de 2014-2022, se detectaron incrementos en las descargas de las cuencas afectadas por cambios más drásticos hacia actividades de cultivo; sin embargo, en una escala menor respecto a los efectos pre y post incendio. Para el escenario de lluvia de 20 años de período de retorno, se observa un aumento importante en la descarga y en volumen de agua desde el año 2014 hasta el 2022, principalmente en las subcuencas 0, 1,

10 y 11. Las subcuencas 0 y 1, que en el período analizado registraron el mayor cambio en el uso de suelo, presentan un incremento del 90 % en su descarga (Tabla 11 y material suplementario).

Simulación de flujos de escombros

Los resultados de las simulaciones de lluvia-escurreminto obtenidos considerando las condiciones posteriores al incendio fueron utilizados para la construcción de las curvas de descarga para la definición de las zonas de inundación en caso de que un evento similar al 2019 vuelva a ocurrir. Debido a que no se cuenta con la cantidad de lluvia acumulada del 2 de junio de 2019, se consideraron los valores correspondientes a períodos de retorno de 5 y 20 años, extremos observados para el área de estudio. La comparación de los resultados de las simulaciones con los límites de las zonas inundadas en 2019 permitirá estimar la cantidad de lluvia acumulada el día del evento.

Las curvas hidrográficas se construyeron para la subcuenca 1, ya que en ella drenan todas las demás subcuencas. Se utilizó un hidrograma unitario triangular y el volumen total de agua acumulada

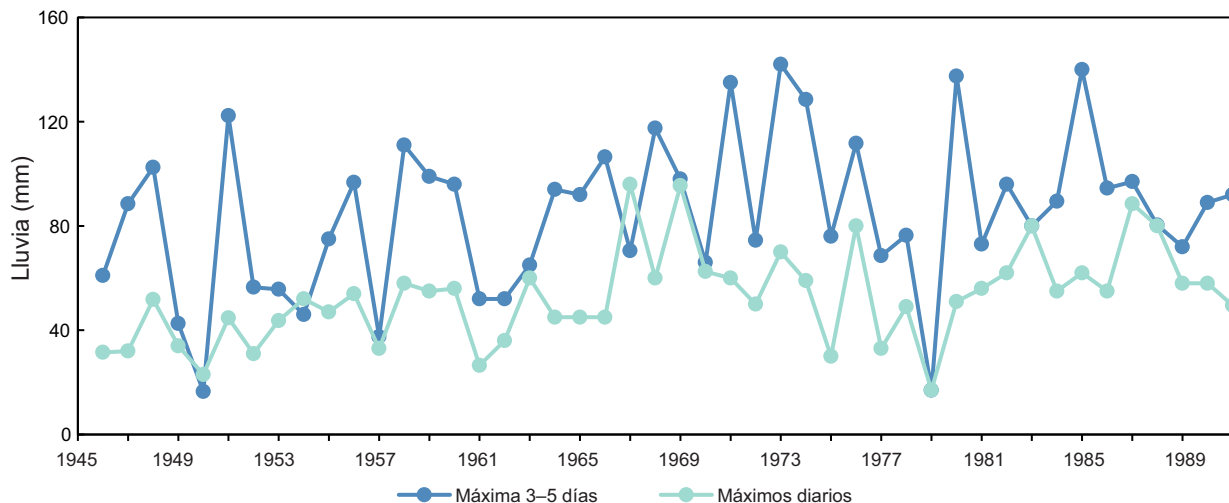


Figura 8. Gráfica de la precipitación máxima diaria y acumulada de 3-5 días, por año.

Tabla 8. Nivel de lluvia esperado para diferentes periodos de retorno (5, 10, 15 y 20 años).

Periodo de retorno (años)	Lluvia 24 horas (mm)	Lluvia 3-5 días acumulados (mm)
5	67.53	108.59
10	79.25	127.92
15	85.86	138.83
20	90.49	146.47

(i.e., Caballero y Capra, 2016; Cruz-Vázquez *et al.*, 2025) (Tablas 10 y 11). Para los parámetros reológicos, se seleccionaron los valores correspondientes a Glenwood 1, 2, 3 y 4 (Tabla 5) (O'Brien y Julien, 1988), esto para tomar en cuenta la posible variabilidad en la reología del flujo (Caballero y Capra, 2014). El contenido de sedimentos se consideró en un rango de 0.15 a 0.35, valores que se aproximan a las características de los depósitos observados después del evento de 2019.

En ambos escenarios (5 y 20 años de período de retorno), las principales diferencias observadas se deben a cambios en la profundidad del flujo según la reología empleada. Los mapas finales de cada escenario se obtuvieron combinando todas las simulaciones y considerando la mayor profundidad alcanzada por el flujo en cada píxel (Caballero y Capra, 2014). Finalmente, se elaboraron mapas por nivel de amenaza para ambos escenarios, considerando como umbral entre alto y bajo peligro una profundidad del flujo de 2 metros, valor que corresponde a la profundidad promedio de los canales observados en campo y ubicados en la zona urbana del municipio de San Gabriel y que delimitaría la capacidad del flujo para desbordar y afectar dicha zona (Cruz-Vázquez *et al.*, 2025).

Los resultados obtenidos para el escenario con período de retorno de 5 años (100 mm) presentan una disminución progresiva de la profundidad del flujo hacia la cabecera de San Gabriel, y la zona de alto peligro corresponde únicamente a las porciones más estrechas de la barranca, donde el flujo alcanza mayor profundidad (Figura 10a y 10b).

Con respecto al escenario de retorno de 20 años (150 mm), se observa un claro incremento en las profundidades máximas del flujo, con valores entre 3 y 5 metros en el municipio de San Gabriel, valores que se ubican en el rango de los espesores observados en

Tabla 9. Número de Curva (NC) por cada subcuenca según el tipo de uso de suelo y para cada uno de los tres años considerados.

Subcuenca	NC por cada tipo de uso de suelo			
	2014	2019		2022
		Pre-incendio	Post incendio	
0	76.68	76.87	76.87	82.17
1	81.74	82.8	82.80	88.69
2	76.93	76.99	77.00	78.2
3	71.58	72.78	86.56	73.93
4	75.21	74.62	74.62	73.93
5	75.92	76.6	76.60	77.07
6	74.29	74.17	74.17	76.06
7	73.48	75.33	75.33	76.46
8	73.82	76.8	87.36	76.34
9	71.45	72.79	86.56	72.57
10	71.02	72.72	86.54	73.31
11	71.11	72.23	86.45	72.13

campo (Figura 2c y 2d) y un incremento en el área de inundación, especialmente hacia el centro de la comunidad. En este escenario, la zona urbana cercana al drenaje del río Salsipuedes presenta un alto nivel de peligro (Figuras 11a y 11b).

DISCUSIÓN

El presente estudio ha permitido determinar los factores que controlan los procesos erosivos y la potencial formación de flujos de escombros durante eventos de lluvia, dependiendo de las características hidrogeológicas de la cuenca del río Salsipuedes, en relación con los cambios que estas sufrieron debido a causas antrópicas (cambios de uso de suelo) o climáticas (incendios en períodos de sequía).

El análisis espacio-temporal de cada subcuenca que drena al río Salsipuedes, realizado entre los años 2014 y 2022, permitió determinar un cambio importante en el uso de suelo, de vegetación natural a cultivo o suelo desnudo, con valores de más del 50% en algunas subcuencas. Estos cambios se traducen en variaciones en las propiedades texturales de los suelos y en su tipo de cobertura, factores que afectan la permeabilidad (Tabla 4) y la erodibilidad (Factor C, Tabla 2) (Figura 7a). A raíz de estos cambios, el cálculo de la descarga de cada subcuenca muestra incrementos evidentes en el volumen de agua aportado al drenaje principal, hasta alcanzar valores tres veces mayores (Tabla 10 y Figura 9), más marcados en las subcuencas de mayor superficie y geometría elongada (alto índice de Gravelius).

Un comportamiento similar, pero a mayor escala, se observa tras la ocurrencia de incendios, con un incremento notable en la erosión (Figura 6b) y en la descarga (Tabla 10), combinación de factores que promovieron la formación de flujos de escombros el 2 de junio de 2019. En particular, la descarga máxima en la subcuenca 1, que aporta al río Salsipuedes el agua recolectada de todas las subcuencas, alcanza valores de hasta 119 m³/s, mucho más altos si se considera el valor de 23 m³/s por el cambio de uso de suelo de 2014 a 2022. La presencia de un gran volumen de troncos en la superficie de los flujos de escombros sugiere que el mayor aporte de agua y material provino de las cuencas afectadas por los incendios.

Aun cuando el registro de lluvia aquí utilizado abarca el periodo de 1946 a 1991, su comparación con datos extrapolados de una base de datos nacional (Carrera-Hernández, 2025) muestra que en los últimos 35 años no se ha observado un cambio importante en los valores anuales acumulados para la cuenca del río Salsipuedes. Es importante notar que el valor acumulado por día/año no toma en cuenta la intensidad de la lluvia, factor que puede jugar un papel importante en el proceso de disparo de flujos de escombros; sin embargo, en

Tabla 10. Tiempo de llegada del pico máximo de descarga y volumen de agua obtenidos para las subcuencas afectadas por los incendios, considerando un periodo de retorno de 20 años (150 mm).

Sub-cuencas	Pre-incendio			Post incendio		
	Tiempo (h)	Descarga máx. (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tiempo (h)	Descarga máx. (m ³ /s)	Volumen (m ³)
0	15	8.72	109305.4	7.6	56.1	1224301.9
1	13.5	13.53	343746.8	12.1	119.4	2633570.4
3	19	1.62	11909.8	12.4	60.3	1229177.9
8	17.4	0.6	5138.4	12.2	43.04	928199.3
9	11	0.1	470.1	12	30.9	695053.9
10	14.7	6.1	77057.6	7.4	35.2	719352.4
11	14	3.2	39768.1	7.2	22.52	512768.5

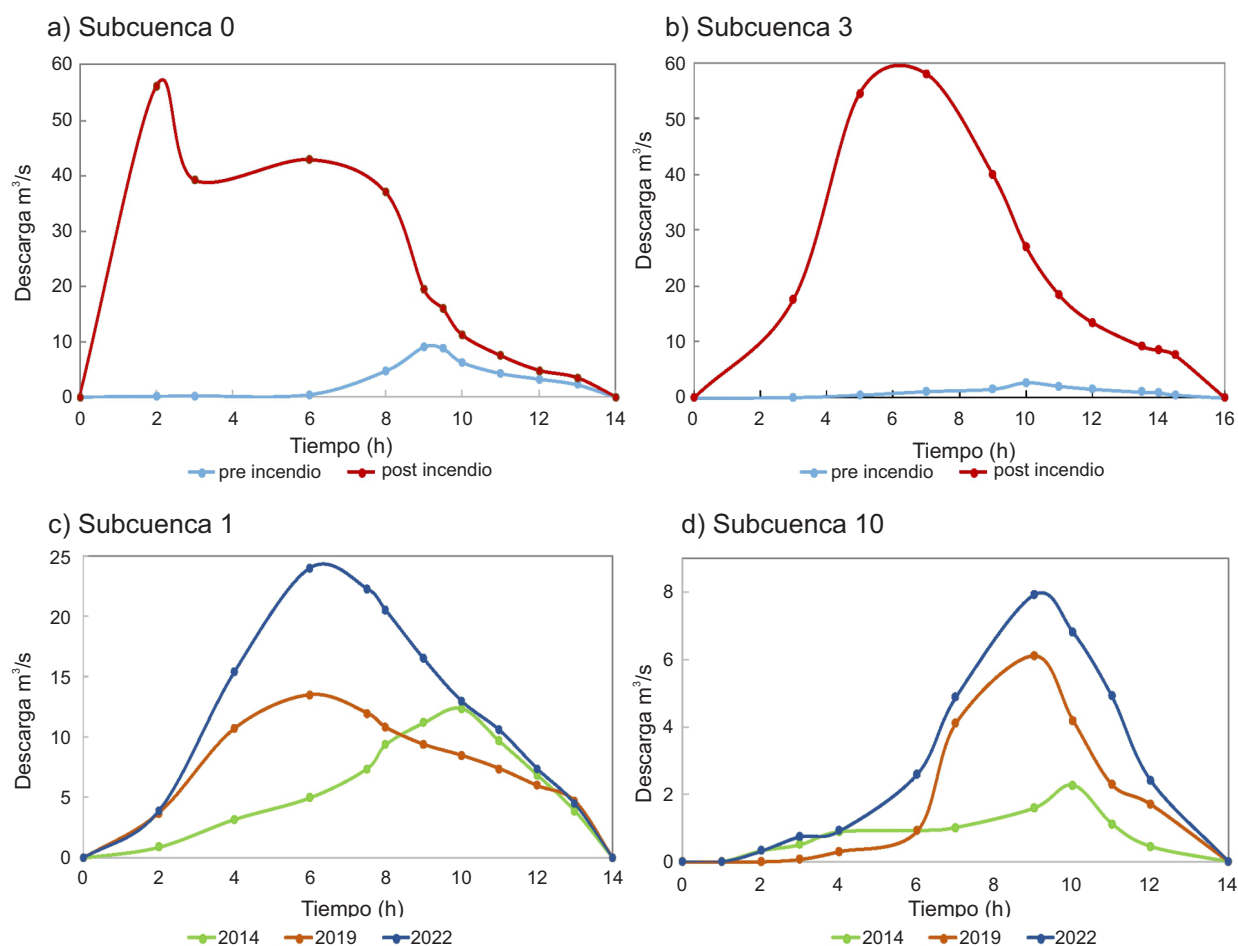


Figura 9. Curvas de descarga obtenidas con el modelo de lluvia-escorrimento para un periodo de retorno de 20 años (150 mm) para las siguientes subcuencas (a) subcuenca 0; (b) subcuenca 3; (c) subcuenca 1, afectada por los cambios de uso de suelo y (d) subcuenca 10, afectada por cambios de uso de suelo y vegetación.

trabajos realizados en el Volcán de Colima (en condiciones climáticas similares al área de estudio), se observa una relación directa entre la lluvia acumulada y la formación de flujos de escombros (Capra *et al.*, 2010; Capra *et al.*, 2018).

No se cuenta con los datos de lluvia que dispararon el evento del 2 de junio de 2019; sin embargo, al comparar los resultados de las simulaciones con las evidencias registradas en campo (profundidad del flujo y desbordamiento), se observa una mayor similitud con las zonas de inundación obtenidas con el escenario de 150 mm y período de retorno de 20 años. Para lluvias con períodos de retorno inferiores, los flujos que se canalizan por el drenaje que cruza la cabecera de San Gabriel no provocan desbordamiento (Figuras 10 y material suplementario). Por otro lado, es importante considerar que, debido a

la resolución del Modelo Digital de Elevación aquí utilizado (12.5 m), los límites de inundación pueden estar sobreestimados (Dávila *et al.*, 2007), ya que a una resolución menor los perfiles transversales de los canales se suavizan, lo que promueve inundaciones laterales.

Es importante mencionar que no se excluye que eventos hidrometeorológicos extremos, con valores de lluvia acumulada mayores a 150 mm, puedan ocurrir en el área, con impactos similares o mayores a los observados en 2019, y sin que la cuenca haya sido previamente afectada por incendios. Esto, considerando la gran cantidad de agua que la cuenca del río Salsipuedes puede captar por su superficie de 177 km² y que, además, descarga en una única escorrentía principal. El nombre del río Salsipuedes se debe a que se trata de un drenaje muy activo en cuanto a escurrimientos, con una

Tabla 11. Tiempo de llegada del pico máximo de descarga y volumen de agua obtenidos para las subcuencas con mayor cambio de uso de suelo en el periodo 2014-2022 y considerando un periodo de retorno de 20 años (150 mm).

Sub-cuencas	2014			2019			2022		
	Tiempo (h)	Descarga máx. m ³ /s	Volumen (m ³)	Tiempo (h)	Descarga máx m ³ /s.	Volumen(m ³)	Tiempo (h)	Descarga máx. m ³ /s	Volumen (m ³)
0	15.5	5.31	35790.6	15	8.72	109305.4	14.6	11.1	144308.7
1	13.4	14	268842.1	13.5	13.53	343746.8	12	23.2	605758.2
10	14.2	2.26	22972.1	14.7	6.1	77057.6	14.2	7.9	95904.3
11	15	2.34	20046.5	14	3.2	37768.1	14.1	3.3	37871.2

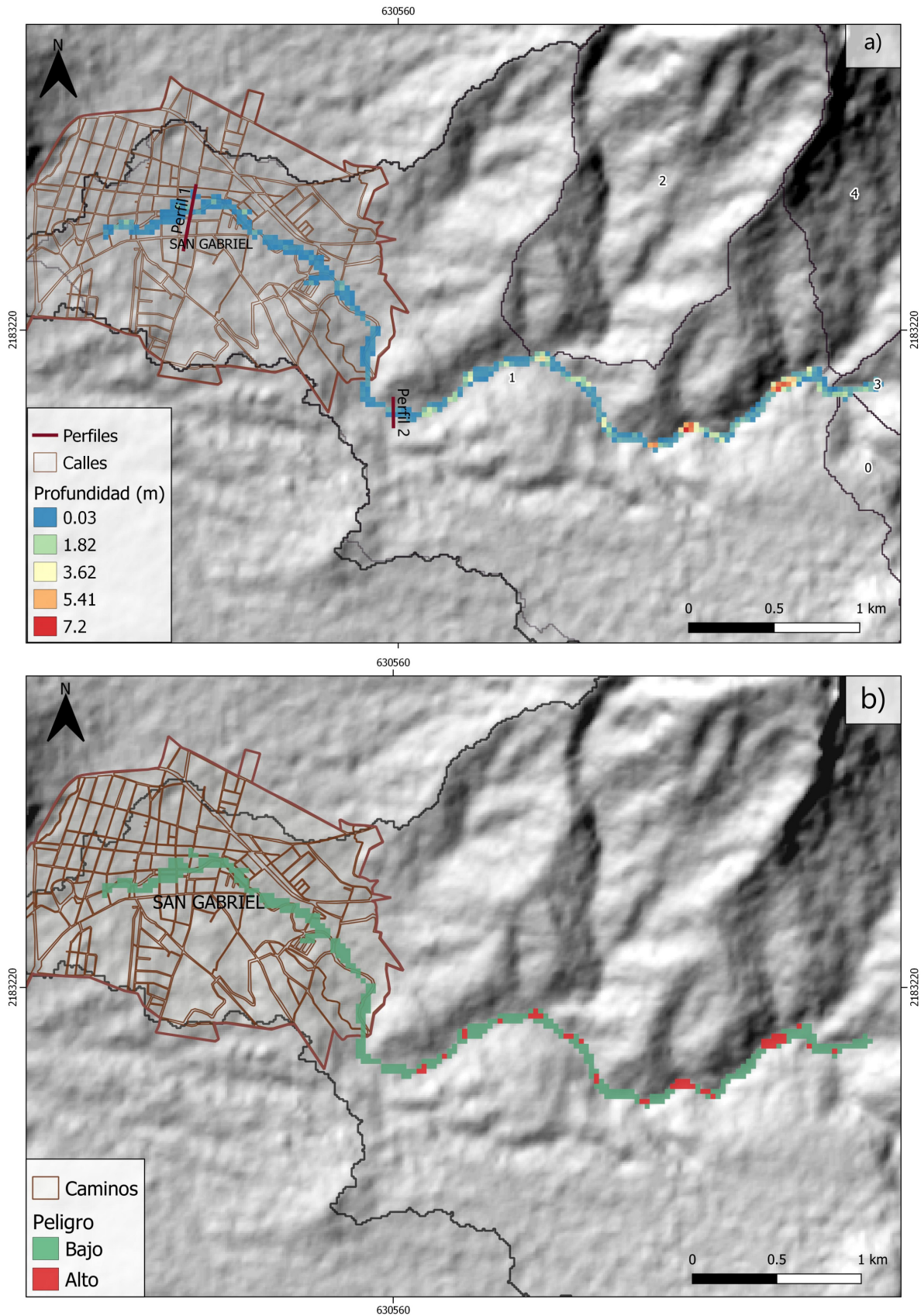


Figura 10. a) Mapa de inundaciones por flujos de escombros, con periodo de retorno de 5 años (100 mm); b) mapa de peligro considerando un umbral de 2 m de profundidad del flujo.

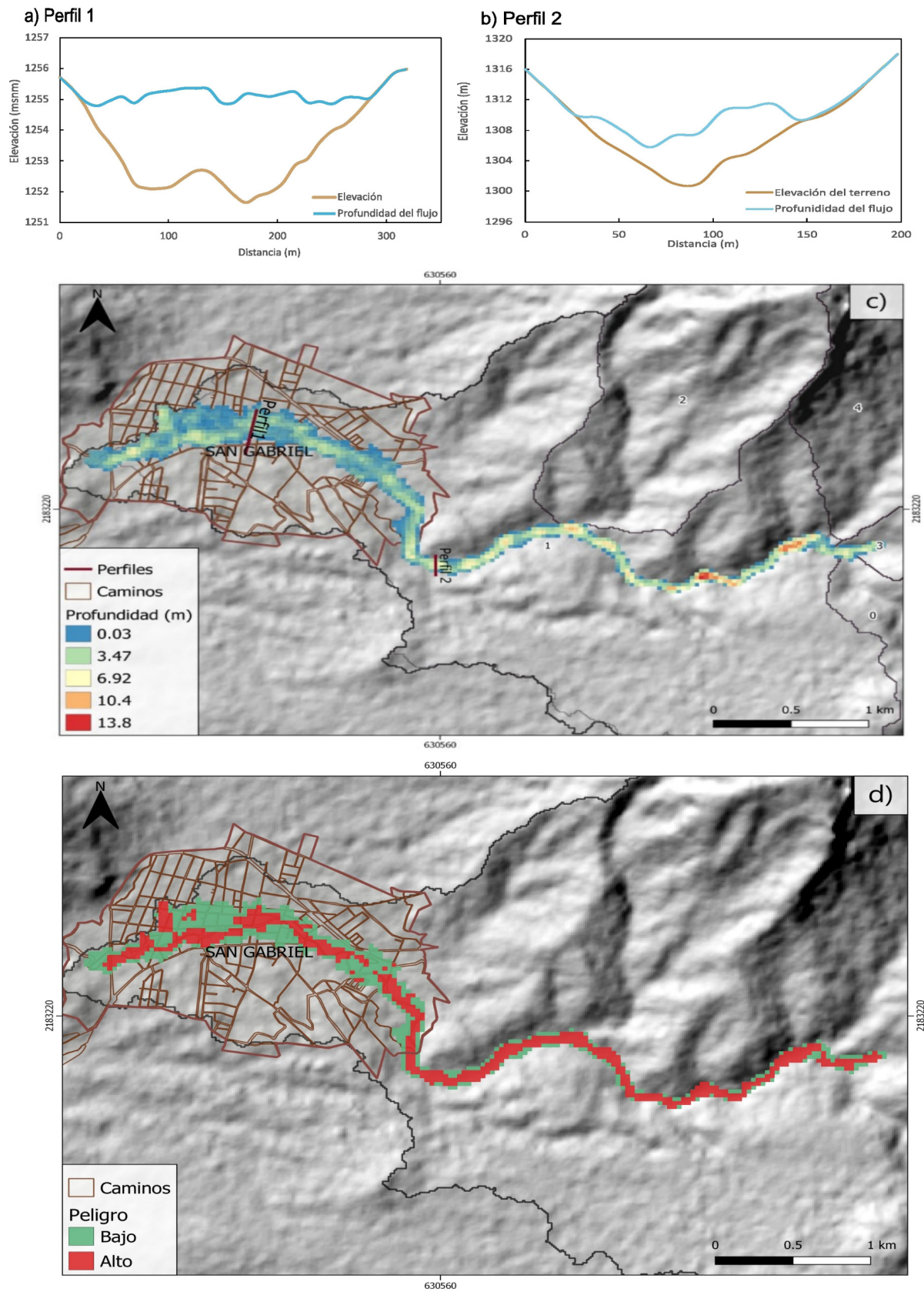


Figura 11. Perfiles que muestran la profundidad máxima del flujo, (a) perfil 1, en la zona urbana de San Gabriel; (b) perfil 2, en el canal principal antes de entrar a la zona urbana; (c) mapa de inundaciones por flujos de escombros, con periodo de retorno de 20 años (150 mm), y (d) mapa de peligro considerando un umbral de 2 m para la profundidad del flujo.

importante cantidad de sedimentos. Existen reportes históricos acerca de eventos de desbordamiento del río en los años de 1890, 1965, 1988, (Letra Fria, 2022), incluyendo la citación en el libro de El Llano en Llamas de Juan Rulfo (1953), “A la hora en la que me fui a asomar, el río ya había perdido sus orillas, iba subiendo poco a poco por la calle real y estaba metiéndose a toda prisa en la casa de esa mujer que le dicen La Tambora” (extracto del cuento “Es que somos muy pobres”).

Finalmente, en caso de que un evento similar al ocurrido el 2 de junio de 2019 vuelva a repetirse, las áreas susceptibles a ser afectadas incluyen escuelas como, “Venustiano Carranza” y “Edmundo Figueroa”, zonas urbanas como las plazas “Juan Rulfo” y “Plaza de Armas”, hospitales como “IMSS 63”, iglesias y templos, diversos puentes, caminos y carreteras serían igualmente impactados (Figura 12).

CONCLUSIONES

Con el análisis aquí expuesto, se desprende que la modificación de la cobertura por cambios de vegetación natural a cultivos o a suelo desnudo, además de promover un incremento del grado de erosión y, por ende, de la disponibilidad de sedimentos, también conlleva un aumento del escurrimiento superficial debido a la disminución de la capacidad de infiltración. Estos cambios son aún más drásticos tras un incendio y hacen que las zonas sean altamente susceptibles a la formación de flujos de escombros durante eventos de lluvia.

La evidente sequía que desde 2019 afecta a varias regiones de nuestro país, debido al incremento de las temperaturas a nivel global, está provocando un aumento de los incendios forestales. El evento registrado en la cuenca del río Salsipuedes en 2019 no ha sido aislado, ya que, en 2021, después de incendios, lluvias intensas causaron el desbordamiento del río El Cangrejo, en el estado de Jalisco, provocando la muerte de seis personas y la desaparición de ocho, además de daños importantes en la comunidad de Autlán, situada a 60 km al oeste de la ciudad de San Gabriel (obtenido del noticiero Letra Fría, 2023).

El cambio climático ha provocado que los fenómenos meteorológicos extremos, como las inundaciones y las sequías, sean cada vez más frecuentes e intensos, por lo que es fundamental promover estudios enfocados en la evaluación de la amenaza asociada, especialmente en la formación de flujos de escombros y el desbordamiento de ríos en zonas urbanas, considerando los cambios antrópicos en las características de las cuencas de recarga.

Agradecimientos. Se agradece la beca de CONAHCYT recibida durante los estudios de maestría. También se reconoce el apoyo de la Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos de Jalisco para la realización de trabajo de campo en la zona de estudio. Agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos, los cuales contribuyeron significativamente a mejorar el artículo.

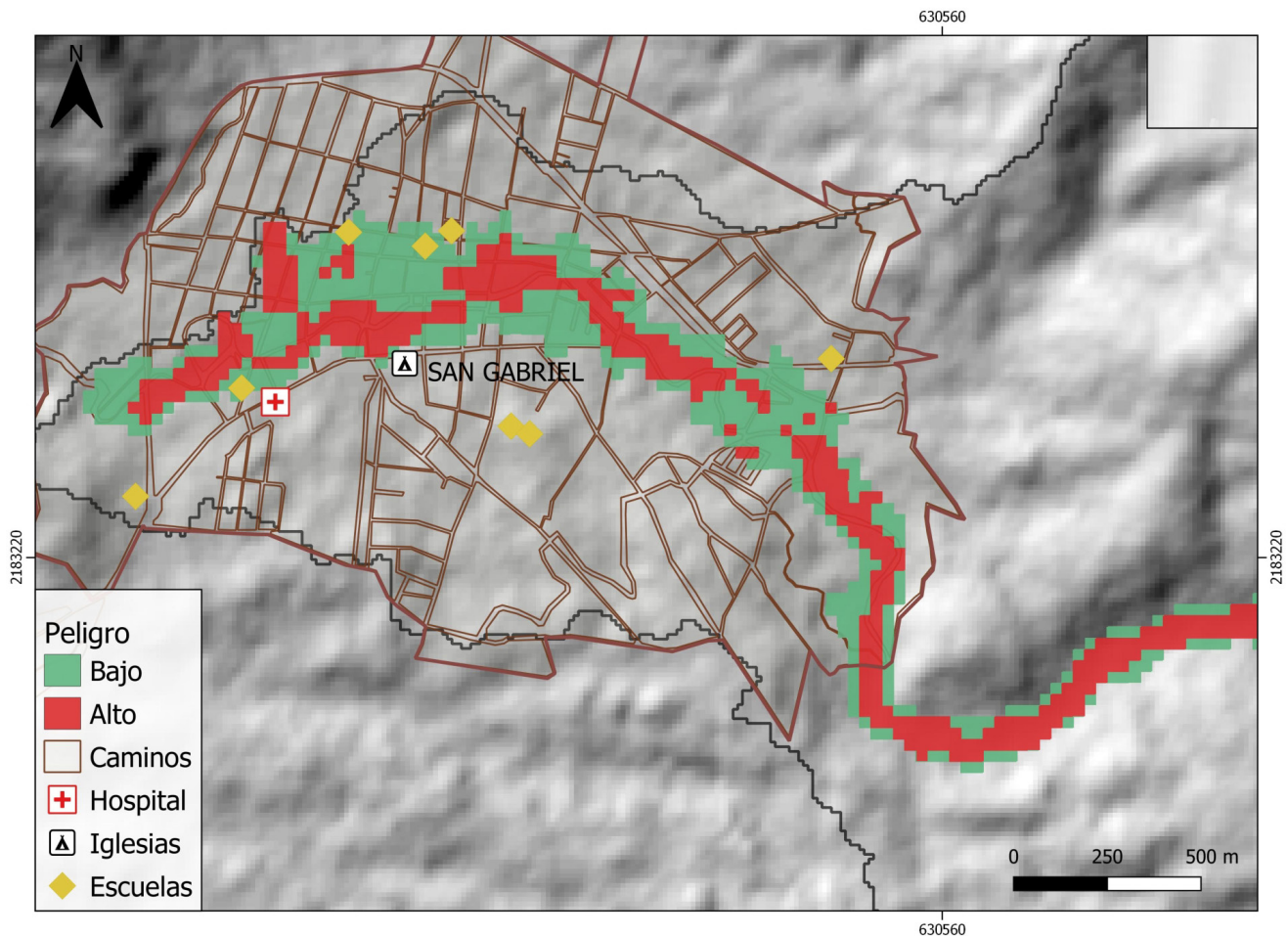


Figura 12. Escenario asociado a una acumulación de lluvia de 150 mm con periodo de retorno de 20 años en donde se resaltan la infraestructura en la cabecera municipal de San Gabriel que se vería afectada por los flujos de escombros.

Contribución de los autores. Todos los autores participaron en la recolección de datos, y en la conceptualización del trabajo. LMCL: metodología, recolección y procesamiento de datos, escritura y edición de figuras; LCP: recolección de datos, metodología, investigación, escritura; LB: revisión y análisis de datos; SSV: análisis de muestras y datos obtenidos en laboratorio.

Política de disponibilidad de datos. Los autores confirman que todos los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles en este artículo o en sus suplementos.

Declaración de conflicto de intereses. Los coautores declaran que no tienen conocimiento de conflictos de intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influenciado el trabajo que se reporta en este artículo. LC se desempeñó como editor asociado de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas durante el tiempo en que este manuscrito fue revisado y aceptado, y no tuvo participación alguna en la revisión por pares ni en las decisiones editoriales con respecto a este manuscrito.

Financiamiento. El estudio fue financiado por el proyecto PAPIIT IN109825. Se utilizaron datos abiertos proporcionados por las agencias espaciales satelitales e instituciones gubernamentales de México.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Las Figuras S1 a S6 y Tablas S1 y S2 se pueden descargar desde la vista previa de este artículo en la [página web de la Revista](#).

REFERENCIAS

- Alberca, J., Mejía, J., & Guevara-Pérez, E. (2022). Calibración de la curva número del modelo SCS para la región de la costa norte del Perú. *Revista Ingeniería UC*, 29(2), 124-135. DOI:10.54139/revingucv29i2.287
- Arcement, G., & Schneider, V. (1989) Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey Water Supply, Paper 2339.
- Bakker, M., Govers, G., Van Doorn, A., Quetier, F., Chovardas, D., & Rounsevell, M. (2008). The response of soil erosion and sediment export land-use change in four areas of Europe. *Geomorphology*, 98, 213-226. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.12.027
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (RUSLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Bendjoudi, H., & Hubert, P. (2002) Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants, *Hydrological Sciences Journal*, 47:6, 921-930. DOI: 10.1080/02626660209493000
- Borselli, L., Torri, D., Poesen, J., & Iaquina, P. (2012). A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates: *Catena*, 97, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.012>.
- Burt, R., & Soil Survey Staff. (2014). Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42, Version 5.0. U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Caballero, L., & Capra, L. (2014). The use of FLO 2D numerical code in lahar hazard evaluation at Popocatepetl volcano: a 2001 lahar scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (12), 3345-3355. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3345-2014>
- Caballero, L., Capra, L., & Vázquez, R. (2016). Evaluating the Performance of FLO2D for Simulating Past Lahar Events at the Most Active Mexican Volcanoes: Modeling and Decision Support. *Natural Hazard Uncertainty Assessment*, 179. DOI: 10.1002/9781119028116.ch12
- Caballero, L., Capra, L., & Vázquez, R. (2017). Evaluating the Performance of FLO2D for Simulating Past Lahar Events at the Most Active Mexican Volcanoes. *Natural Hazard Uncertainty Assessment*. Riley, K., Webley, P., Thompson, M., Webley, P. (eds), pp. 179- 189. DOI:10.1002/9781119028116.ch12
- Caon, L., Vallejo, V., Ritsema, C., & Grissen, V. (2014). Effects of wild fire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>
- Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Gavilanes-Ruiz, J. C., Norini, G., Sarocchi, D., Caballero, L., & Cortes, A. (2010). Rainfall-triggered lahars at Volcan de Colima, Mexico: surface hydro-repency as initiation process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(1-2), 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.014>
- Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J., Bonasia, R., Saucedo-Giron, R., & Sulpizio, R. (2014). Re-assessing volcanic hazard zonation of Volcán de Colima, México. *Natural Hazards*, 76, 41-61. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1480-1>
- Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez -Ramírez, V., & Arámbula-Mendoza, R. (2018). Hydrological control of large hurricane-induced lahars: Evidence from rainfall-runoff modeling, seismic and video monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 781-794. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-781-2018>
- Cardón, G. (2020). Análisis de la exposición ante procesos de remoción en masa mediante cartografía participativa y el uso de vehículos aéreos no tripulados en Huehueymico, Teziutlán, Puebla. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carrera-Hernandez, J. (2025). Mexico's High Resolution Climate Database (MexHiResClimDB): a new daily high-resolution gridded climate dataset for Mexico covering 1951-2020. *Earth System Science Data*, 17, 6911-6941. <https://doi.org/10.5194/essd-17-6911-2025>
- Cortes, A., Macias, J. L., Capra, L., & Garduño-Monroy, V. H. (2010). Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México. The 3600 yr BP La Lumbre-Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.013>
- Cortés, T. (1991). Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México.
- Cruz-Vázquez, O., Capra, L., Borselli, L. & Gianluca, N. (2025) Inter-eruptive lahars at El Chichón Volcano (Mexico): Susceptibility analysis and numerical modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(5), <https://doi.org/10.1002/esp.70070>
- Dávila, N., Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N., Norini, G., & Gómez-Vázquez, A. (2007). Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.016>
- DeBano, L., Neary, D., & Ffolliott, P. (2005). Soil physical properties. In: Neary, D., Ryan, K., DeBano, L. (Eds.), *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Soil and Water*. Rocky Mountain Research Station. Vol. 4. USDA Forest Service, pp. 29-52.
- Diaz-Carvajal, A., & Mercado-Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí, Colombia mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35 (2), 452-470.
- Ebel, B., & Mirus, B. (2014). Disturbance hydrology: challenges and opportunities. *Hydrological Processes* 28, 5140-5148. <https://doi.org/10.1002/hyp.10256>
- Espinales-Cedeño, F., Alulema del Salto, R., & Caicedo-Toro, M. (2021). Determinación del Número de Curva (CN) de la cuenca del Río Portoviejo. Dilemas contemporáneos: educación, política y valores, 8(spe2), 00017. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2600>
- Figueroa, S., Amante, A., Cortés, H., Pimentel, J., Osuna, E., Rodríguez, J., & Morales, F. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados (CREZAS), México.
- Gómez-Balmaceda, E., López-Ramos, A., Martínez-Acosta, L., Medrano-Barbosa, J., Remolina-López, J., Seingier, G., Daesslé, L., & López-Lambrano, A. (2020). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship. Case Study: Depth- duration ratio in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Hydrology*, 7, 78.
- Gravelius, H. (1914). *Flusskunde*. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. *Morphometry of Grainage Bassins*. Amsterdam, Elsevier.
- Guzman- Mora, J. (2022). Crónica de una tragedia en San Gabriel. (Los

- gabrielenses vivieron días de temor). Letra Fría, San Gabriel, Jalisco.
- Hawkins, R. (1978). Runoff curve numbers with varying site moisture. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 104, 389-398. <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0001313>
- Kite, G. (1977). Frequency and risk analysis in hydrology. Water Resources Publications. Chelsea, Michigan.
- Letra Fría. (2023). Autlán confirma ocho fallecidos y seis desaparecidos por desborde de El Cangrejo. <https://letrafria.com/autlan-confirma-ocho-fallecidos-y-seis-desaparecidos-por-desborde-de-el-cangrejo/>
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a6>
- Mishra, S., & Singh, V. (2003). Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>
- Moore, I., & Burch, G. (1986). Physical Basis of the Length Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America*, 50, 1294-1298. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- O'Brien, J. (2009). FLO-2D Software (version PRO 2009). Windows, EE.UU., FLO-2D Software, Inc.
- O'Brien, J., & Julien P. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (8), pp. 877-887. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877)
- O'Brien, J., Julien, P., & Fullerton, W. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 244-261. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244).
- Ortiz-Rodríguez, A., Muñoz-Robles, C., & Borselli, L. (2018). Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, México. *Elsevier, Science of the Total Environment* 665, 112-128 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.236>
- Pérez-Salinas, J., Rufino-Rodríguez, F., López-Santos, A., Torres-González, J., Meraz-Jiménez, A., Díaz-Romo, A., & Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Revista Terra Latinoamericana* 37, 391-400. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267, 1117-1123. DOI:10.1126/science.267.5201.1117
- Rojas-Estrada, L. (2019). *Vulnerabilidad al fuego en Áreas Forestales del campo experimental Las Cruces mediante un análisis multicriterio* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Rulfo, J. (1953). *El Llano en Llamas*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- Sandercock, P., Hooke, J., De Baets, S., Poesen, J., Meerkerk, A., Van Wesemael, B., & Cammeraat, L. (2017). Effectiveness of Plants and Vegetation in Erosion Control and Restoration. In: *Combating Desertification and Land Degradation*, Springer, 79-104. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44451-2_4
- Shakesby, A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105, 71-100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>
- Srinivasan, R., Kumar, S., Chandra, D., Hegde, R., & Muniasami, R. (2019). Estimation of soil loss by USLE model using Remote Sensing and GIS Techniques- A case of study of Coastal Odisha, India. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8 (4) 321 – 328. <https://doi.org/10.18393/ejss.598120>
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L. (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena* 31, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00036-2)
- Torri, D., Borselli, L., Calzolari, C., Yanez, M., & Sanchis, M. (2002). Soil erosion, land use, soil qualities and soil functions: effects of erosion in Man and Soil at the Third Millennium. *Geofoma Ediciones-CIDE, Logroño, Spain*, pp. 131-148.
- USDA, Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual*. Ditzler, C., Scheffe, K., & Monger, H., (eds.) USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. The USDA Agricultural Handbook No. 537, Maryland.
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiak, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 17, 2913-2918. <https://doi.org/10.1002/hyp.1441>
- Zaragoza, G., Caballero-García, L., Capra, L., & Nieto-Torres, A. (2020). Secondary lahars at Popocatepetl volcano: The Nexpayantla lahar of February 4th, 2010. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 37(2), 121–134. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.2.1565>