



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

Facultad de Ciencias

**RECONSTRUCCIÓN DEL PALEORELIEVE DEL
SUROESTE DE LA CUENCA DE MÉXICO Y SU
IMPACTO EN LA TRAYECTORIA DE LOS
DERRAMES DE LAVA DEL XILTLE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
MARIANA SANDOVAL GARCÍA

TUTORA
Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) por la beca otorgada durante el tiempo que realicé esta tesis dentro del proyecto “Propuesta para la recuperación hídrica en los pedregales del Xitle y cuenca del Río Magdalena en sitios de interés geopatrimonial”.

A la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por aceptar ser mi tutora, por sus enseñanzas, los consejos, la orientación y asesoría a lo largo de la realización de este trabajo de tesis.

A mis sinodales por sus valiosas revisiones y sugerencias:

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo.

Dr. Juan Manuel Espíndola Castro.

Dra. Ana María Lizeth Caballero García.

Dr. Amiel Nieto Torres por el apoyo en el trabajo de campo, sus enseñanzas y ayuda en la elaboración de las simulaciones de los derrames de lava, así como por los consejos para mejorar este trabajo.

A mis padres y hermano

A mi familia y amigos

A Camila

Comprender las cosas que nos rodean es la mejor preparación para comprender las cosas que hay más allá.

Hipatia de Alejandría

Índice

Resumen	6
1. Introducción	7
1.1. Justificación	7
1.3. Antecedentes	8
1.3.1. Vulcanismo antiguo de la zona suroeste de la cuenca de México	8
1.3.2. Vulcanismo monogenético en la zona noroeste del Campo Volcánico Chichinautzin pre-xitle	9
1.3.3. Erupción del volcán Xitle	10
2. Metodología	12
2.1. Trabajo de campo, muestreo y procesamiento de las muestras	12
2.2. Procesamiento digital del Modelo Digital de Elevación (DEM)	13
2.3. Programas usados para las simulaciones de los derrames de lava del Xitle	15
2.4. Procesamiento para identificar los depósitos volcánicos pre-Xitle	17
2.5. Procesamiento para obtener el paleo-drenaje	18
2.6. Procesamiento para la simulación de los derrames de lava del volcán Xitle	20
2.7. Proceso para resaltar el impacto de la erupción del volcán Xitle en el suroeste de la Cuenca de México	23
3. Resultados	23
3.1. Resultado del procesamiento digital del DEM para la reconstrucción del paleo-relieve	23
3.2. Depósitos volcánicos pre-Xitle	30
3.2.1. Volcán Cuilotepec	31
3.2.2. Volcán Coatzontle	34
3.2.3. Volcán Yololica	38
3.2.4. Volcán Malinale	38
3.3. Análisis del paleo-drenaje	39
3.4. Simulación de los derrames de lava del volcán Xitle	44
3.5. Impacto de la erupción del volcán Xitle en el suroeste de la Cuenca de México	57
4. Discusión	62
5. Conclusiones	68
Referencias bibliográficas	70

Resumen

El Xitle es uno de los volcanes monogenéticos más jóvenes del suroeste de la Cuenca de México. Su erupción se caracterizó por la emisión de lavas fluidas de tipo pahoehoe y aa. En este trabajo se reconstruyó el paleo-relieve de la zona del Xitle. Esta se llevó a cabo con el objeto de mejorar el conocimiento de la distribución del paleo-drenaje y la trayectoria de los derrames de lava de los volcanes previos al Xitle (pre-Xitle), así como de los derrames del volcán Xitle.

Se modificaron las curvas de nivel del relieve actual para quitar la topografía de las lavas del volcán Xitle y poder visualizar el relieve previo. Se procesaron las curvas de nivel modificadas para obtener un nuevo DEM con las características del paleo-relieve en el Sistema de Información Geográfica Arcgis 10.4.1. Se identificaron los depósitos de los volcanes pre-Xitle (Complejo Volcánico San Miguel, Ajusco, Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinale) de acuerdo con la morfología del paleo-relieve y el reconocimiento en campo. Se simularon los derrames de lava de los volcanes monogenéticos pre-Xitle, Cuilotepec y Coatzontle con el programa probabilístico Q-LavHA (Mosseoux, 2016). La distribución y cause de los paleo-canales del paleo-drenaje se definió mediante el estudio de la acumulación y dirección de flujo en el paleo-relieve con el programa ArcGIS 10.4.1.

Se reconocieron nueve derrames de lava aa y pahoehoe del volcán Xitle (Nieto, 2020), que fueron simulados individualmente con el paleo-relieve reconstruido también con el programa probabilístico Q-LavHA (Mosseoux, 2016). Se compararon las observaciones hechas en campo y estudios previos del volcán Xitle para definir los parámetros usados en las simulaciones de cada derrame de lava. Las simulaciones de los derrames de lava del volcán Xitle muestran que las trayectorias de los derrames de lava y la distribución de los tubos de lava están asociadas a variaciones en la tasa de efusión, a la distribución de los paleo-canales, morfología de los depósitos de los volcanes pre-Xitle, sobre todo de la avalancha del Ajusco y a la abrupta pendiente del paleo-relieve. Los derrames de lava del volcán Xitle rellenaron los paleo-canales modificando los causes, como el del paleo-canal Magdalena, o rellenando por completo sus canales como ocurrió con el paleo-canal Cuicuico. Las lavas también cubrieron los depósitos de los volcanes pre-Xitle con excepción de las partes más altas como el caso del volcán Cuilotepec y los montículos (*hummocks*) del Ajusco (Bosque de Tlalpan y Cerro Zacatépetl). Los derrames del Xitle proporcionan diversos servicios ecosistémicos que se ven amenazados por el crecimiento urbano por lo que su conservación es muy importante.

1. Introducción

El suroeste de la Cuenca de México ha sido afectado por diferentes eventos volcánicos que han ido cambiando la morfología del paisaje. Uno de los más recientes fue la erupción del volcán Xitle que fue fechada entre 1670 ± 35 años A.P y 2030 ± 60 años A.P. (Córdova et al, 1994; Martin Del Pozzo et al.,1997; Siebe, 2000). Sus derrames de lava fluyeron siguiendo el antiguo relieve cubriendo a su paso los depósitos volcánicos más antiguos, con excepción de las más altas y anchas que fueron cubiertas parcialmente. Estas lavas también sepultaron Cuicuico, un asentamiento que existió hace más de dos mil años.

Las lavas del Xitle son fundamentales para la recarga de los acuíferos del sur de la CDMX, y son un importante hábitat de especies de flora y fauna que las habitan y por los servicios ecosistémicos que brindan a la ciudad.

1.1. Justificación

La erupción del volcán Xitle se caracterizó por la emisión de varios flujos de lava que modificaron el relieve de la zona y desviaron el patrón general del drenaje (Córdova et al., 1994; Martin Del Pozzo et al., 1997).

En este trabajo se pretende aportar al conocimiento del impacto que tuvo la erupción del volcán Xitle en el suroeste de la Cuenca de México. La reconstrucción del relieve previo a la erupción del Xitle (pre-Xitle) mejorará el conocimiento del paleo-relieve y de los depósitos de los volcanes pre-Xitle que se encuentran en el área de estudio, así como del drenaje de los principales paleo-canales que existieron y que desaparecieron debajo de las lavas del Xitle. La reconstrucción en el paleo-relieve de los diferentes derrames de lava del volcán Xitle con un programa probabilístico mejorará el entendimiento de la actividad efusiva de la erupción y del emplazamiento de cada derrame de lava.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Reconstruir el relieve de la zona antes de la erupción del Xitle y la trayectoria de los derrames de lava del Xitle, para mejorar el entendimiento de la erupción y sus impactos.

Objetivos particulares

- Reconstruir el relieve preexistente al volcán Xitle.
- Mejorar el conocimiento de la trayectoria de los paleo-canales en el paleo-relieve pre-Xitle.

- Aportar al conocimiento de los volcanes pre-Xitle del suroeste de la Cuenca de México y sus derrames de lava.
- Detallar el conocimiento de cómo fluyeron los diferentes derrames de lava del volcán Xitle y su impacto mediante su simulación probabilística.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Vulcanismo antiguo de la zona suroeste de la cuenca de México.

El vulcanismo en el suroeste de la Cuenca de México ha sido intenso: se pueden distinguir tres formaciones volcánicas en esta zona que ocurrieron desde el Plioceno tardío hasta el Holoceno. Los materiales más antiguos del suroeste de la Cuenca de México pertenecen a la Sierra de las Cruces (Mora et al., 1991), seguido por el vulcanismo correspondiente a la Formación Ajusco (Osete et al., 2000); y el vulcanismo más joven del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin. En la Figura 1 se muestra el área de estudio, la cual está conformada por parte de la Sierra de las Cruces, el Ajusco y una parte del noroeste del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.

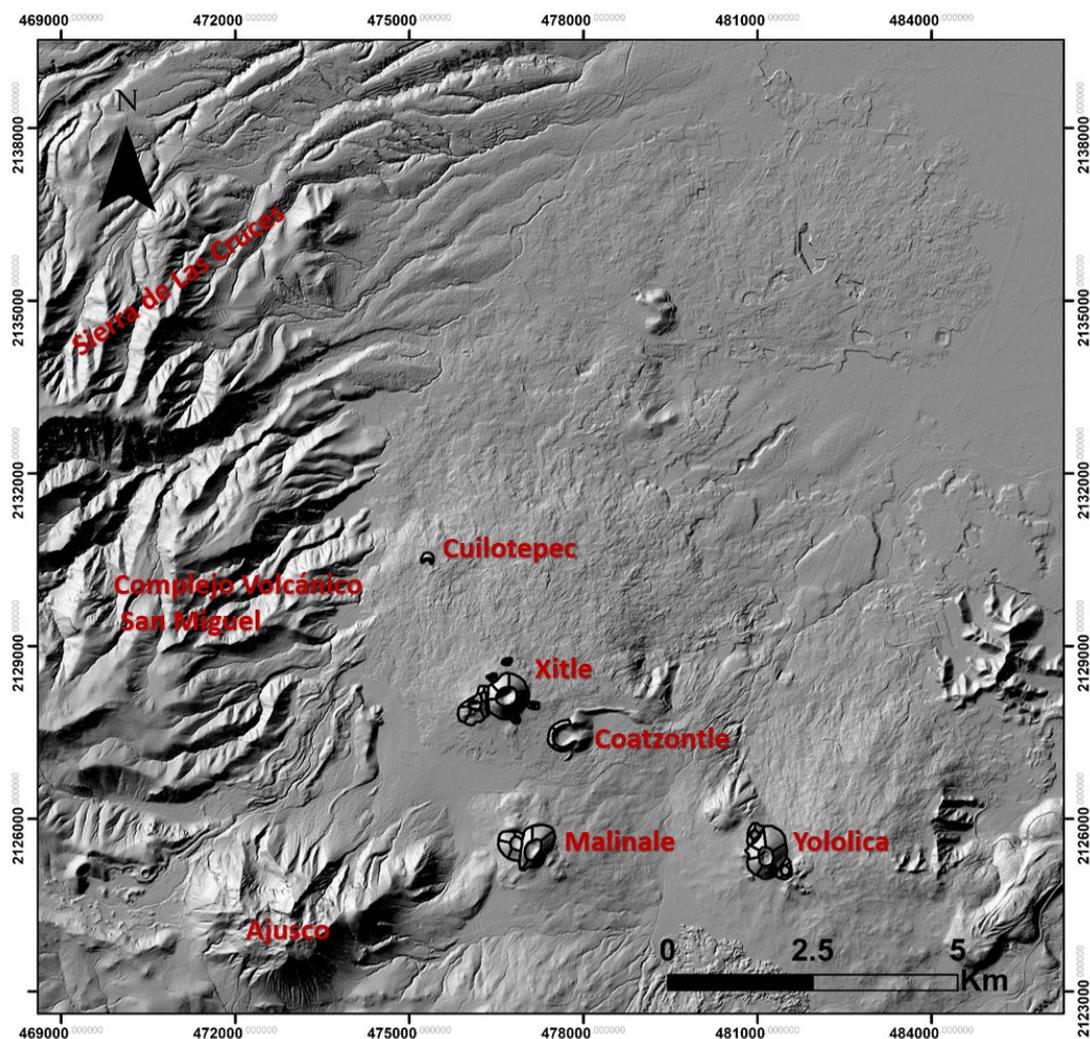


Figura 1. Mapa general de la zona de estudio.

Varios estudios indican que el vulcanismo del sur de la Sierra de las Cruces data de 3.71 ± 0.40 Ma a 0.39 ± 0.16 Ma (Osete et al., 2000; Mora et al., 1991). Mooser (1974) consideró que la Sierra de Las Cruces se formó sobre una serie de fallas. Una parte de este vulcanismo pertenece al Campo Volcánico San Miguel, el cual se encuentra cerca del Campo Volcánico Chichinautzin y sus depósitos están debajo del Ajusco y de los volcanes del noroeste del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin.

Romero (2001) menciona que el Complejo Volcánico San Miguel se formó entre 0.5 Ma y 3 Ma principalmente con domos de composición intermedia y depósitos de bloques y cenizas asociados. En el Complejo Volcánico San Miguel también se observan depósitos de lahares y morrenas.

Después de la actividad volcánica del Complejo Volcánico San Miguel, se formó el volcán Ajusco durante el Plioceno Medio al Pleistoceno Tardío. Hace >3 Ma y hasta 0.6 Ma se formaron varios domos y derrames de lava acompañadas por flujos piroclásticos de bloques y ceniza y brechas de composición andesítica y dacítica (White et al., 1990; Romero, 1998). El domo dacítico más joven fue el Pico del Águila (0.6 Ma) que se colapsó hace <0.6 produciendo una avalancha de escombros tipo Bandai (Romero 1998). Esta avalancha se originó por erupciones freáticas causadas por la descompresión hidrotermal que provocó el deslizamiento de una parte del flanco del volcán. La avalancha tuvo un volumen aproximado de 1.4 km^3 y alcanzó una distancia de hasta 16 km. (Romero, 1998). A su paso la avalancha fue dejando sus depósitos formando montículos (*hummocks*) como el Cerro Zacatépetl y el Bosque de Tlalpan, cubriendo parte de los depósitos del Complejo Volcánico San Miguel.

Tanto el Complejo volcánico San Miguel como el volcán Ajusco fueron erosionados por glaciares que dejaron diversas estructuras como los circos y morrenas durante varios periodos de glaciación (White y Valastro, 1984).

1.3.2. Vulcanismo monogenético en la zona noroeste del Campo Volcánico Chichinautzin pre-xitle

Después de los episodios del vulcanismo del Complejo Volcánico San Miguel y del volcán Ajusco ocurrió otro periodo de vulcanismo, esta vez de tipo monogenético que dio lugar al llamado campo Chichinautzin, que se desarrolló entre el Pleistoceno Tardío y el Holoceno. Este vulcanismo se caracteriza por la presencia de conos de escoria formados principalmente por actividad de tipo estromboliana y estromboliana violenta (Martin Del Pozzo, 1982). Las lavas son principalmente andesíticas, pero

también hay derrames dacíticos muy gruesos y basaltos. Algunos de estos volcanes basálticos más jóvenes incluso presentan características de actividad hawaiana (Martin Del Pozzo, 1997). La lava fluyó principalmente desde la base de los conos y muchos de estos volcanes formaron conos secundarios (Martin Del Pozzo, 1982; Delgado y Martin Del Pozzo, 1993).

Los volcanes monogenéticos pre-Xitle que se encuentran cercanos al volcán Xitle son el Cuilotepec, el Coatzontle, el Yololica y el Malinale.

El volcán Cuilotepec es un cono escoriáceo cuyo cono y derrames fueron cubiertos en gran parte por las lavas del volcán Xitle. Forma parte del grupo joven del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (Nieto y Martin Del Pozzo, 2019).

El volcán Coatzontle también se encuentra muy cerca del volcán Xitle. Fue fechado en $30,500 \pm 1,160$ años A.P. por Martin Del Pozzo (1990). Sus lavas tienen un contenido de sílice de 62.18% (Jaimes-Viera et al., 2018), es decir, son andesitas. Los depósitos de lavas de este volcán se encuentran cubiertas por las lavas del volcán Xitle.

El volcán Yololica pertenece al grupo joven del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin. Las lavas de este volcán fueron fluidas de tipo andesita basáltica, contienen olivino, piroxeno, labradorita y titanomagnetita (Martin Del Pozzo, 1990). Se encuentra colindando al este de las lavas del volcán Xitle.

El volcán Malinale se encuentra al noreste del volcán Ajusco. Fue datado por Kirianov, et.al. (1990), en $18,900 \pm 600$ años A.P. Martin Del Pozzo (1982) definió las características de los diferentes tipos de derrames de lava del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin, basándose en su espesor y composición. Definió que los derrames más delgados fueron menos viscosas y son de tipo basáltico y los derrames más gruesos fueron más viscosos, de tipo andesítico. Por las características del grosor de la lava y el tamaño del derrame de lava que se observa en las imágenes satelitales y en el DEM se considera que las lavas del volcán Malinale son de tipo andesíticas.

1.3.3. Erupción del volcán Xitle.

El Xitle se encuentra en el noroeste del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin (Martin del Pozzo, 1982). Es uno de los volcanes más jóvenes del campo volcánico, que fue fechado por carbono 14 entre 1670 ± 35 años A.P y 2030

± 60 años A.P. (Córdova et al., 1994; Martin Del Pozzo et al., 1997; Siebe, 2000). Nació sobre los depósitos de avalanchas del Ajusco y las lavas de los volcanes más antiguos que se encuentran a su alrededor.

La erupción del Xitle inició con la emisión de lapilli gruesa, resultado de la despresurización del magma y consecuente expansión rápida de los gases, produciendo erupciones moderadamente explosivas tipo estrombolianas. En esta primera fase explosiva se empezó a formar el cono (Cervantes y Wallace, 2003). Después la actividad aumentó su explosividad y cambió a estromboliana violenta, produciendo piroclastos más finos que continuaron construyendo el cono principal.

Le siguió la emisión de lava que formó dos conos de lava parásitos, uno al oeste llamado Xicontle 1 y otro al este del cono principal llamado Xicontle 2, desde los que se emitieron varios flujos de lava (Martin Del Pozzo et al., 1997). El que está al oeste está compuesto de dos bocas y el que está al este tiene una sola boca.

La erupción fue predominantemente efusiva con flujos de lava que representan ~95% del material expulsado (Cervantes y Wallace, 2003). Las lavas fluyeron hacia el norte y luego giraron hacia el este siguiendo viejos canales de ríos y enterrando varios volcanes más antiguos (Córdova et al., 1994; Martin Del Pozzo et al., 1997). En el estudio realizado por Cordova et.al. (1994) se realizó una reconstrucción de los principales ríos que existían antes de la erupción del volcán Xitle. En 2001 Lugo Hubp estudió los depósitos de un antiguo lago en Cuicuilco, encontró partículas de un paleocanal mayores a 60 mm de diámetro, lo que indica un flujo de alta energía, que probablemente pertenecían a algún paleo-canal. Solo los montículos más altos de la avalancha de escombros, como el Cerro Zacatépetl, no fueron cubiertos por la lava del Xitle (Siebe, 2000).

Algunos derrames de lava del volcán Xitle son compuestos (Cañon-Tapia, 1995, Martin Del Pozzo et.al., 1997). Los derrames de lava pahoehoe formaron tubos por donde viajó la lava, dándole mayor alcance y espesor al derrame. Además, se tiene presencia también de derrames de lava tipo aa, que se formaron cuando la tasa de efusión fue mayor. Según Rowland y Walker (1990) cuando la tasa de efusión es <5-10 m³/s se forman lavas tipo pahoehoe y cuando la tasa de efusión es >5-10 m³/s. La tasa de efusión de las lavas del volcán Xitle, fue en promedio entre 5 y 10 m³/s (Nieto, 2020). Estas lavas son andesitas basálticas que contienen olivino, piroxeno y plagioclasa y 51 a 53% de SiO₂ (Martin Del Pozzo, 1990). En total, los derrames

de lava cubren un área de entre 70 km² y 80 km² (Córdova et al., 1994; Siebe, 2000), con un volumen ~1 km³ de lava (Cervantes et al., 1995; Delgado et al., 1998) y 0.12 km³ de tefra (Cervantes et al., 1995). Siebe (2000) le asignó un VEI entre 2 y 3 y Nieto (2020) una duración de 3.5 a 7 años.

2. Metodología

Se llevó a cabo una revisión documental sobre los volcanes Xitle, Ajusco, Sierra de las Cruces (Complejo Volcánico San Miguel) y otros volcanes pre-Xitle que se encuentran al suroeste de la Cuenca de México y en el noroeste del Campo Volcánico Monogenético Chichinautzin, como el volcán Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinalte. El área de estudio se muestra en la Figura 1.

2.1. Trabajo de campo, muestreo y procesamiento de las muestras.

Se llevaron a cabo diversas campañas de trabajo de campo para el reconocimiento del área y de las estructuras y espesores de algunos derrames de lavas en diversos sitios.

Se obtuvieron muestras del cono del volcán Cuilotepec, de las lavas del volcán Xitle y de las lavas que se encuentran en el Parque Nacional Fuentes Brotantes para compararlas.

Se tomaron muestras que pertenecen al volcán Coatzontle de dos sitios, tres muestras se tomaron del Parque Nacional Fuentes Brotantes y una del límite actual entre las lavas del volcán Xitle y del Coatzontle. Las características de la muestra C1 fueron proporcionadas por la Dra. Carmen Jaimes Viera.

A la muestra del cono de escorias del volcán Cuilotepec se le hizo análisis de granulometría por tamizado en los laboratorios del Instituto de Geofísica de la UNAM. Este método permite conocer los tamaños de las partículas de una muestra. El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

1. Se pesó la muestra antes del tamizado.
2. Se ensamblaron los tamices en una columna en orden descendente, quedando los de la malla con mayor abertura en la parte superior y los de menor abertura en la parte inferior, los tamaños de tamices que se usaron fueron de -5 phi a 4.5 phi (de 32 a ~0.063 mm).

3. Se hizo pasar la muestra por todos los tamices que componen la columna, vertiendo la muestra la parte superior y dando movimientos vibratorios y de rotación a toda la columna de tamices.
4. Se retiraron los tamices y se pesó por separado el material retenido en cada tamiz;
5. Se calculó el porcentaje del material retenido en cada tamiz, tomando en cuenta el peso total y los pesos del material retenido en cada tamiz.
6. Se relacionaron estos porcentajes y los tamaños de las partículas según los tamaños de grano de las diferentes erupciones establecidas por Walker y Croasdale (1971) y Walker (1973) para conocer el tipo de erupción que originó estos componentes.

A esta muestra se le hizo análisis de características macroscópicas, lo que también ayudó a relacionar este material con un tipo de erupción.

A las otras muestras se le hizo una descripción mineralógica macroscópica.

2.2. Procesamiento digital del Modelo Digital de Elevación (DEM).

Se procesaron imágenes del Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) LiDAR (Light Detection And Ranging) de INEGI para obtener el relieve actual de la zona del Xitle y su derrame de lavas con una resolución de 5 m. El DEM es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve (INEGI, 2014). El LiDAR es una técnica de teledetección óptica que utiliza un haz láser para obtener una imagen de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de “x”, “y” y “z” (Esri, 2016).

Se procesó el DEM en el software ArcGIS 10.4.1, para reconstruir el relieve pre-Xitle. Con el propósito de resaltar el relieve preexistente, se decidió trabajar con curvas de nivel de 10 m para eliminar el efecto de los derrames de lava del volcán Xitle, considerando que su espesor máximo es de 25 m.

Se obtuvo el paleo-relieve con las nuevas curvas de nivel a través de los siguientes pasos mostrados en la Figura 2:

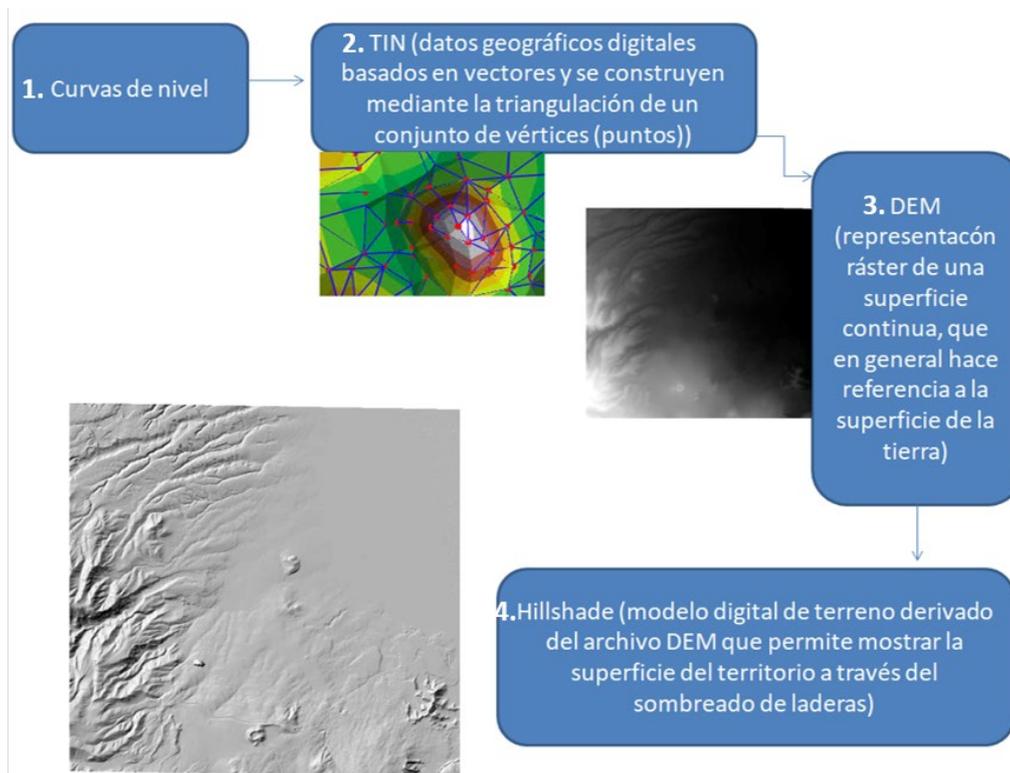


Figura 2. Procedimiento llevado a cabo en el programa SIG ArcGIS para obtener el paleo-relieve.

A continuación, se describe el procedimiento mostrado en la Figura 2:

1. Con la herramienta para editar del programa SIG ArcGIS se modificaron los vértices de cada curva de nivel siguiendo la topografía de las barrancas antiguas provenientes de la Sierra de las Cruces, del volcán Ajusco y otras estructuras y depósitos más antiguos que actualmente están enterrados por las lavas del volcán Xitle. Las modificaciones se hicieron de acuerdo con la morfología que se observa en las imágenes satelitales y en el DEM, que muestran diferentes formas del relieve de las que se puede inferir que debajo hubo otra estructura. Se utilizaron también datos de trabajos anteriores, como el hecho en 1994 por Córdova et.al., y con lo que se observó en campo.

2. Se hizo una Red Irregular Triangular (TIN por sus siglas en inglés) a partir de las curvas de nivel modificadas. El TIN es una forma de datos geográficos digitales basadas en vectores que se construye mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos) de las curvas de nivel. La triangulación resultante cumple el criterio de triángulo de Delaunay, que afirma que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo (Esri, 2016).

3. A partir del TIN se creó una nueva superficie ráster (DEM) con resolución de 10 m que tenía las nuevas características de la modificación de las curvas de nivel, es decir, que contiene las características del paleo-relieve.

4. Se hizo el procesamiento del DEM en el programa SIG para visualizar el terreno del paleo-relieve mediante un mapa de sombras (HillShade), que es una representación 3D en escala de grises de la superficie que tiene en cuenta la posición relativa del sol para sombrear la imagen (Esri, 2016).

En el capítulo 3.1 se muestran los resultados obtenidos en cada paso explicado anteriormente: el mapa de las curvas de nivel del relieve actual y las curvas de nivel modificadas, el DEM y el mapa de sombras del paleo-relieve reconstruido.

Se calculó también la pendiente del paleo-relieve con la herramienta para calcular pendientes (Slope) del programa SIG ArcGIS.

2.3. Programas usados para las simulaciones de los derrames de lava del Xitle.

Con el paleo-relieve reconstruido se llevó a cabo una simulación general del derrame de lava del volcán Xitle para verificar que la reconstrucción del paleo-relieve fuera correcta y para calibrar el modelo, procurando que el derrame simulado siguiera una trayectoria parecida a la de los derrames reales. La simulación se hizo con el programa Q-LavHA (Quantum-Lava Hazard Assessment) que es un complemento de libre acceso del programa SIG QGIS (Quantum GIS) que simula la probabilidad en cada pixel del DEM de que un flujo de lava lo invada. Este programa se usó también para simular los derrames de lava individuales del volcán Xitle.

El emplazamiento de la lava en la realidad está controlado por una interacción compleja entre la tasa de efusión, la topografía, la viscosidad de la lava, el límite elástico, los procesos de enfriamiento, la morfología y la dinámica de propagación. Sin embargo, la mayoría de las veces no se cuenta estos datos. El programa Q-LavHA propone tres alternativas para obtener un buen ajuste a la realidad: en función de un valor de longitud máxima (L_{max}), con una función estadística de probabilidad de longitud (L_{normal}) o en función de las propiedades termorreológicas de un flujo de lava (FLOWGO). En este trabajo se usó el método del valor máximo de longitud y espesor de la lava (H_c), ya que no conocemos la reología de cada derrame de lava. La propagación espacial del derrame de lava simulado con este programa está limitada por la pendiente probabilística más pronunciada. Este programa incluye

factores de corrección que permiten que el flujo simulado supere pequeños obstáculos topográficos y rellene pozos (Hp). Se puede definir el tipo de boca eruptiva desde la que se llevará a cabo la simulación, que puede ser desde una o varias bocas eruptivas distribuidas regularmente en el DEM, o desde una fisura; permite también establecer el número de iteraciones que se deseen (Mosseoux et al., 2016).

La probabilidad de que un área fuera inundada por lava en el paleo-relieve se calculó en este trabajo a partir de los parámetros de entrada del Modelo Digital de Elevación (DEM), el espesor y longitud máxima del derrame a simular. Se hicieron simulaciones de 1500 iteraciones debido al tiempo de procesamiento y a la capacidad de la computadora en la que se hicieron las simulaciones.

Se realizó otra simulación con el programa Etna Lava Flow Model (ELFM) que también mide la probabilidad de flujo de cada pixel a partir del DEM, el espesor y longitud del derrame que se quiera simular, pero lo hace desde una boca puntual. Este programa permite determinar el incremento del espesor del flujo, que puede ser logarítmico, lineal o constante (Diamiani et al., 2006). Ambos programas se basan en el modelo de Felpeto et al., (2001) donde dado un DEM y un punto de emisión, se calcula iterativamente una serie de caminos para el flujo de lava y luego asigna a cada pixel del DEM una probabilidad de que el flujo de lava lo invada. Después de cada iteración, se atribuye una probabilidad incremental de inundación a cada píxel que forma parte de la línea de flujo obtenida correspondiente a uno sobre el número total de iteraciones ($1/\text{número de iteraciones}$). Esto se hace para cada caso con el programa Q-LavHA (Mosseoux, 2016).

En la simulación hecha en los dos programas se consideró un solo derrame de lava del volcán Xitle, por lo que se usó el valor máximo de longitud y espesor de los derrames de lava que se han registrado en trabajos anteriores y que se han observado en campo (Tabla 1 y 2), estas simulaciones sirvieron también para calibrar el modelo utilizado. Realmente el volcán Xitle tuvo más de un derrame de lava, varios de los cuales fueron derrames compuestos que formaron tubos de lava. Ambos programas tienen la limitante de que solo se pueden simular derrames de lava simples, por lo tanto, los derrames de lava compuestos y los tubos de lavas no se pueden simular con estos programas ni con algún otro. En el caso de la simulación general con el programa Q-LavHA, se consideró que el origen de las lavas del volcán Xitle fuera fisural por la alineación de sus bocas principales. Como ya se mencionó,

el programa ELFM no permite simular derrames de lava desde fisuras, por lo cual con este programa se usó una fuente de lava puntual.

Tabla 1. Parámetros usados para la simulación con el programa Q-Lavha.

Coordenadas de la fisura	475845.514E 2127943.826N a 477347.028E 2127990.128N
Distancia entre vents	100 m
Hc (espesor de la lava)	25 m
Longitud de derrame	13000 m
Hp (corrección topográfica)	26
Número de iteraciones	1500

Tabla 2. Parámetros usados para la simulación con el programa Etna Lava Flow Model.

Coordenadas del vent	x (243), y (360)
h (espesor de la lava)	25 m
m (longitud del derrame)	13 000 m
l (número de iteraciones)	1500

En las simulaciones en ambos programas se remuestreó el DEM con resolución de 10 m a un DEM con resolución de 30 m para hacer el pixel más grande. Se hizo este remuestreo porque estos programas trabajan mejor con pixeles grandes, debido a que calculan la probabilidad de inundación por pixel. Si se simula con pixeles pequeños obtendríamos una simulación con un área muy reducida, y para obtener simulaciones parecidas a los derrames reales se tendrían que exagerar de más los parámetros.

2.4. Procesamiento para identificar los depósitos volcánicos pre-Xitle.

Se reconocieron en el paleo-relieve los depósitos volcánicos pre-Xitle, como los depósitos de avalancha del Ajusco, los lahares del Complejo Volcánico San Miguel, y los derrames de lava de los volcanes monogenéticos pre-Xitle que están cerca del Xitle.

Se identificaron de manera general los derrames de lava de los volcanes pre-Xitle Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinale con el programa SIG ArcGIS de acuerdo con la morfología del paleo-relieve mediante el análisis de rugosidad del terreno y de dirección de pendientes. Se seleccionaron estos volcanes debido a su cercanía con el volcán Xitle.

Los derrames de lava de los volcanes Cuilotepec y Coatzontle se encuentran debajo de las lavas del Xitle, por lo que se hicieron simulaciones generales de sus derrames de lava para identificarlos mejor. Los espesores de los derrames lava de estos

volcanes, medidos en campo, se usaron como parámetros para las simulaciones. En el caso de las longitudes se tomó en cuenta la distancia obtenida del análisis de la morfología que se hizo antes de las simulaciones. La simulación se realizó con el programa Q-LavHA, debido a que el ELFM ya no permitió visualizar los resultados en el programa SIG, debido a problemas con una actualización del sistema operativo, además de que con el programa Q-Lavha se obtuvo una mejor calibración. Las simulaciones de estos volcanes se hicieron de forma puntual, porque no se observan bocas secundarias. Los parámetros usados para la simulación del derrame de lava del volcán Cuilotepec se muestran en la Tabla 2 y los usados para la simulación del derrame de lavas del volcán Coatzontle en la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros usados para la simulación del derrame de lavas del volcán Cuilotepec.

Ubicación de la boca	475298.12, 2130462.783
Espesor de la lava (Hc)	8 m
Longitud del derrame	6,000 m
Corrección topográfica (hp)	10
Número de iteraciones	1500

Tabla 3. Parámetros usados para la simulación del derrame de lavas del volcán Coatzontle.

Ubicación de boca	477661.804, 2127433.796
Espesor de la lava (Hc)	15 m
Longitud del derrame	8,000 m
Corrección topográfica (hp)	18
Número de iteraciones	1500

2.5. Procesamiento para obtener el paleo-drenaje.

Se identificó la distribución y cause de los paleo-canales mediante el estudio de la acumulación y dirección de flujo en el paleo-relieve con el programa ArcGIS. Se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Figura 3:

1. Se remuestreó el DEM con resolución de 10 m a uno con resolución de 30 m, porque con rásters de alta resolución los pixeles son más pequeños y la simulación de la dirección de flujo se visualiza en áreas muy pequeñas.
2. Se procesó el DEM para obtener la Dirección de Flujo (Flow Direction).

3. Se procesó el ráster de Dirección de Flujo para obtener el de Acumulación de Flujo (Flow Accumulation).

4. Se procesó el ráster obtenido de Acumulación de Flujo para obtener el de Orden de Flujo (Stream Order).

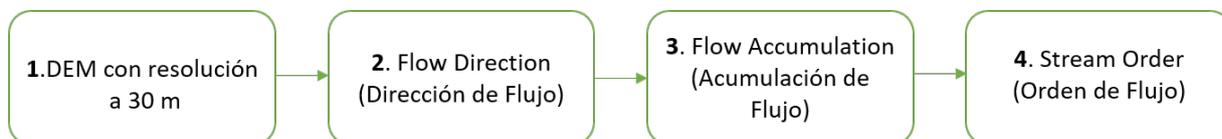


Figura 3. Procesamiento para obtener los paleo-canales en el paleo-drenaje.

Para obtener las trayectorias de los ríos en el paleo-relieve, primero se hizo un análisis de Dirección de Flujo (Flow Direction), que muestra la dirección de flujo de cada celda o pixel según la pendiente más abrupta. Fue necesario hacer este paso porque si el ráster de dirección de flujo de entrada no se crea, existe la posibilidad de que la acumulación de flujo entre en un bucle infinito con lo que no podríamos identificar los cauces de los ríos (Figura 3.) (Esri, 2016)

Se procesó el mapa de Dirección de Flujo, para obtener el mapa de Acumulación de Flujo (Flow Accumulation), que es un ráster del flujo acumulado en cada pixel (Figura 3), que calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todos los pixeles que fluyen en cada pixel de pendiente descendente en el ráster de salida. Los pixeles con una dirección de flujo indefinida solo reciben flujo; no contribuyen a ningún flujo aguas abajo. Los pixeles de salida con una alta acumulación de flujo son áreas de flujo concentrado y pueden usarse para identificar canales de corrientes (Figura 4) (Esri, 2016).

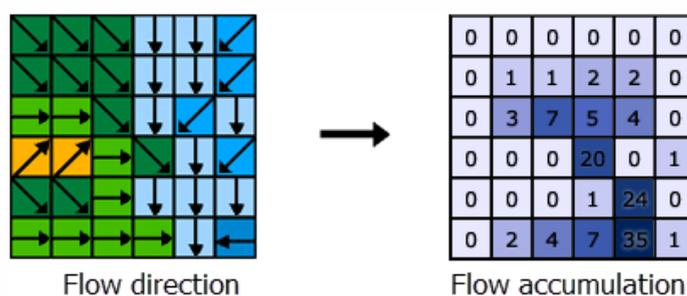


Figura 4. Paso de Dirección de Flujo a Acumulación de Flujo en el programa SIG Arcgis (Esri, 2016).

Posteriormente con los resultados de Dirección de Flujo y Acumulación de Flujo, se obtuvo el mapa de Orden de Flujo. Este proceso asigna un orden numérico a los

segmentos de un ráster que representan las ramas de una red lineal. Se utilizó el método predeterminado de clasificación de arroyos, el método de Strahler (1952; 1957), en el que la clasificación de un arroyo sólo aumenta cuando los arroyos del mismo orden se intersecan. La intersección de un vínculo de primer orden y de segundo orden mantendrá un vínculo de segundo orden, en lugar de crear un vínculo de tercer orden. Los ríos de primer orden son los que no tienen afluentes; los de segundo orden se forman al unirse los de primer orden; los de tercer orden se forman cuando se unen los de segundo orden y así consecutivamente (Figura 3) (Esri, 2016).

2.6. Procesamiento para la simulación de los derrames de lava del volcán Xitle.

Los diferentes derrames de lava reales del volcán Xitle, fueron mapeados de acuerdo con las diferentes morfologías y topografía de la zona, y basado en los trabajos anteriores realizados por Martin Del Pozzo et al. (1997); Delgado et al. (1998), Siebe (2000) y Nieto (2020).

Se simularon los derrames de lava del Xitle sobre el paleo-relieve con el programa probabilístico Q-LavHA, cuyo funcionamiento se describe en el capítulo 2.3. Cada simulación se hizo basada en las características de espesor, longitud y la boca de la que se originó.

Los derrames fueron simulados independientemente con un DEM del paleo-relieve. Se modificó el DEM en cada simulación, haciendo una suma de DEM's en el programa ArcGIS para que el siguiente derrame simulado tomara una trayectoria parecida a la del derrame original de acuerdo a los cambios morfológicos que se fueron produciendo con cada derrame. Estas sumas de DEM's también se remuestrearon a 30 m para los derrames cortos y para los derrames más largos se usaron DEM's remuestrados a 90 m para que tuvieran una dispersión más parecida a la del derrame original sin necesidad de exagerar los parámetros de los derrames de lava reales. Debido a que, como ya se mencionó antes, estos programas trabajan mejor con DEM's de pixeles más grandes para tener una dispersión de la lava más parecida a la realidad.

La boca que originó cada derrame se consideró como una pequeña fisura para que el derrame siguiera una trayectoria parecida a la del derrame de lava original. Los datos en las Tablas 5 y 6 muestran los parámetros usados para cada derrame simulado. En el caso de los parámetros del espesor y la longitud de los derrames se

consideraron además de los observados en campo los datos de trabajos anteriores como los de Martin Del Pozzo et al. (1997); Delgado et al. (1998); Siebe, (2000).

Después de simular cada derrame, Mosseoux et al. (2016) recomienda quitar un 10% de área simulada, correspondiente a los pixeles que tienen la menor probabilidad de inundación por la lava simulada. Se considera que los sitios correspondientes a esos pixeles en la realidad no fueron inundados.

Tabla 5. Parámetros usados para la simulación de los derrames X1, X2, X3, X4 y X5

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>				
Derrame	X1	X2	X3	X4	X5 *tubos de lava
Boca	Xicontle 1. Boca 1	Xicontle 1. Boca 1	Xicontle 2	Cono principal	Boca NO
DEM (ASCII) Del Paleo- relieve	DEM de 10 m remuestreado a 30 m	DEM de 10 m remuestreado a 90 m de la suma del DEM's de los derrames 1 a 4			
Hc: Espesor de la lava (m)	4	3	4	5	6
Hp: Corrección Topográfica	10	10	10	10	10
Máxima longitud de flujo (m)	6000	2000	6000	7000	15000
Tipo de vent (puntual, fisural o área)	Fisural 850 m	Fisural 200 m	Fisural 370 m	Fisural 500 m	Fisural 800 m
Coordenadas E iniciales vent (UTM)	476082	476082	477120	476659	476431
Coordenadas N iniciales vent (UTM)	2127976	2127976	2127987	2128156	2128496
Coordenadas E finales vent (UTM)	475303	476218	477500	477475	476586
Coordenadas N finales vent (UTM)	2128522	2127633	2127976	2128566	2129366
Distancia entre vents (m)	100	100	100	100	100
Número de iteraciones	1500	1500	1500	1500	1500

Tabla 6. Parámetros usados para la simulación de los derrames X6, X7, X8 y X9.

Parámetro	Valor			
	X6	X7	X8	X9
Derrame	X6 *Tubos de lava	X7	X8	X9
Boca	Xicontle 1. Boca 2	Boca SE	Boca N	Boca N
DEM (ASCII) Del Paleo-relieve	DEM de 10 m remuestreado a 90 m de la suma de DEM's de los derrames 1 a 5	DEM de 10 m remuestreado a 90 m de la suma de DEM's de los derrames 1 a 6	DEM de 10 m remuestreado a 90 m de la suma de DEM's de los derrames 1 a 7	DEM de 10 m remuestreado a 90 m de la suma de DEM's de los derrames 1 a 8
Hc: Espesor de la lava (m)	6	3	6	3
Hp: Corrección Topográfica	10	10	10	10
Máxima longitud de flujo (m)	13000	6000	5500	2000
Tipo de vent (puntual, fisural o área)	Fisural 900 m	Fisural 250 m	Fisural 550 m	Fisural 250 m
Coordenadas E iniciales vent (UTM)	476287	476855	476685	476685
Coordenadas N iniciales vent (UTM)	2128177	2127724	2128732	2128732
Coordenadas E finales vent (UTM)	476110	477068	477176	476757
Coordenadas N finales vent (UTM)	2129042	2127537	2129061	2128960
Distancia entre vents (m)	100	100	100	100
Número de iteraciones	1500	1500	1500	1500

Se verificó la trayectoria de las simulaciones de los derrames de lava para conocer qué tan parecidas a la realidad fueron las simulaciones. Se calculó la subestimación, sobreestimación y el positivo verdadero (parte bien simulada) de cada uno de los derrames según las siguientes fórmulas de Mosseoux et al. (2016) (Figura 5). Para usar estas fórmulas primero se calcularon con el programa SIG ArcGIS las áreas de los derrames de lava reales y visibles y de los derrames simulados para cada uno

de los derrames de lava. Cuanto más se acercara a 1 el resultado del positivo verdadero, mejor estaría simulado el derrame.

$$\text{Sobreestimación} = \frac{As - (As \cap Ar)}{As \cup Ar} \qquad \text{Subestimación} = \frac{Ar - (As \cap Ar)}{As \cup Ar}$$
$$\text{Positivo verdadero} = \frac{As \cap Ar}{As \cup Ar}$$

Figura 5. Fórmulas usadas para calcular la sobreestimación, la subestimación y el positivo verdadero de los derrames simulados. As es el área simulada y Ar es el área real.

2.7. Proceso para resaltar el impacto de la erupción del volcán Xitle en el suroeste de la Cuenca de México.

Se da una explicación de cómo los derrames de lava del volcán Xitle modificaron el relieve y el patrón de la red drenaje dejándolo como lo conocemos actualmente.

Se muestran los polígonos de las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran dentro del derrame de lava, se describen las características más importantes de estos lugares. Se muestra y se describe el crecimiento de la mancha urbana cerca de estas áreas desde 1984 hasta 2020, con imágenes Landsat.

3. Resultados

3.1. Resultado del procesamiento digital del DEM para la reconstrucción del paleo-relieve

En Modelo Digital de Elevación (DEM) del relieve actual de la zona del volcán Xitle se destacan las estructuras que no fueron completamente cubiertas por sus derrames de lava, como los volcanes Cuilotepec y Coatzontle, y los montículos (*hummocks*) del volcán Ajusco como el cerro Zacatépetl y el Bosque de Tlalpan, así como la pirámide de Cuiculco (Figura 6).

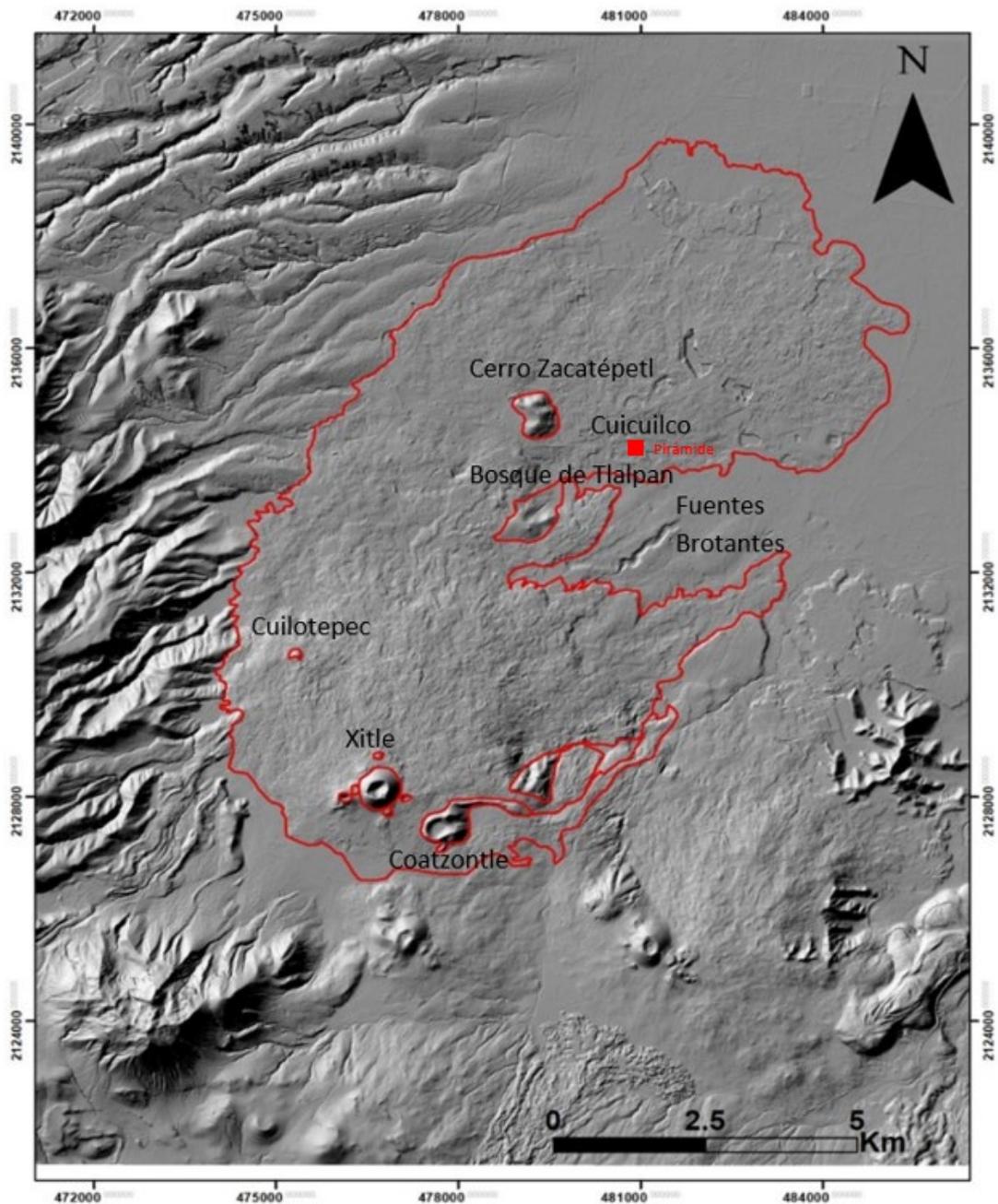


Figura 6. Relieve actual y estructuras antiguas observables entro del derrame de lava del Xitle en rojo se muestra la ubicación de la pirámide de Cuicuilco.

Se muestran las curvas de nivel cada 10 m obtenidas del DEM del relieve actual de la zona de los derrames de lava del volcán Xitle (Figura 7). Estas curvas fueron modificadas para obtener el paleo-relieve.

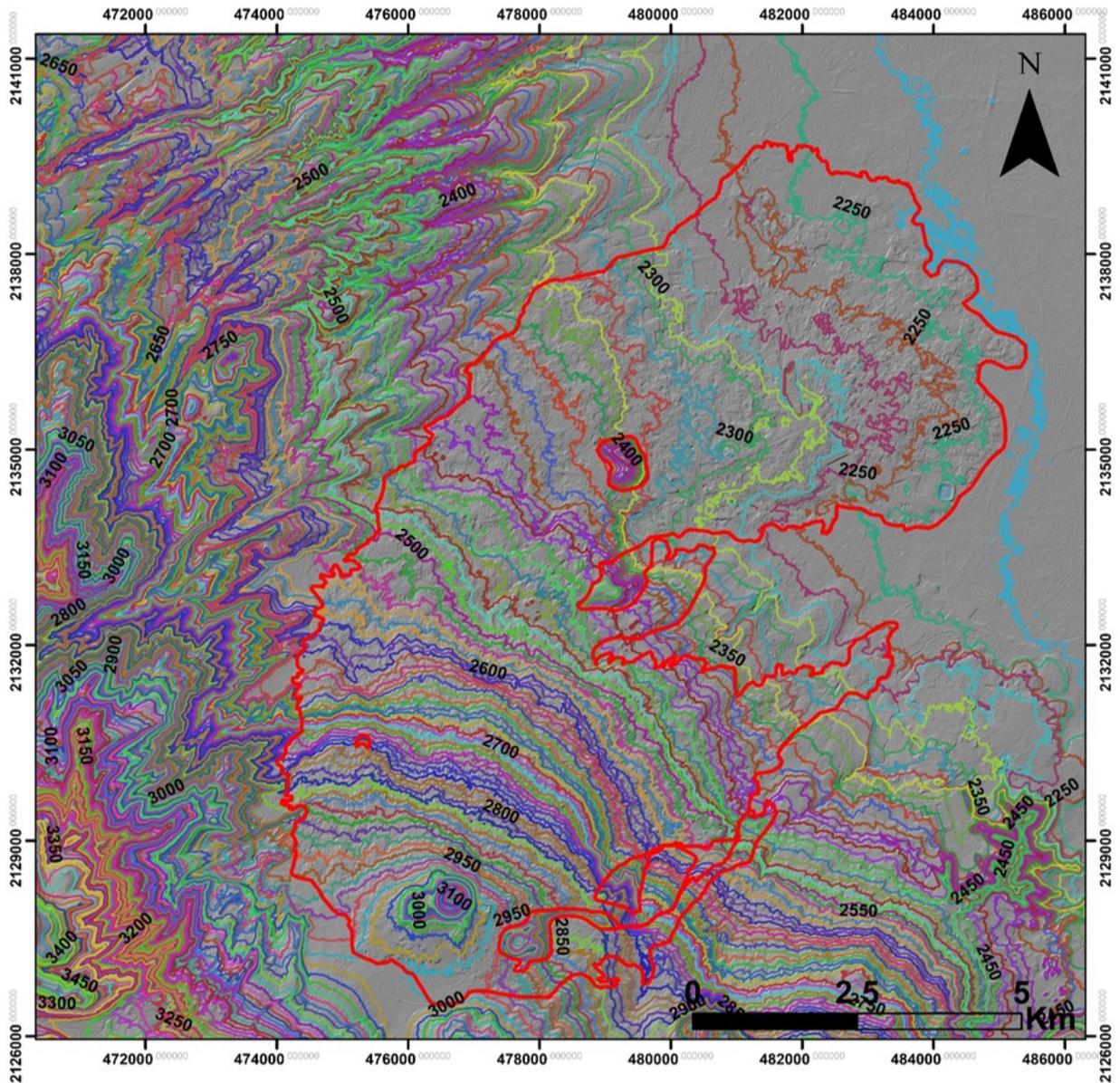


Figura 7. Curvas de nivel cada 10 m del relieve actual de la zona del derrame de lavas del volcán Xitle.

Después de modificar los vértices de cada curva de nivel siguiendo la topografía de las barrancas antiguas, se obtuvieron las nuevas curvas de nivel cada 10 m que pertenecen al paleo-relieve (Figura 8).

Después de modificar cada curva de nivel del relieve actual se obtuvo el nuevo DEM y un mapa de sombras (HillShade) que muestra al paleo-relieve reconstruido (Figura 9).

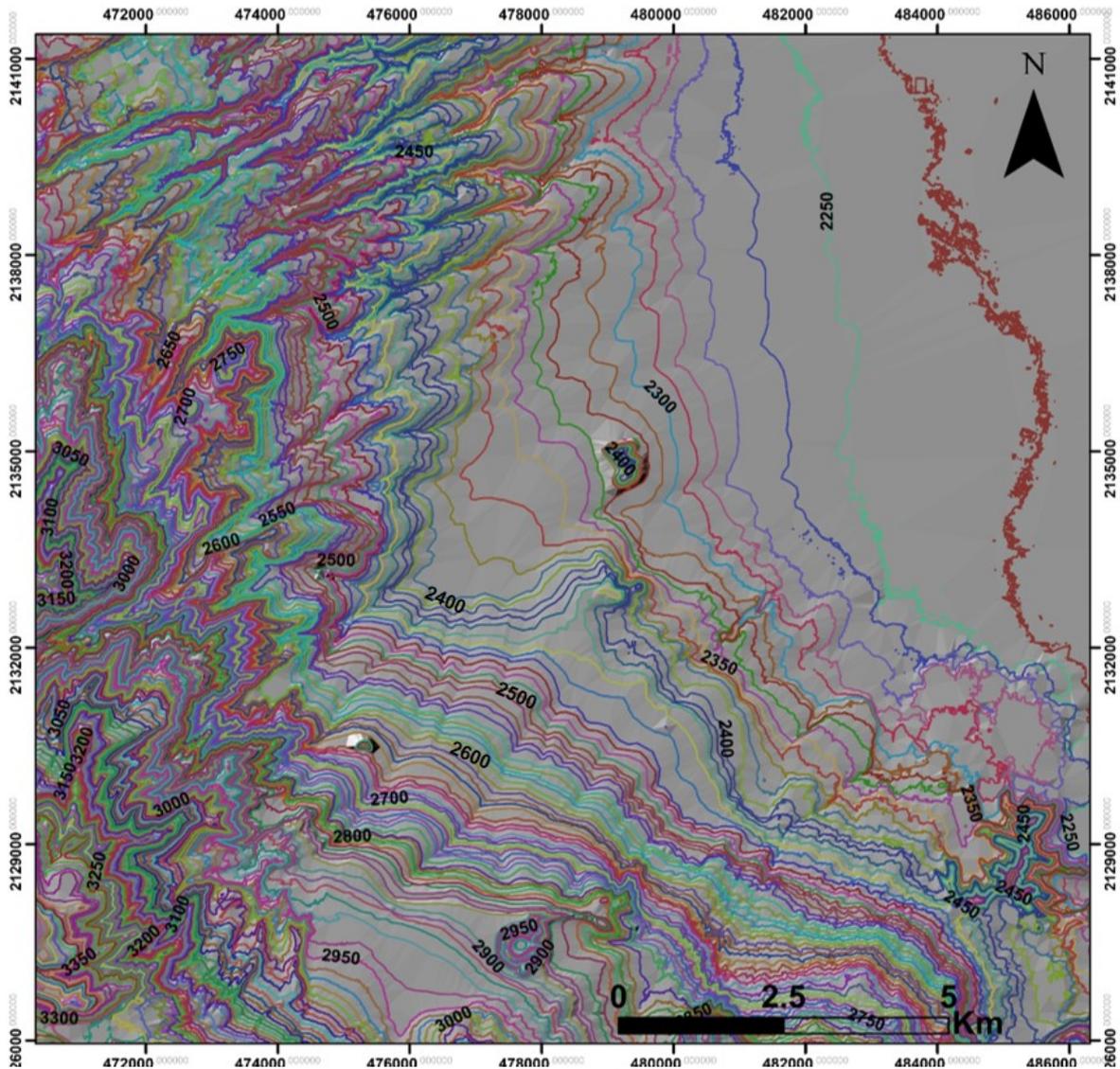


Figura 8. Mapa de las curvas de nivel modificadas para crear el paleo-relieve.

En el mapa de sombras mostrado en la Figura 9 se pueden ver mejor las estructuras pre-Xitle como la avalancha del Ajusco con sus *hummocks*, por ejemplo los llamados Cerro Zacatépelt y Bosque de Tlalpan.

Se observa también la pendiente abrupta hacia el nor-noreste (Figura 8) y los antiguos depósitos de lavas de los volcanes pre-Xitle (Figura 9). Esta pendiente llega a ser de hasta 31° en la parte más alta y de 4° en las partes más bajas.

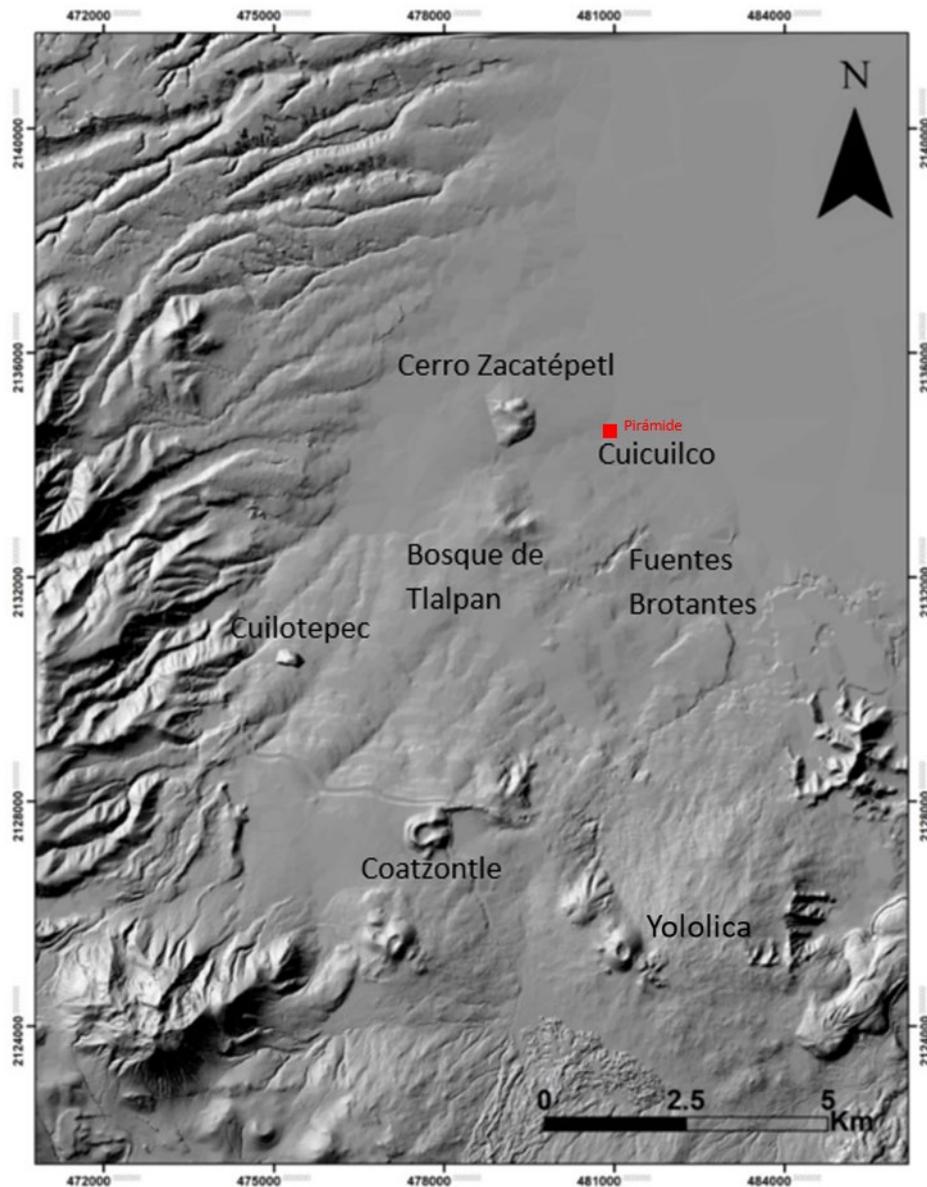


Figura 9. Paleo-relieve reconstruido de la zona sin el volcán Xitle.

Se muestran los resultados de las simulaciones generales del derrame de lava del volcán Xitle con los programas Q-Lavha (Figura 10) y Etna Lava Flow Model (Figura 11).

Se simuló como si todo el derrame de lava hubiera ocurrido al mismo tiempo, por lo que se usaron los valores máximos de la longitud y espesor que se observan en campo. En ambas figuras los colores indican la probabilidad de inundación. En color rojo se muestran los lugares por donde la probabilidad del flujo de la lava simulada fue más alta, mientras que el color verde oscuro indica los lugares donde la probabilidad de flujo de la lava simulada fue menor.

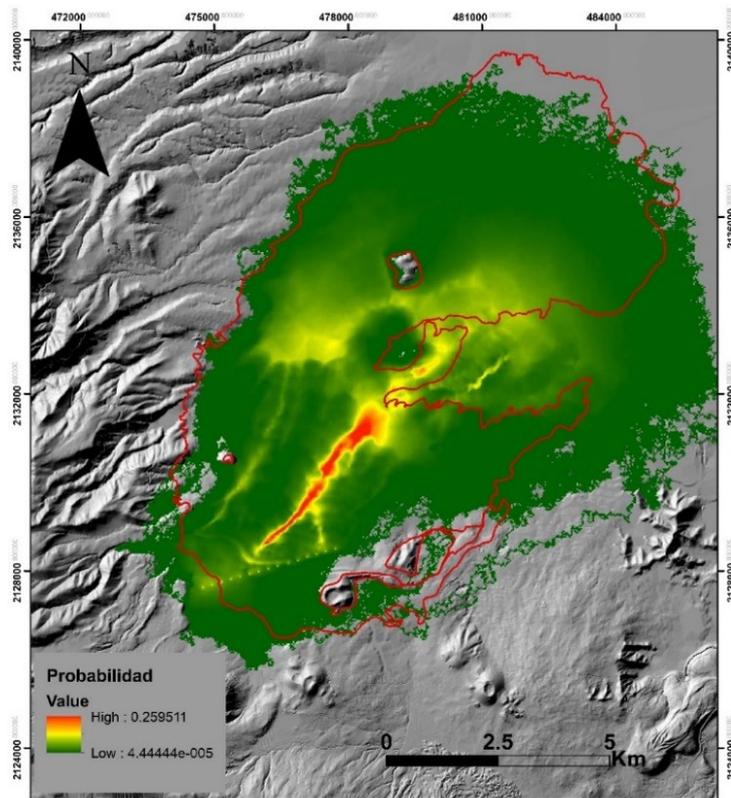


Figura 10. Resultado de la simulación del derrame de lava con el programa Q-Lavha. El color rojo indica el área con más alta probabilidad de inundación por las lavas simuladas y el verde el área con menor probabilidad. El contorno rojo es la distribución cartografiada de las lavas del volcán Xitle.

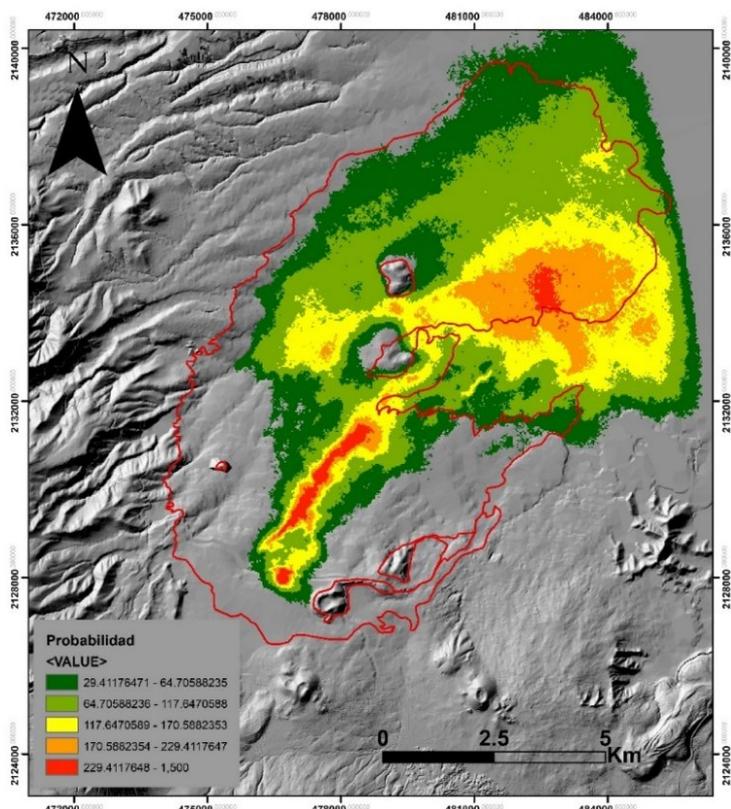


Figura 11. Resultado de la simulación con el programa Etna Lava Flow Model. El color rojo indica el área con más alta probabilidad de inundación por las lavas simuladas y el verde el área con menor probabilidad. El contorno rojo es la distribución real de las lavas del volcán Xitle.

Los derrames generales simulados con los programas Q-LavHA y Etna Lava Flow Model debían seguir una trayectoria igual o similar a la del derrame original del volcán Xitle, para decir que el paleo-relieve fue reconstruido correctamente y para tener una calibración adecuada del programa. Los resultados de las simulaciones que se muestran sí siguen una trayectoria muy parecida a la del derrame original, es decir se dirige en un principio al norte y después al encontrarse con los depósitos del Complejo Volcánico San Miguel gira hacia noreste (Figuras 10 y 11).

En la simulación con el programa Etna Lava Flow Model al inicio el derrame de lava tomó una dirección diferente al del derrame simulado con Q-LavHA y al derrame de lava real, esto sucedió porque la lava simulada con este programa salió de una boca puntual, por lo que la lava simulada tomó dirección al norte solamente por una de las barrancas (Figura 11).

Los valores obtenidos de sobreestimación, subestimación y positivo verdadero de las simulaciones generales del derrame de lava del volcán Xitle hechas con los programas probabilísticos Q-Lavha y ELFM se muestran en la Tabla 7.

Los resultados obtenidos de sobreestimación y subestimación son bajos para la simulación hecha con el programa Q-Lavha, siendo 0.24 y 0.07 respectivamente. El valor del positivo verdadero es de 0.69; estos valores indican que se tiene una buena precisión y la simulación se acerca a la realidad. El resultado obtenido para la simulación con el programa ELFM sigue siendo bajo en el caso de la subestimación, pero en la sobreestimación se obtuvo un valor de 0.56, este se debe a que el derrame simulado al llegar a la parte plana se extendió más al norte y sur que el derrame de lava real. El positivo verdadero es de 0.43, lo que indica que hay un buen ajuste de la simulación con respecto al derrame simulado, sin embargo se ajusta en mucho menor medida en comparación con el resultado obtenido con el programa Q-Lavha. Se considera que la calibración con el programa Q-Lavha es la más adecuada.

Hay diferencias entre el derrame de lavas real del volcán Xitle y los derrames simulados porque los programas Q-LavHA y Etna Lava Flow Model son programas probabilísticos que, además, solo permiten simular un derrame a la vez, y como sabemos el Xitle tuvo varios derrames de lava de diferentes espesores y longitudes. En el capítulo 3.4 se muestran los resultados de las simulaciones en el paleo-relieve de cada uno de los derrames de lava del Xitle.

Tabla 7. Resultados de la sobreestimación, subestimación y el positivo verdadero de la simulación del derrame general del volcán Xitle.

Q-Lavha	Sobreestimación	Subestimación	Positivo Verdadero	Suma
	0.24	0.07	0.69	1
ELFM	Sobreestimación	Subestimación	Positivo Verdadero	Suma
	0.56	0.01	0.43	1

3.2. Depósitos volcánicos pre-Xitle

La reconstrucción del paleo-relieve muestra una serie de depósitos volcánicos como la avalancha del Ajusco, los lahares del Complejo Volcánico San Miguel, y las lavas de este mismo complejo. También se muestran fallas como la que colapsó al volcán Ajusco. Se muestran los flujos de lava de los volcanes monogenéticos pre-Xitle, como el Cuilotepec, Yololica, Coatzontle, Malinale y otras estructuras volcánicas como el domo Magdalena y el cerro Xochitepec. Todos estos depósitos pre-Xitle fueron cubiertos por las lavas del volcán Xitle parcial o completamente y fueron las que en parte moldearon las trayectorias de los derrames de lava (Figura 12).

Los lahares del Complejo Volcánico San Miguel están mapeados de manera muy general, ya que diversos autores, como Romero (2001) han considerado que en esta zona también hay flujos de bloques y ceniza retrabajados. Una parte de estos se encuentran también por debajo de los depósitos de avalancha del Ajusco.

Las fallas marcadas en la parte este del derrame de lava del volcán Coatzontle fueron identificadas según la morfología del derrame. También se muestra una falla en el Ajusco que provocó el colapso en el Complejo Volcánico San Miguel y en el Ajusco (García-Palomo, 2008).

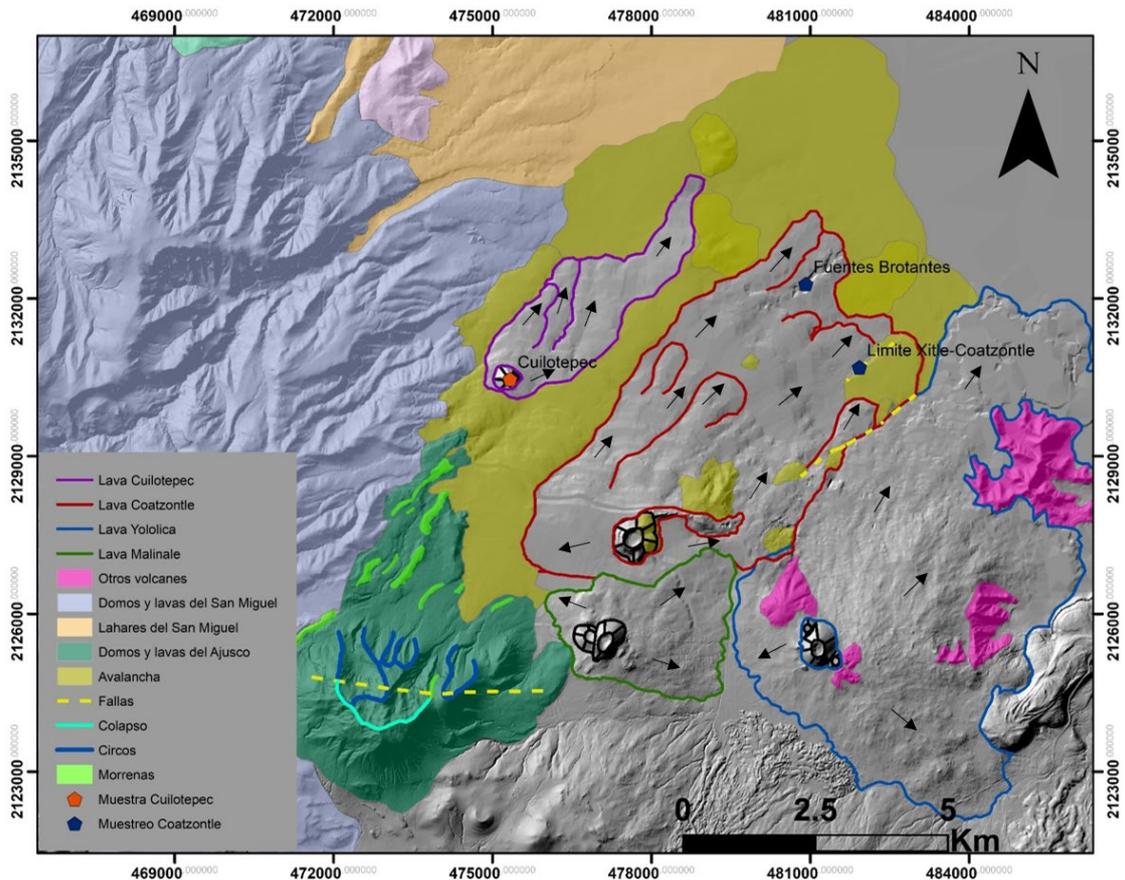


Figura 12. Mapa de los diferentes depósitos y estructuras pre-Xitle en el Paleo-relieve.

3.2.1. Volcán Cuilotepec.

Este es un cono de escorias que fue parcialmente cubierto por las lavas del Xitle, actualmente solo puede observarse parte de su edificio volcánico debido también al crecimiento urbano a sus alrededores, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Volcán Cuilotepec desde Lomas de Cuilotepec, Tlalpan, CDMX. (Fotografía de Amiel Nieto Torres).

El análisis macroscópico de una muestra del cono de este volcán mostró que se trata de un material muy vesicular (escoria) de color rojizo. En el análisis de granulometría se obtuvo que predomina el tamaño que va de -5 phi a -1 phi (0.5 a 32 mm) (Figura 14) el cuál se encuentra dentro del rango del tamaño lapilli. Las características de estos materiales se relacionan con la actividad volcánica de tipo estromboliana, ya que esta produce material que es relativamente de grano grueso y que tiene un rango restringido de tamaños de grano, usualmente entre -5 phi y 4 phi (32 mm a 0.063 mm) (Walker y Croasdale, 1971; Walker, 1973).

Este tipo de erupción se caracteriza por ser débilmente explosiva. Expulsa abundante material principalmente escoriáceo de tamaño lapilli, que se acumula alrededor del centro de emisión y forma un cono de escoria. Estas erupciones están a menudo acompañadas de la efusión simultánea de lava.

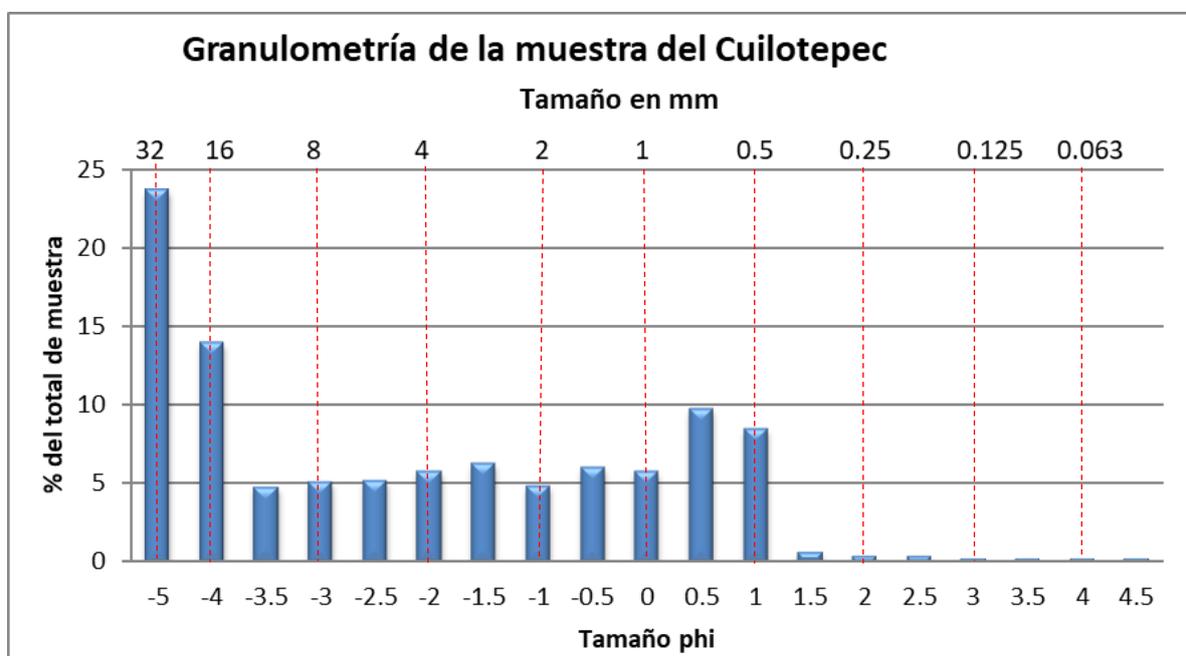


Figura 14. Gráfica del estudio de granulometría de la muestra del cráter del Volcán Cuilotepec.

La Figura 15 muestra en color morado la posible distribución de los derrames de lava del volcán Cuilotepec. Esta distribución fue hecha a partir de la morfología del terreno del paleo-relieve, con un análisis de rugosidad del terreno y de dirección de pendientes.

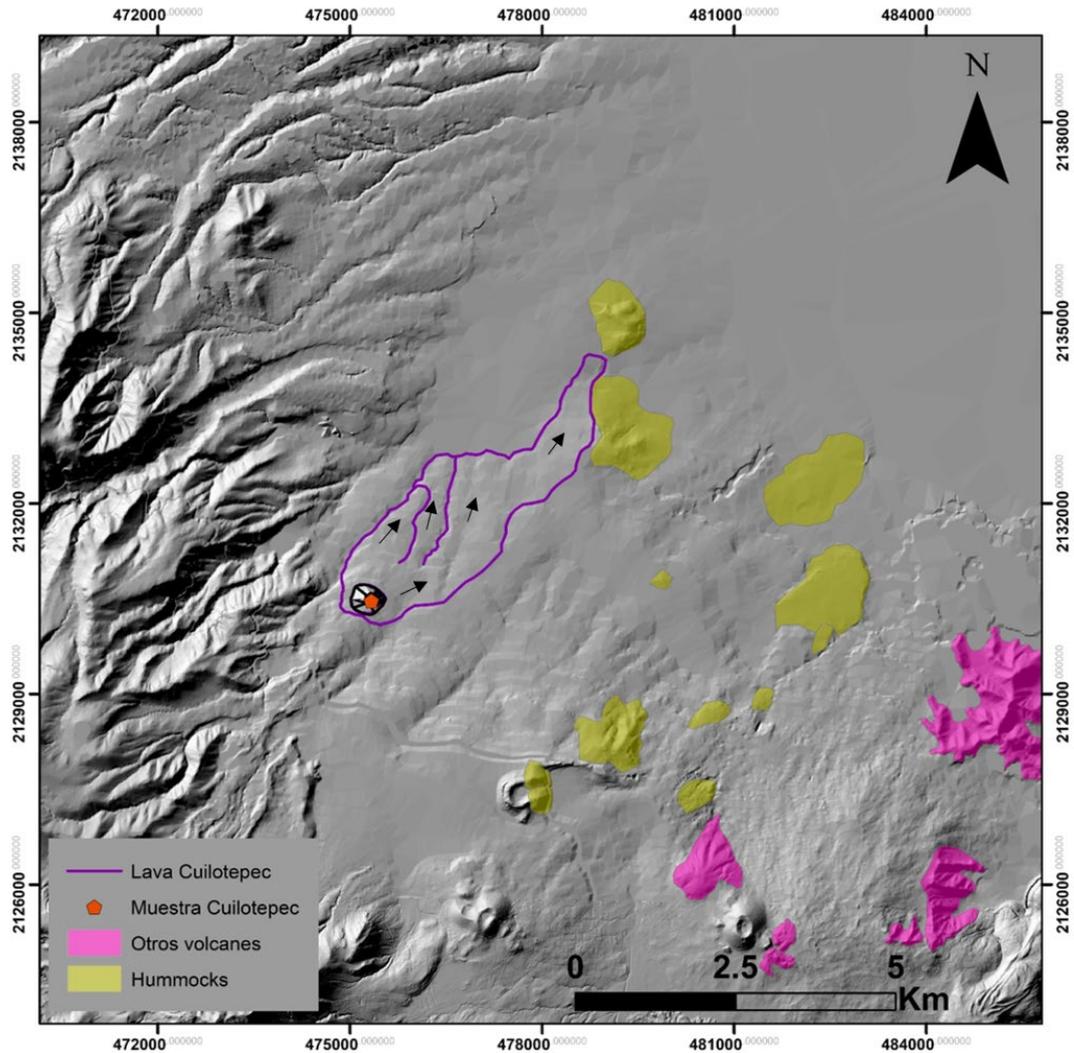


Figura 15. En morado se muestra la distribución del derrame de lavas del volcán Cuilotepec según la morfología del relieve, en amarillo los hummocks y con el punto naranja el sitio de donde se sacó la muestra. Las flechas indican la dirección que tomó la lava.

En el resultado obtenido de la simulación del derrame de lava de este volcán la lava sigue principalmente la trayectoria de las barrancas de los lahares del Complejo Volcánico San Miguel y de la avalancha del Ajusco, y al llegar a la parte de menor pendiente se dispersa por los canales que hay entre los *hummocks* llamados Cerro Zacatépetl y Bosque de Tlalpan. Se muestran en los colores más oscuros las áreas en las que la probabilidad de inundación por lava fue mayor y los colores claros señalan las zonas que tienen la probabilidad más baja de inundación por lava, estos valores oscilan entre 0.00059 y 0.4612 (Figura 16).

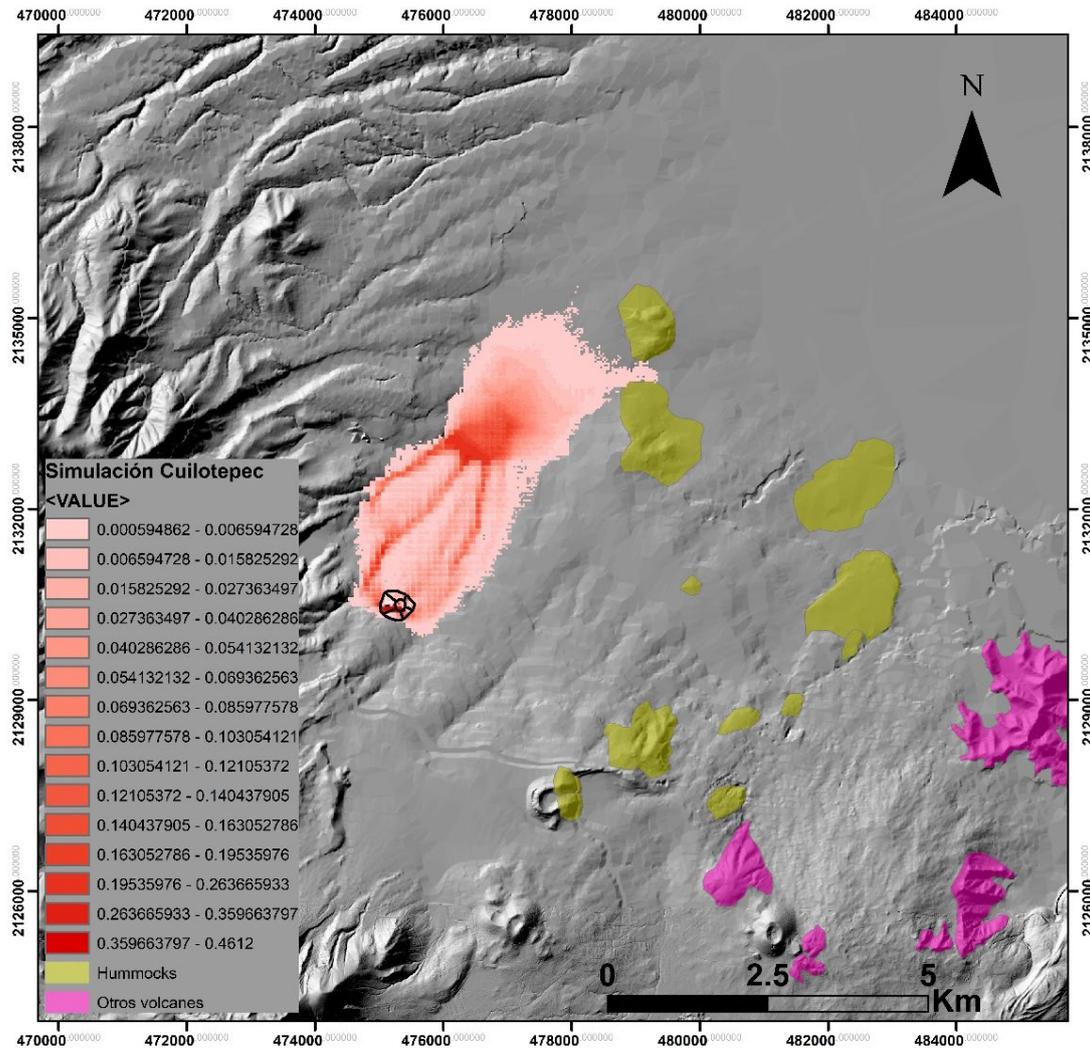


Figura 16. Este mapa muestra el derrame simulado del Cuilotepec que fue muy parecido al derrame que se dibujó en el mapa anterior solamente viendo la morfología de la zona. La leyenda muestra los valores de probabilidad de inundación.

Tanto la simulación como el polígono trazado con la morfología del paleo-relieve siguen una trayectoria parecida, por lo que es probable que el derrame real haya seguido este mismo camino. Según la simulación, sus lavas alcanzaron una distancia de 5.7 km y un cubrieron un área de 11.83 km².

3.2.2. Volcán Coatzontle

La posible distribución de los derrames de lava del volcán Coatzontle hecha a partir de la morfología del terreno se muestra en color rojo. Este mapa mediante un análisis de rugosidad del terreno y de dirección de pendientes (Figura 17).

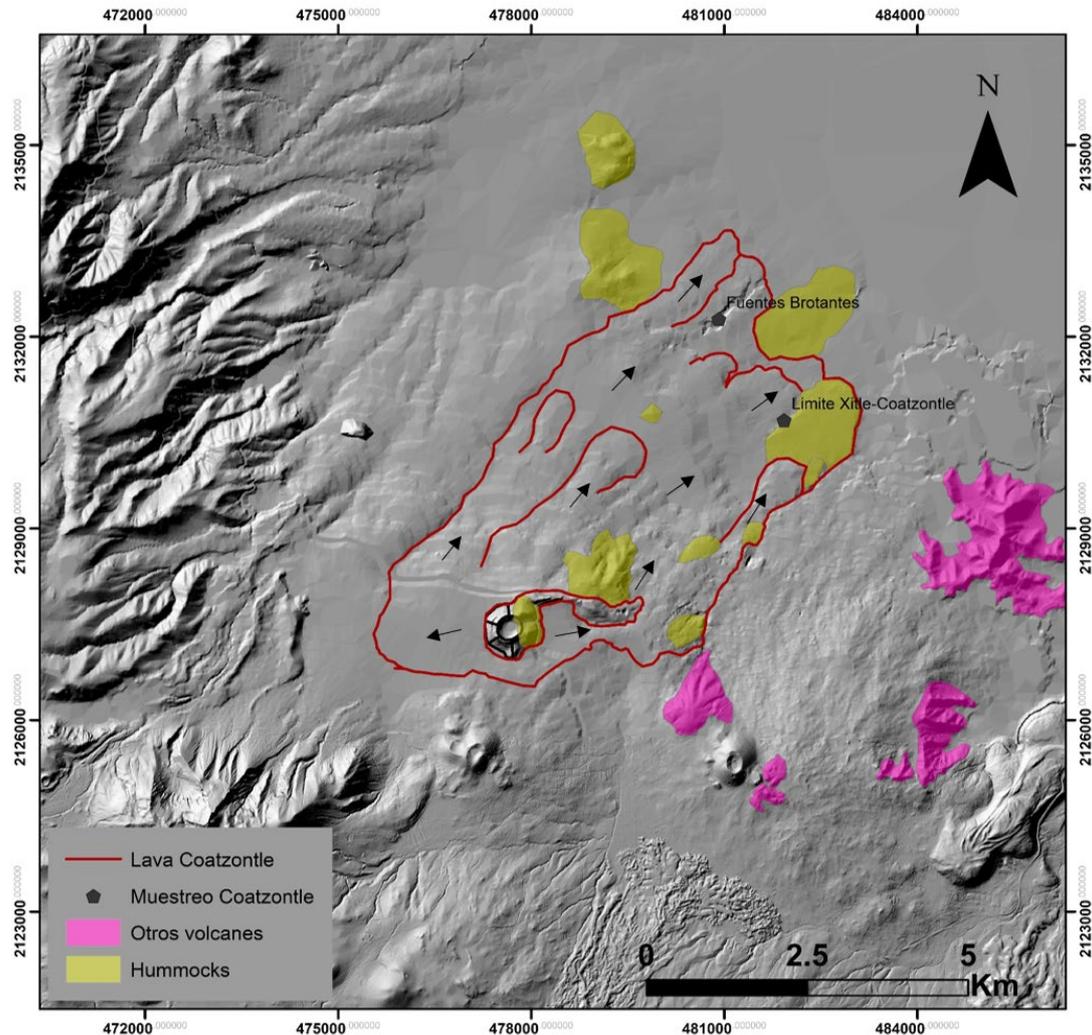


Figura 17. En rojo se muestra el derrame de lava del Volcán Coatzontle trazado a partir de la morfología del relieve. Los puntos grises indican los sitios en donde se tomaron las muestras de lava. Las flechas indican la dirección que tomó la lava.

Una vez obtenido este mapa se procedió a hacer la simulación del derrame de lava del volcán Coatzontle con el programa Q-LavHA. Se consideró el espesor de la lava que se observa en el Parque Nacional Fuentes Brotantes, ya que por su cercanía parece que las lavas que se observan en este lugar pertenecen al Coatzontle y para la longitud del derrame se consideró la distancia que hay del cono al Parque Nacional Fuentes Brotantes. La zona con la probabilidad de inundación más alta es la que se muestra en tonos rojos más fuertes y la zona que presenta el color más claro representa las áreas que tienen la menor probabilidad de inundación, estos valores oscilan entre 1 y 0.00066 (Figura 18). Según la simulación, sus lavas tuvieron un alcance de 7.2 km y cubrieron un área de 40.06 km².

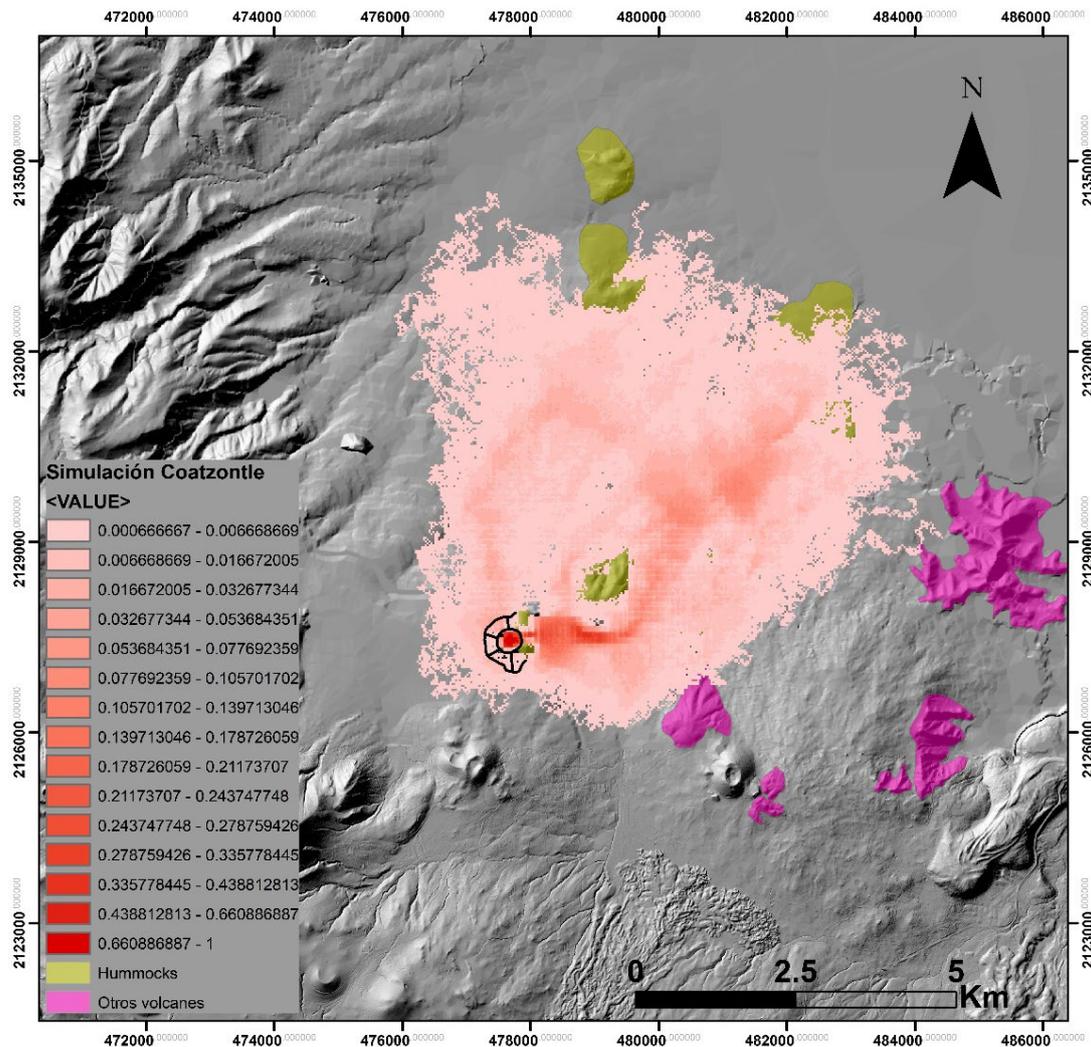


Figura 18. Este mapa muestra que el derrame simulado del Coatzontle fue muy parecido al derrame que se dibujó en el mapa anterior. La leyenda muestra los valores de probabilidad de inundación.

Tanto la simulación como el polígono trazado con la morfología del paleo-relieve siguen una trayectoria parecida, por lo que es probable que el derrame real haya seguido este mismo camino.

Cerca del cono de este volcán se observan dos *hummocks*, que por la posición en la que se encuentran pertenecen al volcán Ajusco. Hay también un derrame de lava de este volcán al NE del cono tiene un espesor de 20 m del cual se obtuvo la muestra (C1) descrita en la Tabla 8. Los sitios de donde se tomaron las muestras se señalan en la Figura 17.

Las muestras recolectadas en este Parque Nacional son de color gris medio, aunque hubo una que tiene un color rosa/rojizo. Las tres muestras colectadas tienen características parecidas, estas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción de la muestra colectada por Jaimes-Viera, 2018 y de las muestras colectadas en el Parque Nacional Fuentes Brotantes.

Muestra	Color	Textura	Minerales	Estructuras	Observaciones
C1	Rosa	Afanítica	Cristales de piroxenos de hasta 3 mm		
FB1	Rosa/rojizo	Afanítica	Cristales de plagioclasa de hasta 3 mm anhedrales, piroxenos subhedrales pequeños y muy pocos anfíboles pequeños.	Masivo, sin vesículas	Fue colectada del único afloramiento en el que observamos roca de este color. El afloramiento medía unos 2 metros de ancho.
FB2	Gris medio	Afanítica	Cristales de plagioclasa de hasta 4 mm anhedrales, muy pocos piroxenos subhedrales. Varios cristales muy pequeños de olivino.	Masivo, sin vesículas	
FB3	Gris claro/medio	Afanítica	Pocos cristales de plagioclasa de hasta 9 mm, muy pocos piroxenos subhedrales de hasta 2 mm y muy pocos cristales pequeños de anfíboles	Masivo, sin vesículas	Tiene 3 xenolitos. El más grande mide 3.4 cm y el más pequeño 5 mm. Estos tienen pequeños cristales de plagioclasa, anfíboles y algunos piroxenos.
COA1	Gris oscuro	Afanítica	Plagioclasas subhedrales de hasta 3 mm y piroxenos euhedrales de hasta 4 mm	Masivo, sin vesículas	Son muy pocos cristales. El afloramiento está muy intemperizado.

De acuerdo con las características mostradas en la Tabla 5, lavas presentes en el Parque Nacional Fuentes Brotantes son andesíticas.

Se tomó otra muestra en el límite actual de las lavas del Xitle y las lavas del volcán Coatzontle (muestra COA1) (Figura 17). El afloramiento mide ~5 m, debajo de estas lavas en bloque se observan materiales retrabajados. La mineralogía de esta

muestra es diferente a las muestras que se tomaron en Fuentes Brotantes, esto se debe a que pueden pertenecer a diferentes derrames, que aunque son del mismo volcán, tienen características diferentes. Las lavas de este volcán son de tipo andesíticas, con un contenido de sílice de 62.18% (Jaimes-Viera, 2018).

3.2.3. Volcán Yololica

Las lavas de este volcán colindan con las del volcán Catzontle en el paleo-relieve reconstruido y con las del volcán Xitle en el relieve actual (Figura 19). Estas lavas se identificaron las lavas de este volcán de acuerdo a la morfología del relieve actual.

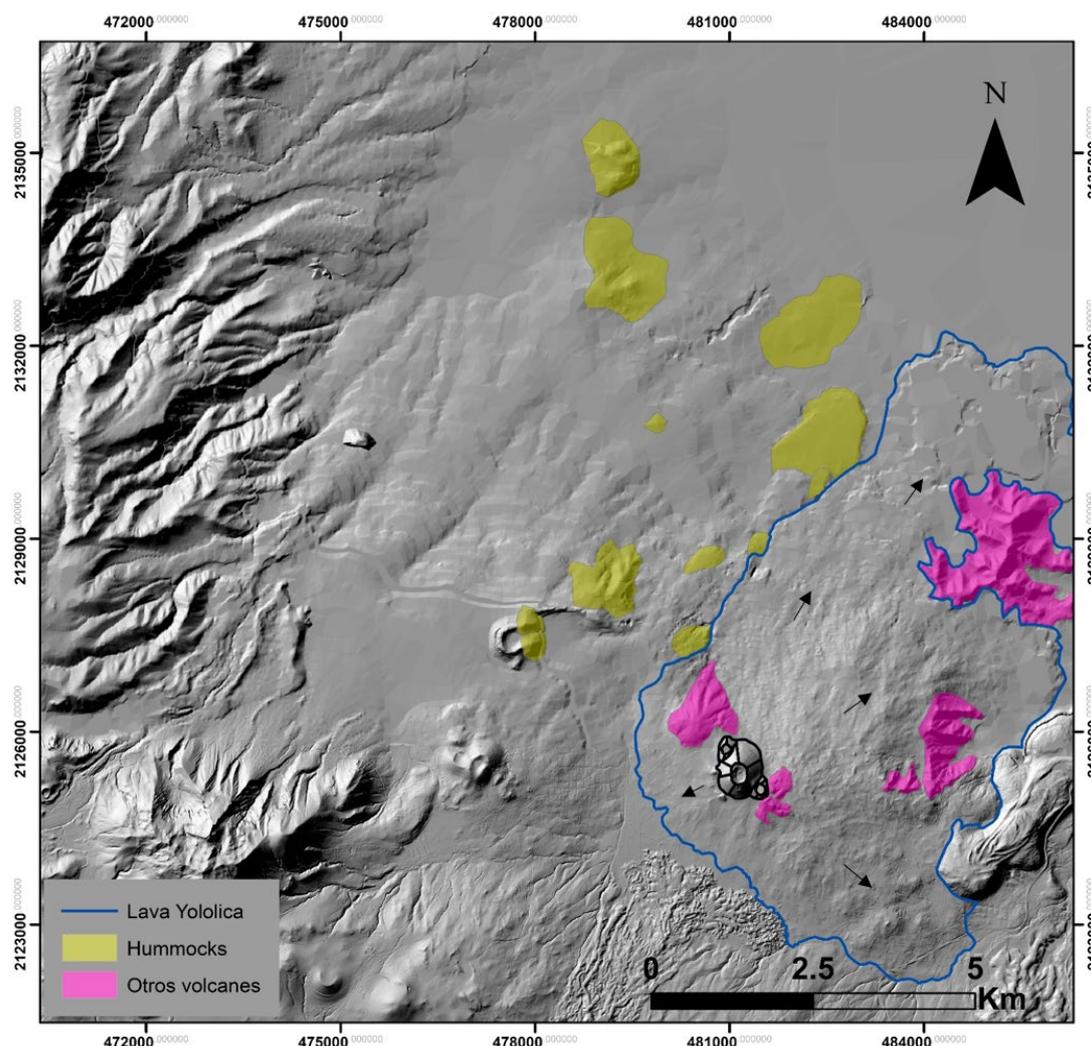


Figura 19. En azul se muestra el derrame de lava del volcán Yololica. Las flechas indican la dirección que tomó la lava.

Las lavas de este volcán fueron fluidas de tipo andesita basáltica, contienen algo de olivino, piroxeno, labradorita y titanomagnetita (Martin Del Pozzo, 1990).

3.2.4. Volcán Malinal

Parte de los depósitos de este volcán se encuentran enterrados por las lavas y ceniza de volcanes que parecen ser más jóvenes, por ejemplo el volcán Yololica.

Se mapeó el derrame de lava de este volcán según la morfología del paleo-relieve, y su morfología sugiere que sus lavas son andesíticas (Figura 20).

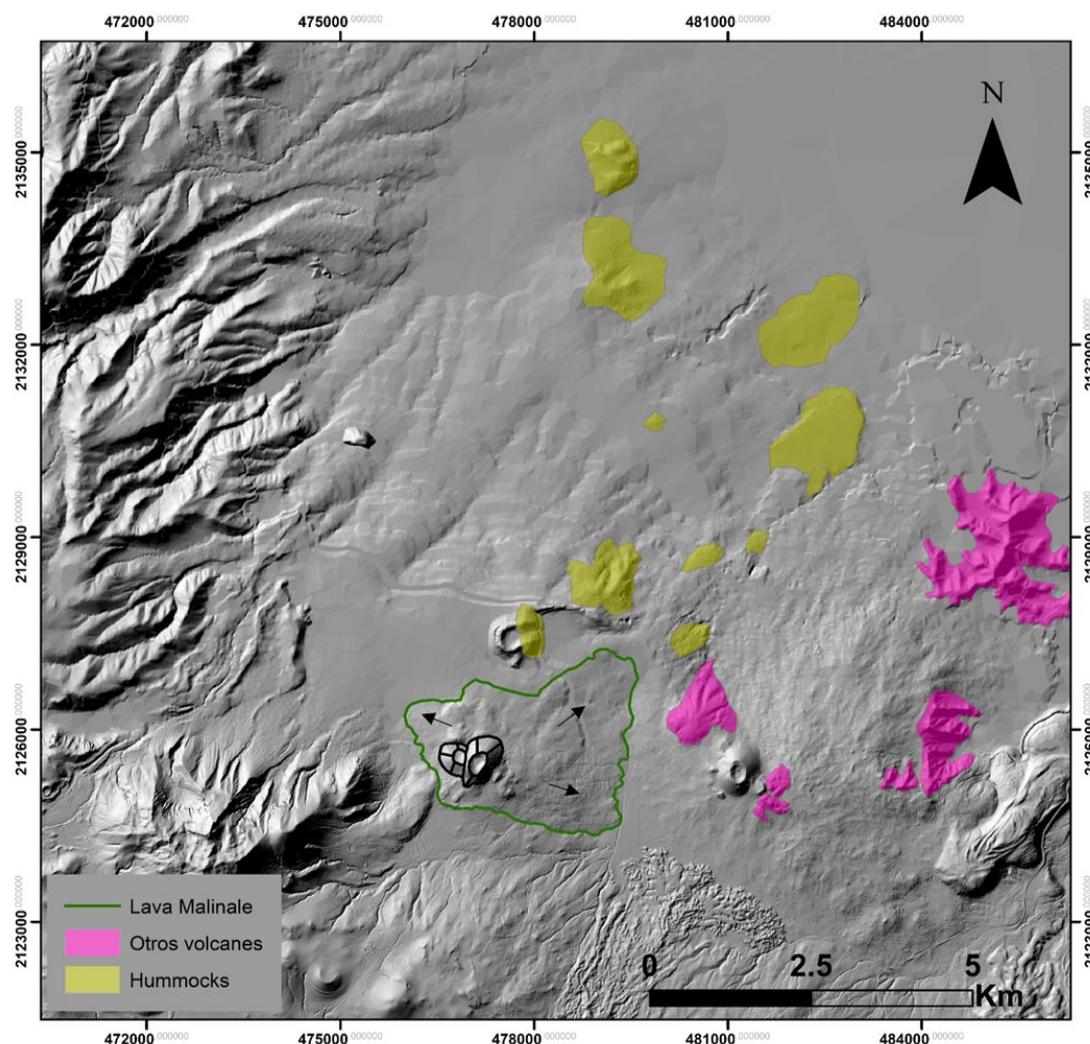


Figura 20. En verde se muestra el derrame de lava del volcán Malinale. Las flechas indican la dirección de la lava

3.3. Análisis del paleo-drenaje

La reconstrucción de los paleo-canales hecha sobre el paleo-relieve mediante el estudio de la acumulación y dirección de flujo, muestra que antes de la erupción del volcán Xitle la zona tenía una compleja red de drenaje. Sus aguas escurrían por las abruptas pendientes de la Sierra de las Cruces, principalmente del Complejo Volcánico San Miguel y del volcán Ajusco, pero también llevaba agua de los escurrimientos que viajaban por los derrames de lava de los volcanes Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinale.

Todos los paleo-canales desembocaban en el antiguo Lago de Xochimilco (Figura 21).

El paleo-canal El Rosal tenía varios ríos tributarios que provenían de la Sierra de las Cruces, principalmente del Complejo volcánico San Miguel y fluía hacia el noreste llegando hasta el Lago de Xochimilco.

El agua del paleo-canal Magdalena provenía de escurrimientos del Ajusco, que corrían también por las lavas del volcán Cuilotepec, y de los escurrimientos del Complejo Volcánico San Miguel. Corría hacia el noreste y antes de llegar al Lago de Xochimilco también recibía aguas del Cerro Zacatépetl.

El paleo-canal Cuicuilco se originaba de los escurrimientos del volcán Ajusco pasando entre el Cerro Zacatépetl y la ciudad de Cuicuilco llegando finalmente al Lago de Xochimilco. El agua del paleo-canal Peña Pobre provenía de los escurrimientos de los depósitos del Ajusco, así como del volcán Coatzontle, estos dos paleo-canales tienen una especial importancia, ya que al haber pasado cerca de la ciudad de Cuicuilco es probable que sus habitantes hicieran uso de las aguas de estos ríos.

En el caso del paleo-canal Fuentes Brotantes, sus aguas provenían de los escurrimientos que viajaban por las lavas del volcán Coatzontle.

Había también otros paleo-canales que escurrían por las lavas del volcán Yololica y otros cuyas aguas provenían del Complejo Volcánico San Miguel. Estos también desembocaban en el antiguo Lago de Xochimilco.

Como ya se mencionó antes, los canales principales se forman por el escurrimiento de varios canales más pequeños. El análisis del orden de flujo de los paleo-canales reconstruidos indica que los ríos principales son de orden 7 (los marcados en color más oscuro) y los afluentes son de hasta orden 4 (los marcados en color azul más claro). (Figura 22).

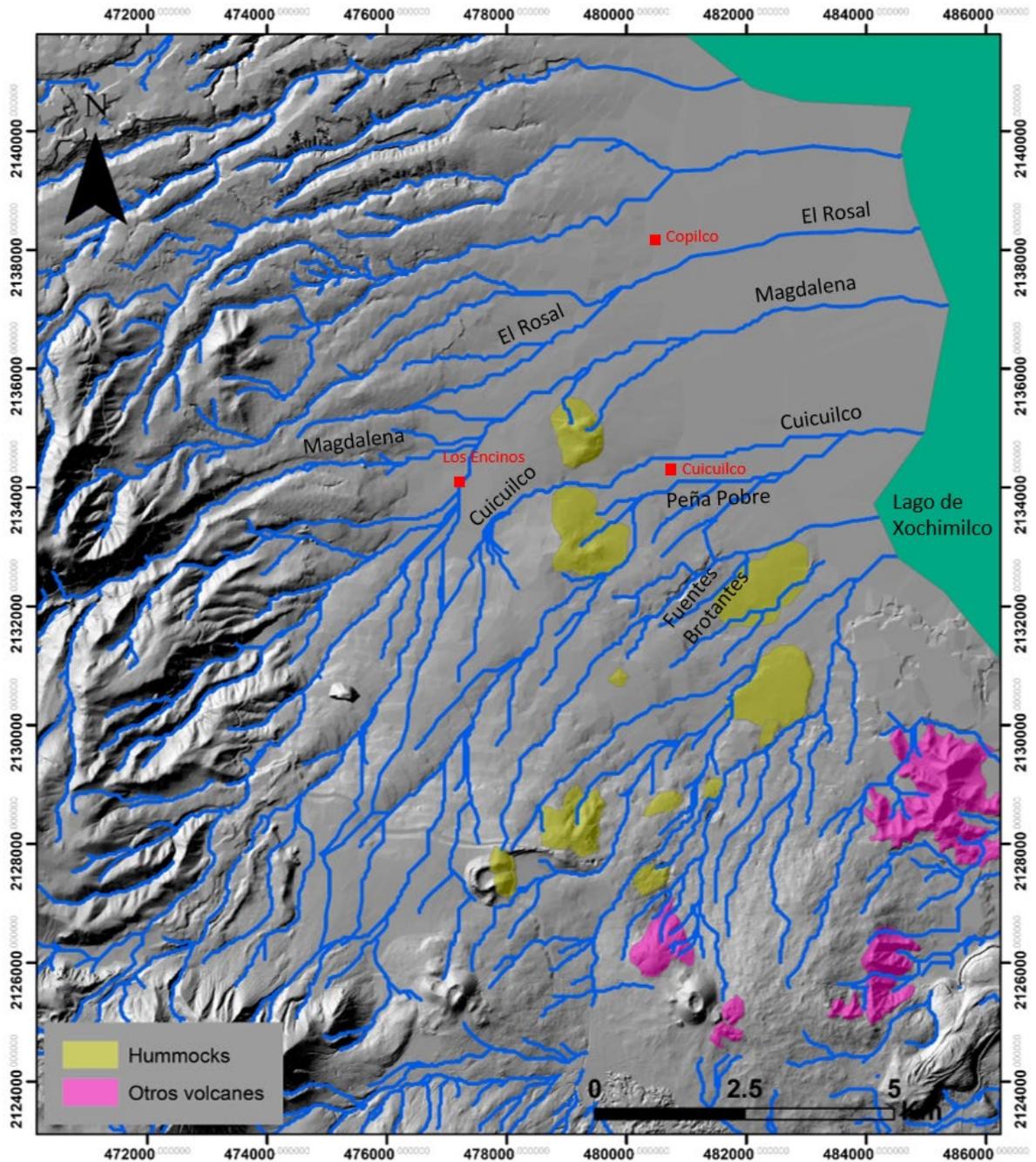


Figura 21. En este mapa de Acumulación de Flujo se muestra la configuración del paleo-drenaje que existía en el paleo-relieve. Los puntos rojos son sitios actuales para facilitar la ubicación de los paleo-canales.

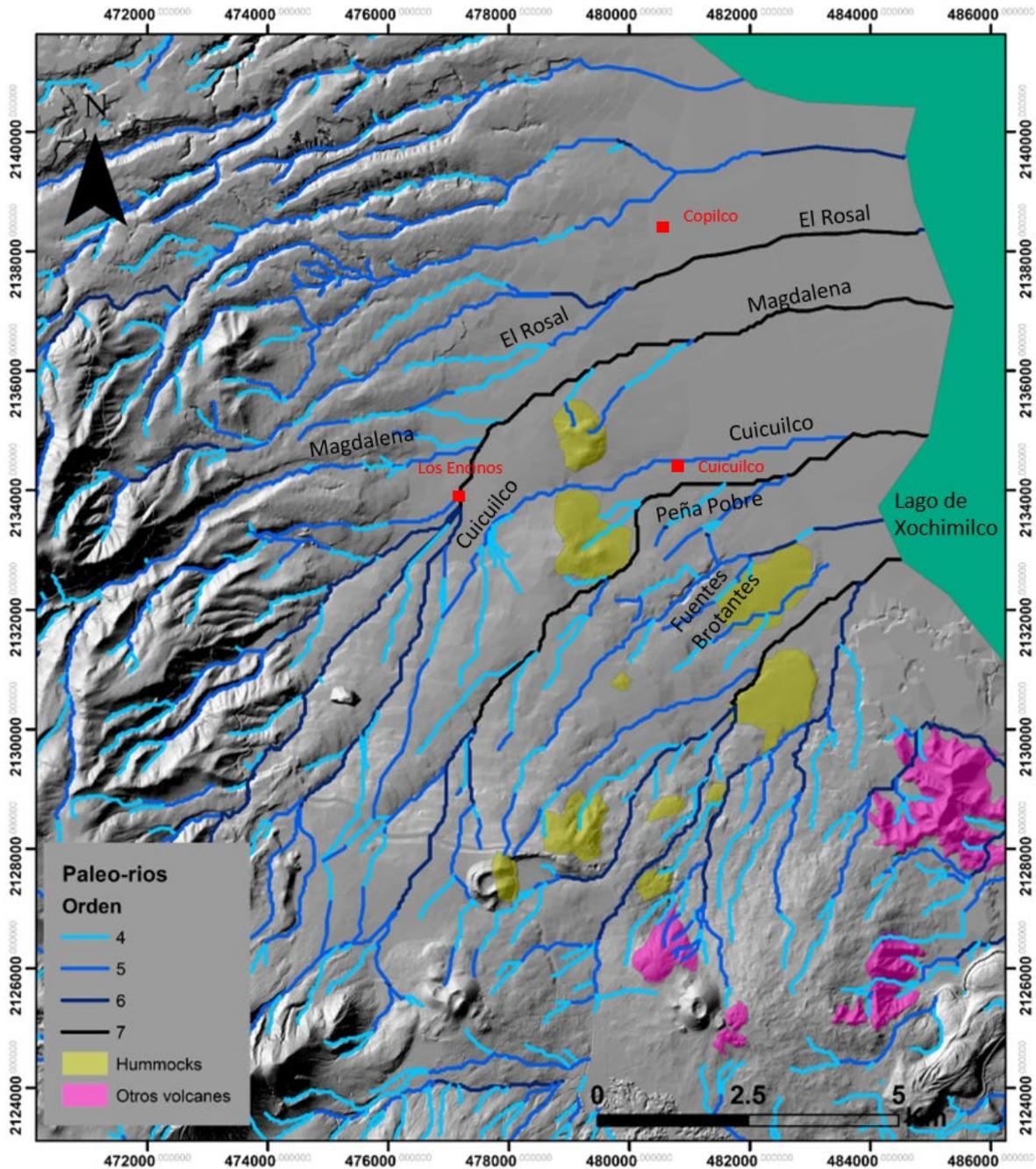


Figura 22. Mapa del orden de los paleo-canales, se señalan en rojo sitios actuales para mejorar la ubicación en el mapa.

Las Figuras 21 a 23 muestran la ubicación de sitio Los Encinos, este lugar se caracteriza por tener grandes tubos de lava, y como se muestra en las figuras en este lugar existía la unión de varios afluentes de agua provenientes del Ajusco y del Complejo Volcánico San Miguel para formar el paleo-canal Magdalena.

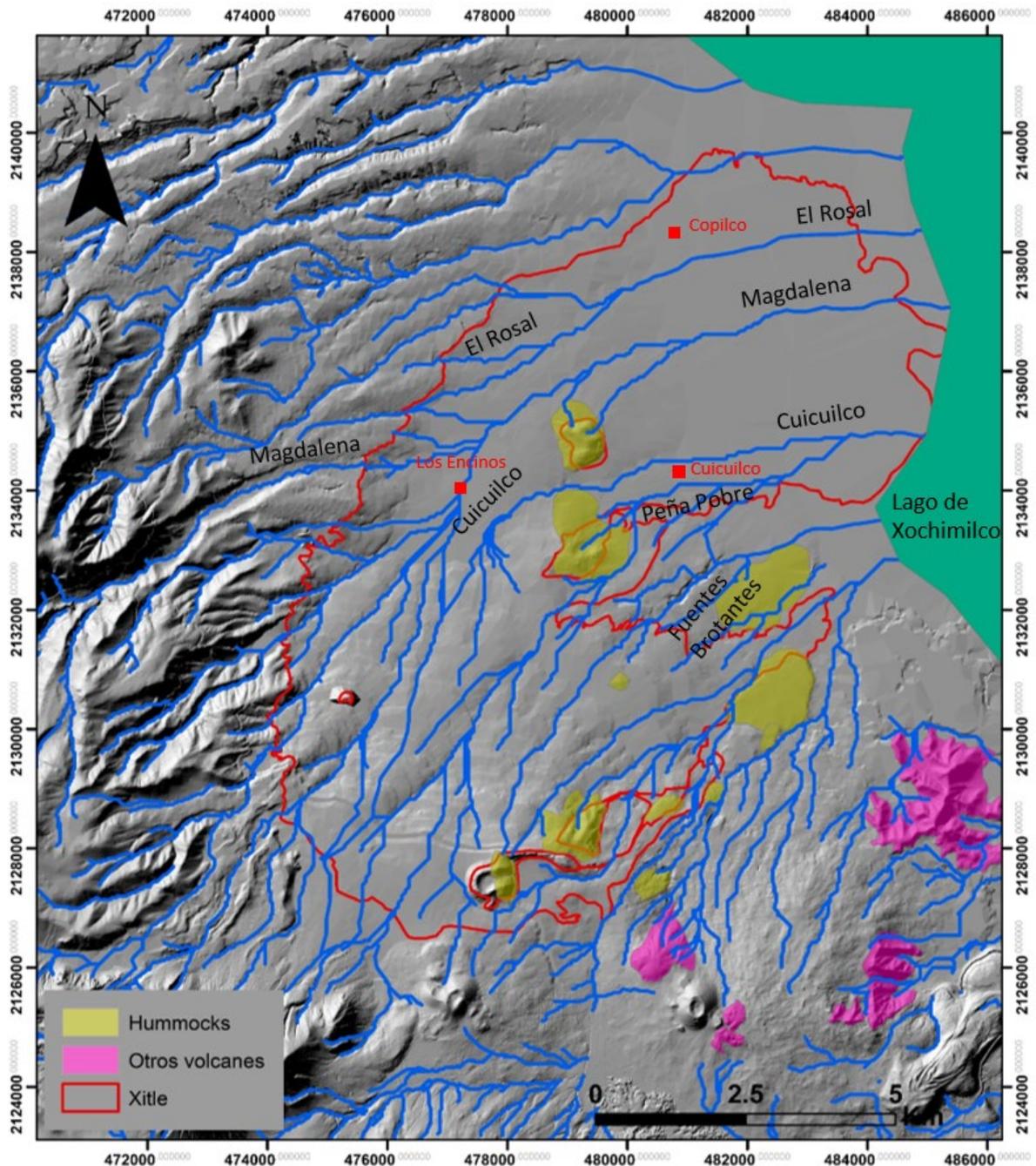


Figura 23. Mapa del paleo-drenaje y el contorno del derrame de lavas del volcán Xitle.

Después de la erupción del volcán Xitle los ríos fueron represados cambiando sus trayectorias y algunos de ellos desaparecieron por completo. La Figura 23 ofrece una visión de la posición de los derrames de lava del Xitle después de su erupción sobre los paleo-canales.

3.4. Simulación de los derrames de lava del volcán Xitle

La reconstrucción de la parte efusiva de la erupción del volcán Xitle se llevó a cabo sobre paleo-relieve mediante la simulación de cada derrame de lava con el programa Q-LavHA. Se usaron diferentes parámetros de espesor y longitud según las observaciones de campo y los estudios previos.

Los derrames de lava se emitieron desde bocas distintas. Las bocas principales son el cono del volcán Xitle, el Xicontle 1 y el Xicontle 2. Estas tres bocas se encuentran alineadas casi este/oeste, lo que indica la orientación de la fisura que dio origen a este volcán. Al norte y sur de esta fisura nacieron otras bocas secundarias por las que también se emitió lava (Figura 24).

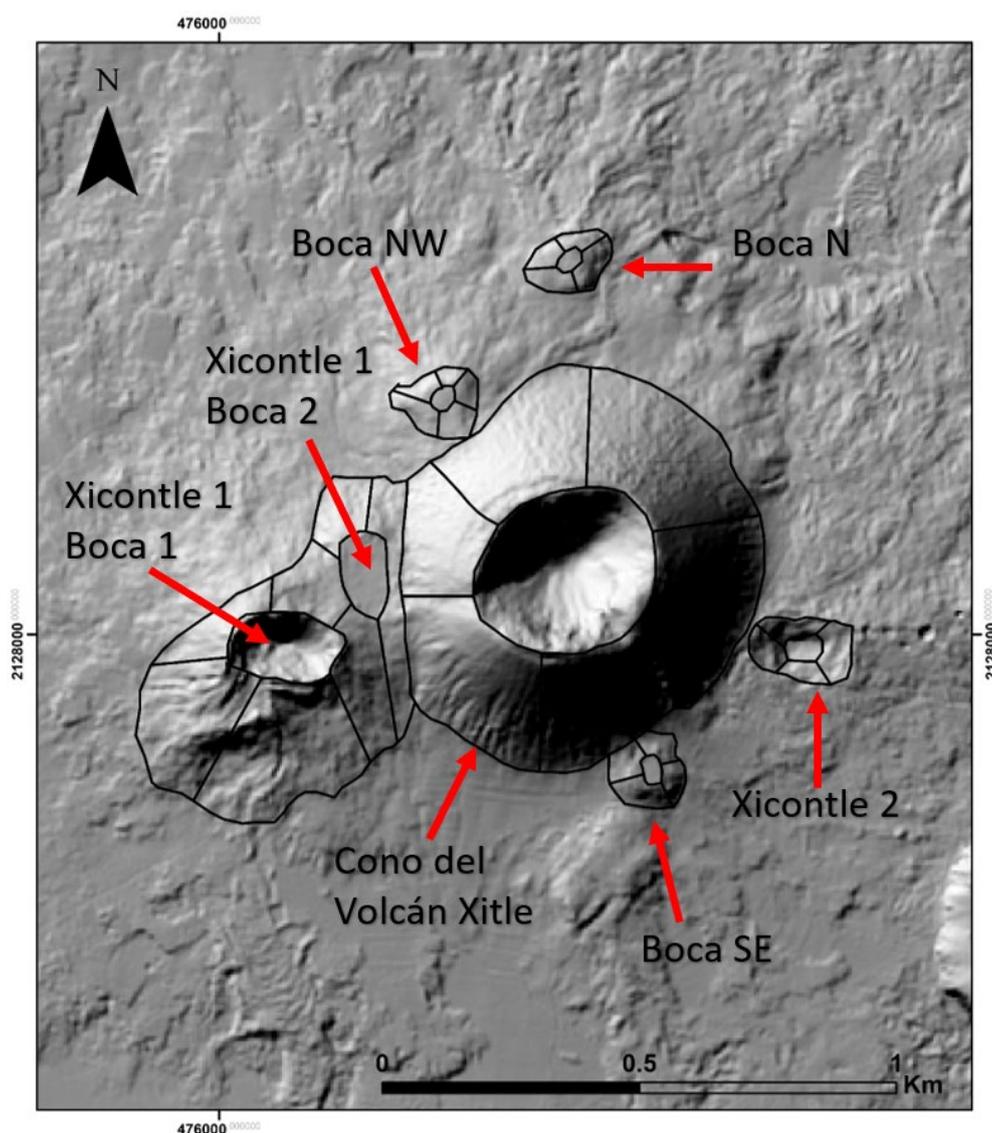


Figura 24. Bocas del Volcán Xitle.

El mapeo de los diferentes derrames del volcán Xitle se muestra en la Figura 25.

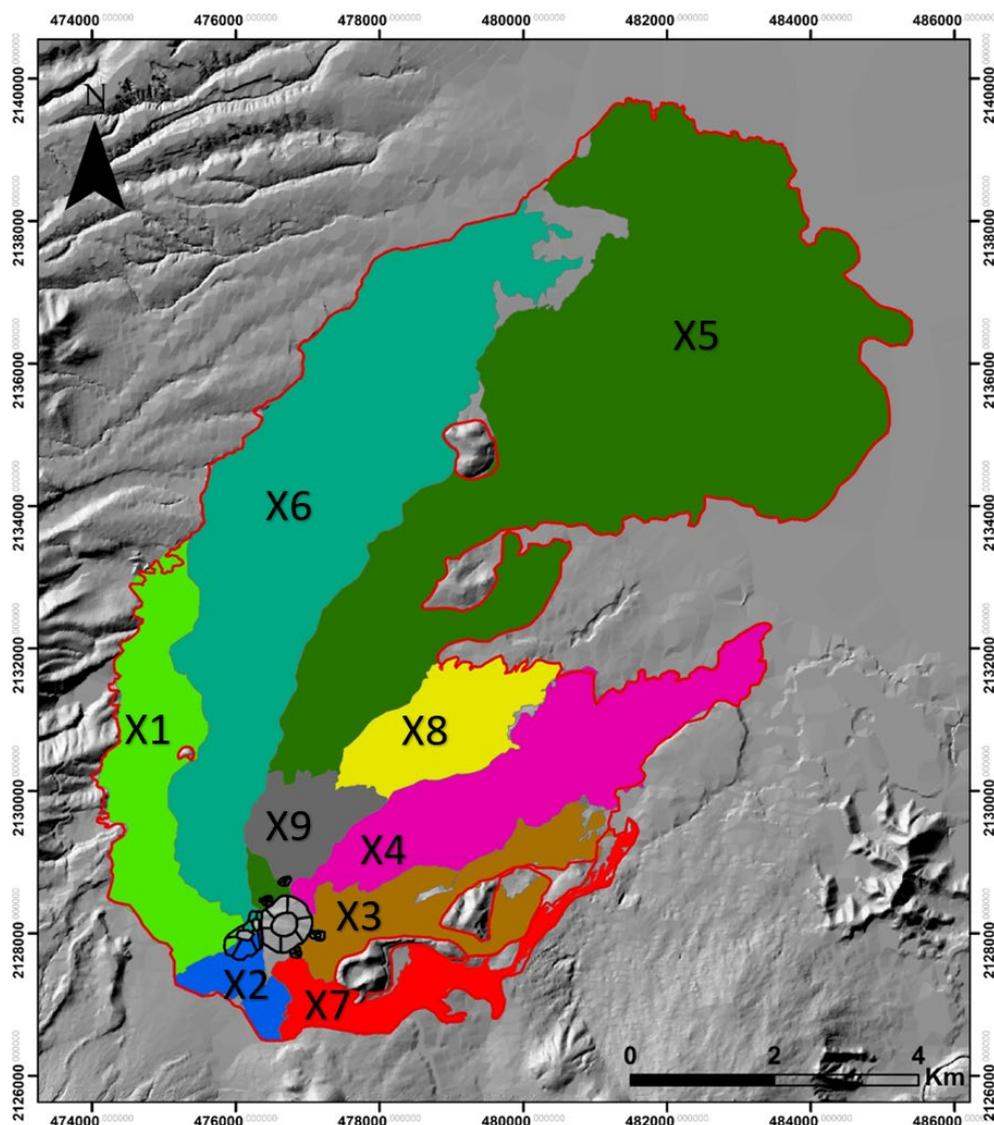


Figura 25. Distribución y orden de emplazamiento de los derrames de lava visibles del volcán Xitle.

Se simuló cada derrame de acuerdo al orden en el que se emplazaron, mostrado en la Figura 25. Cada uno fue simulado desde una fisura, ya que como se mostró en la Figura 24, la alineación de las bocas secundarias indica que el origen de este volcán fue fisural.

A continuación, se describen los resultados de las simulaciones de los nueve derrames de lava del volcán Xitle. En cada derrame se menciona el tipo de lava que es: pahoehoe o aa, esto de acuerdo a los trabajos previos de Delgado, et.al. (1998) y Nieto (2020), principalmente.

Derrame X1

El derrame que se muestra en verde se formó y emitió de la Boca 1 del Xicontle 1. Este derrame se emitió inicialmente como lava pahoehoe e hizo transición a lava aa debido a un cambio en la tasa de efusión, además esta transición ocurre con mayor frecuencia cuando los flujos se mueven desde pendientes pronunciadas hasta terreno plano (Hon et.al., 2003). Este derrame al inicio tomó dirección hacia el oeste y el norte bajando por los canales de los afluentes de los paleo-canales Peña Pobre, Cuicuilco y Magdalena. Cambió de dirección hacia el nor-noreste cuando llegó a la zona de lavas y lahares del Complejo Volcánico San Miguel emplazándose por los paleo-canales del Magdalena y cubriendo parcialmente al volcán Cuilotepec y a sus derrames de lava. Los valores más altos de probabilidad de inundación por lava se muestran en color rojo, y como vemos este color predomina en donde se encuentran las barrancas por donde viajaban los paleo-canales, siendo el valor más alto de 0.263 y el más bajo de 0.000306 en color verde (Figura 26).

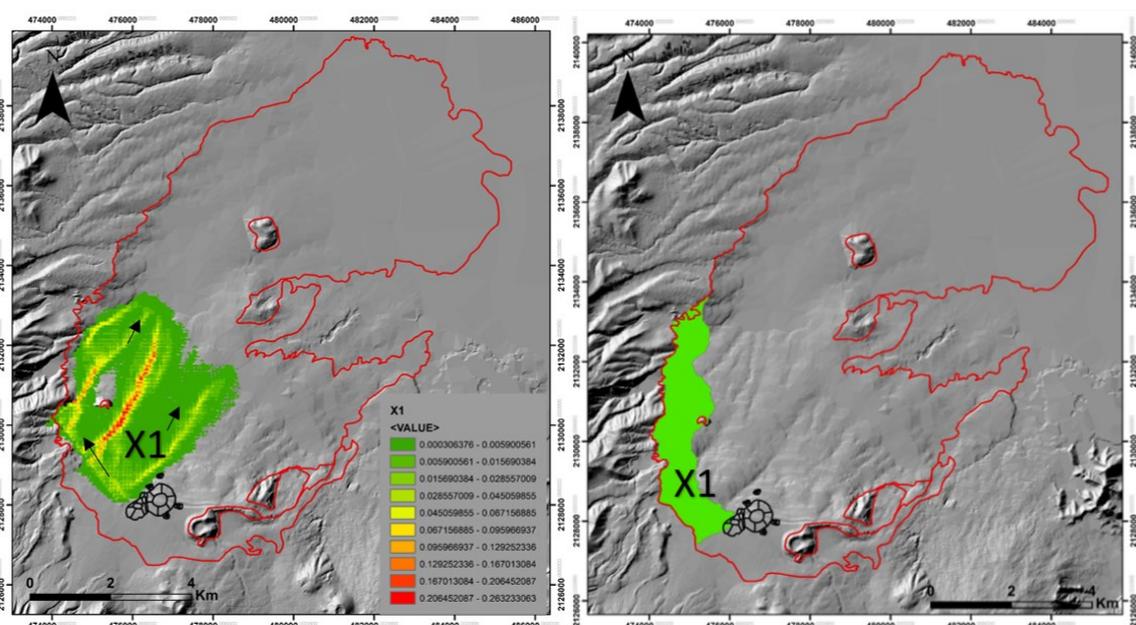


Figura 26. Derrame X1. Derrame visible a la derecha y simulado a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación los colores rojo y amarillo del derrame X1 indican las probabilidades más grandes de inundación en la simulación del derrame de lava. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X2

Este derrame que se muestra en azul, es el más pequeño de los derrames de lava del Xitle y es de tipo aa. También se emitió de la Boca 1 del Xicontle 1 pero se emplazó una parte al norte y otra pequeña al sur por los canales de los afluentes del

paleo-canal Peña Pobre. La lava se emplazó al norte y sur porque al oeste ya se encontraba la lava del derrame X1 que no permitió que este segundo derrame siguiera su trayectoria hacia el oeste.

Actualmente el derrame X2 solo se observa en la parte sur, ya que la lava que se emplazó hacia el norte fue enterrada por los derrames posteriores (X5, X6, X8 y X9). Los valores más altos de probabilidad de inundación por la lava simulada se muestran en color azul oscuro, y como vemos este color predomina en donde se encuentran las barrancas, siendo el valor más alto de 0.352 y el más bajo de 0.00334 en color azul claro (Figura 27).

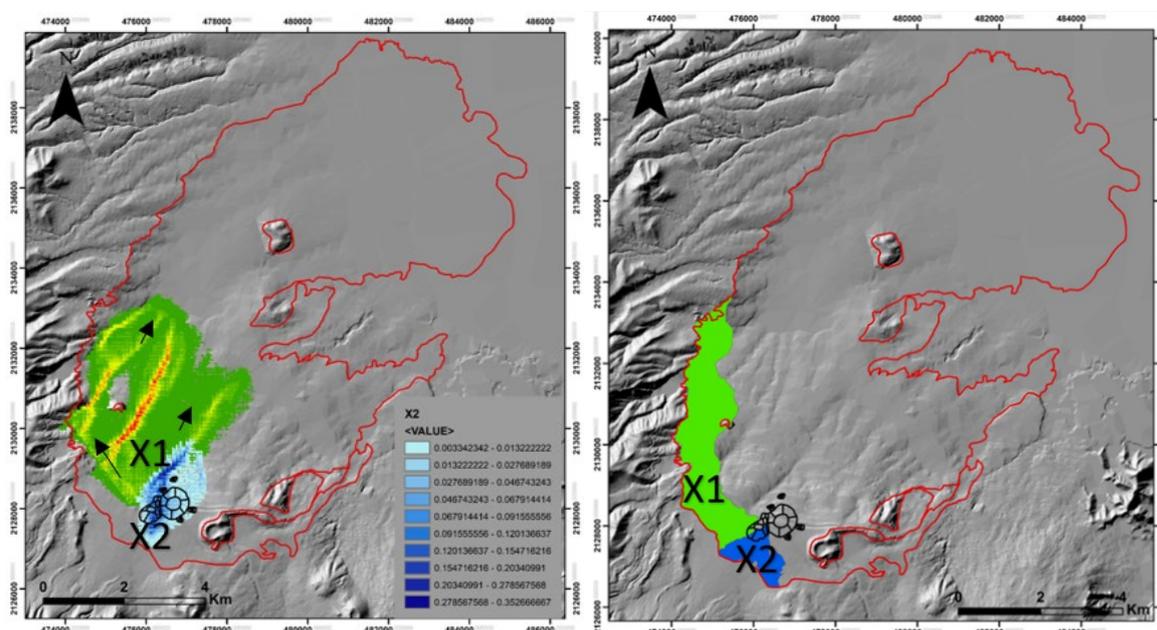


Figura 27. Derrames X1 y X2. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación se muestran en color azul del derrame X2 los caminos de más alta probabilidad de inundación de la lava simulada. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X3

Este derrame en café es de tipo pahoehoe. Se originó del Xicotl 2, que está al este del cono principal del Xitle. Una parte del derrame se dirigió al norte, por las barrancas donde escurrían afluentes de los paleo-canales Peña Pobre y Fuentes Brotantes y sobre las lavas del volcán Coatzontle. Otra parte se dirigió al noreste y otra más pequeña hacia el este. Al inicio también una parte tomó dirección al sureste, pero se topó con el cono del volcán Coatzontle que lo hizo cambiar de dirección hacia el este rodeando al cono de este volcán. Después de rodear al Coatzontle, la

lava se encontró con un *hummock* del Ajusco al cual también rodeó dirigiéndose hacia el norte. Los valores más altos de probabilidad se muestran en color naranja, este color predomina en donde se encuentran las barrancas, siendo el valor más alto de 0.271 y el más bajo de 0.000111 en color naranja claro (Figura 28).

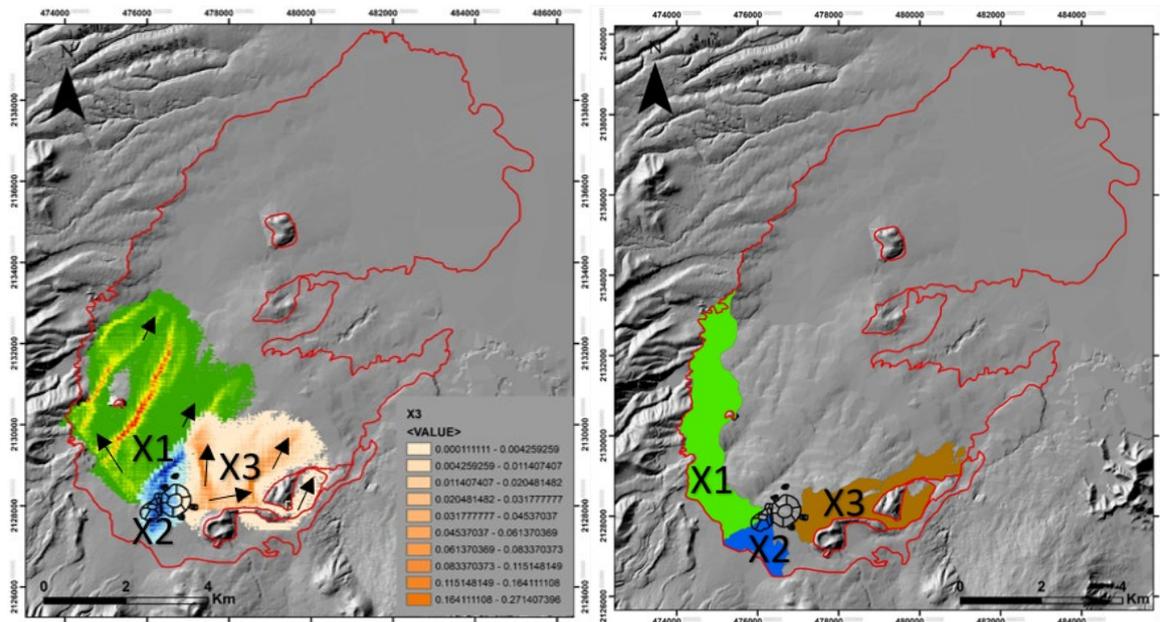


Figura 28. Derrames X1, X2 y X3. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación los tonos naranja del derrame X3 más oscuro son las zonas de más alta probabilidad de inundación por la lava simulada. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X4

Este derrame que se muestra en morado, es de tipo aa y se emitió del cono principal del Xitle. Cubrió la parte norte de los derrames X2 y X3 y se dirigió al norte y noreste hasta llegar al *hummock* que lo desvió hasta que finalmente se detuvo. Viajó sobre las lavas del volcán Coatzontle y por las barrancas por donde escurrían los afluentes de los paleo-canales Peña Pobre y Fuentes Brotantes. Los valores de probabilidad de inundación por lava se muestran en color verde, que corresponden a valores de hasta 0.145. Las zonas de menor probabilidad de inundación se muestran en color morado, que corresponden a valores de hasta 0.000318 (Figura 29).

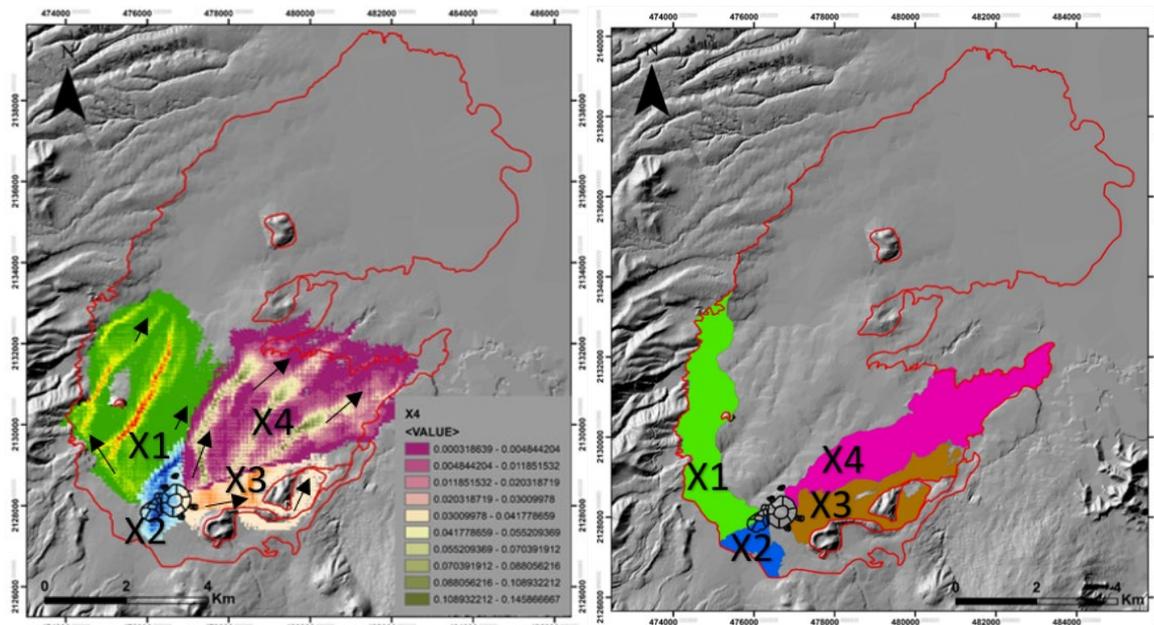


Figura 29. Derrames X1, X2, X3, y X4. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación los colores verde y blanco del derrame X4 indican las zonas con más alta probabilidad de inundación por la lava simulada. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X5

Este derrame que se muestra en verde oscuro se originó de la Boca NW, es de tipo pahoehoe. Es el derrame que alcanzó más longitud (~12 km), avanzando inicialmente sobre las lavas de los derrames X1, X2, y X4 y por los depósitos de avalancha del volcán Ajusco. Sobre estos depósitos de los derrames de lava anteriores del Xitle se encontraban los canales, que ya no eran tan profundos, de los afluentes de los paleo-canales Cuicuilco, Peña Pobre y Magdalena por los que se emplazó la lava. Al llegar a los depósitos de avalancha de del Ajusco, la lava rodeó completamente a los *hummocks* del Bosque de Tlalpan y al cerro Zacatépétl, y cubrió a la ciudad de Cuicuilco. Una parte del derrame viajó por el canal principal del paleo-canal Cuicuilco desapareciéndolo y también viajó por el paleo-canal Magdalena, modificando parte de su cause, fue gracias a que se emplazó por estos canales que la lava tomó dirección hacia el este-noreste. Los valores más altos de probabilidad de inundación por la lava se muestran en color rojo, que corresponden a valores de hasta 0.487. En color verde se muestran las áreas con menor probabilidad de inundación por lava, corresponde a valores de 0.00124 (Figura 30).

Este es el derrame que tuvo menor viscosidad, con una tasa de efusión de ~5 m³/s (Delgado et.al., 1998) y al bajar por una pendiente tan abrupta y a través de los

canales de los paleo-canales, se formaron varios tubos de lava. Algunos de estos pueden ser vistos vacíos en la parte alta y más cercana al cono y rellenos en la parte baja, por ejemplo, en la Ciudad Universitaria de la UNAM. Por estas mismas razones también se observan grandes espesores de lava compuesta por varias unidades de flujo en el frente de este derrame, ya que los tubos de lava facilitaron que los derrames de lava llagaran más lejos al viajar a través de ellos, y que los derrames se volvieran más gruesos. En este derrame de lava se pueden observar también estructuras típicas de los tubos de lava, como levantamientos de lava (lava rise), los tómulos o tumulis y hornitos.

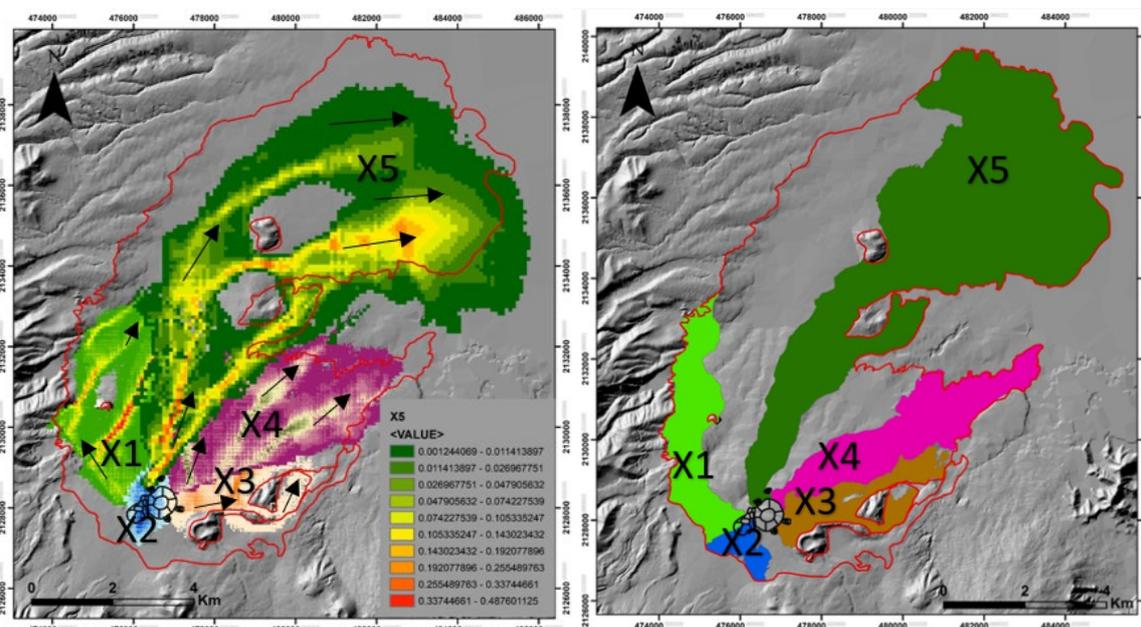


Figura 30. Derrames X1, X2, X3, X4 y X5. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de las simulaciones los colores naranja y amarillo del derrame X5 indican la probabilidad más alta de ser inundados por la lava simulada. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X6

Este derrame que se muestra en azul celeste, se originó de la Boca 2 del Xicotle 1, es de tipo pahoehoe. Cubrió parte del derrame X1 y X5 cuando se emplazó por las mismas barrancas que estos derrames, que son afluentes de los paleo-canales Cuicuilco y Magdalena; viajó también por el paleo-canal principal Magdalena que ya no era tan profundo.

Este derrame de lava rodeó la parte este del volcán Cuilotepec y es el segundo derrame más largo, alcanzando una longitud de ~10 km. Modificó por completo el

drenaje del río Magdalena, dejándolo escurrir por la orilla oeste del derrame X6, en la zona de transición entre los derrames de lava del volcán Xitle y los depósitos de lahar del Complejo Volcánico San Miguel perteneciente a la Sierra de las Cruces. Las zonas con mayores probabilidades de inundación por lava se muestran en color rosa, y alcanzan un valor de hasta 0.518. Las zonas con la menor probabilidad de inundación por lava se muestran en color azul turquesa, tiene un valor de hasta 0.00746 (Figura 31).

Este derrame también tuvo una baja viscosidad y viajó al igual que el derrame X5 por una pendiente muy abrupta, por lo que también presenta tubos de lava, algunos de ellos se pueden observar vacíos en el Área Natural Protegida Los Encinos. Se observan también las estructuras de hornitos, tumulis y lava rise.

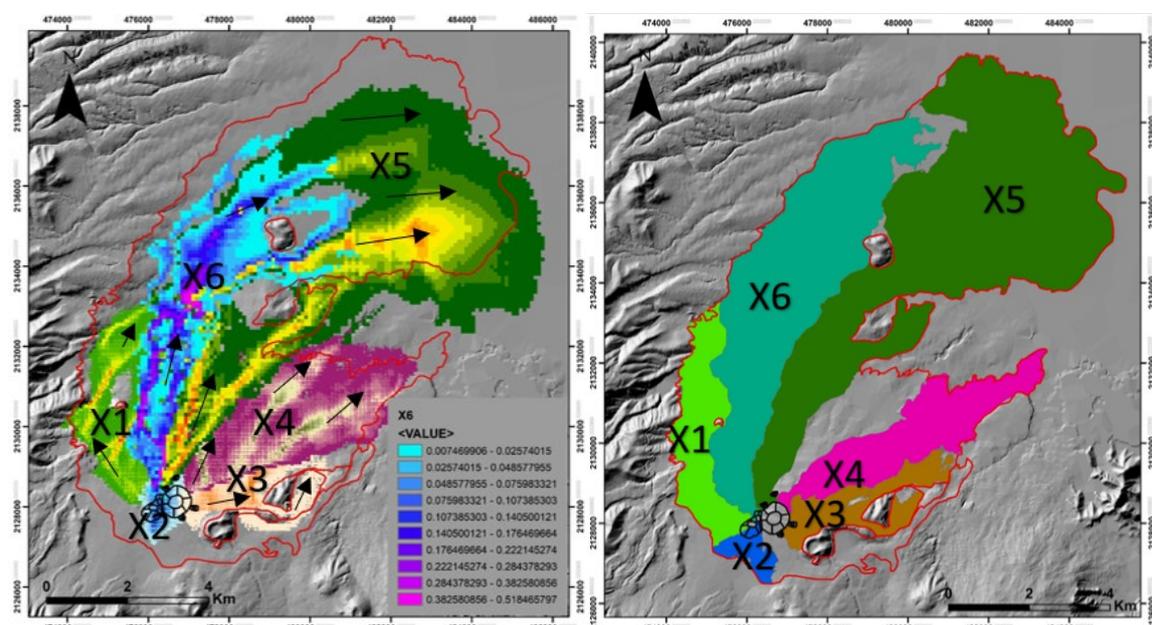


Figura 31. Derrames X1, X2, X3, X4, X5 y X6. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación el color morado del derrame X6 indica la probabilidad más alta de inundación por la lava simulada. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X7.

Este derrame que se muestra en rojo, se originó de la Boca SE y es de tipo aa. El derrame se dirigió al este-sureste debido a que se topó con el derrame de lava X3 que solo dejó que una pequeña parte del derrame viajara al norte sobre el derrame de lava X4. Rodeó al volcán Coatzontle por el sur hasta que llegó a las lavas del volcán Yololica en donde tomó dirección al noreste (Figura 32). Las áreas con menor probabilidad de inundación por la lava simulada se muestran en color rojo y corresponden a valores de hasta 0.617, en color rojo claro se muestran las zonas

que tienen la menor probabilidad de inundación por lava, con valores de hasta 0.0200.

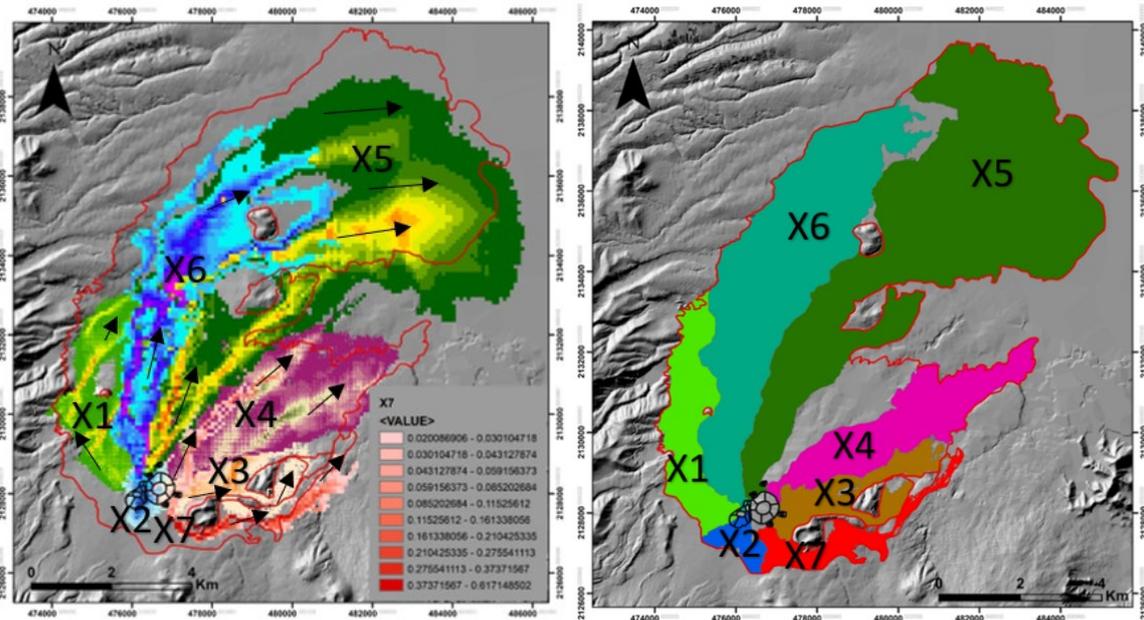


Figura 32. Derrames X1, X2, X3, X4, X5, X6 y X7. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación la tonalidad más fuerte de rojo del derrame X7 indica los sitios de mayor probabilidad que fueron inundados en la simulación. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X8

Este derrame que se muestra en amarillo, se originó de la Boca N, es de tipo aa. Siguió una trayectoria hacia el nor-noreste, se emplazó sobre el límite de los derrames X6 y X5, y sobre los afluentes de los paleo-canales de Fuentes Brotantes y Peña Pobre, que ya no eran tan profundos porque ya estaban parcialmente rellenados por las lavas de los derrames X3, X4 y X5. Cubrió parte de los derrames X4 y X5. Las zonas con la probabilidad más alta se muestran en color café, con valor de hasta 0.463 y las de menor probabilidad en color amarillo con valor de hasta 0.00845 (Figura 33).

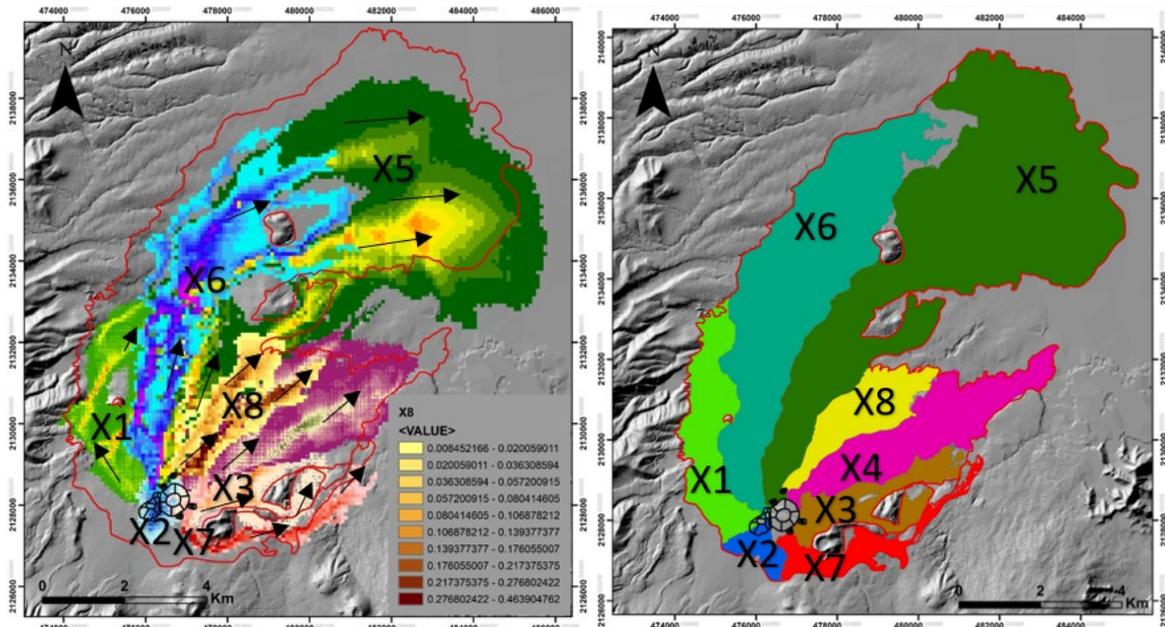


Figura 33. Derrames X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7 y X8. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación las tonalidades café del derrame X8 indican las zonas de mayor probabilidad de inundación en la simulación. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Derrame X9

Este derrame que se muestra en gris, se originó también de la Boca N, y es también de tipo aa. Fue el último derrame de lava del volcán Xitle, y se emplazó sobre el derrame X8, siguió una trayectoria parecida a la de este derrame+ pero con un alcance menor.

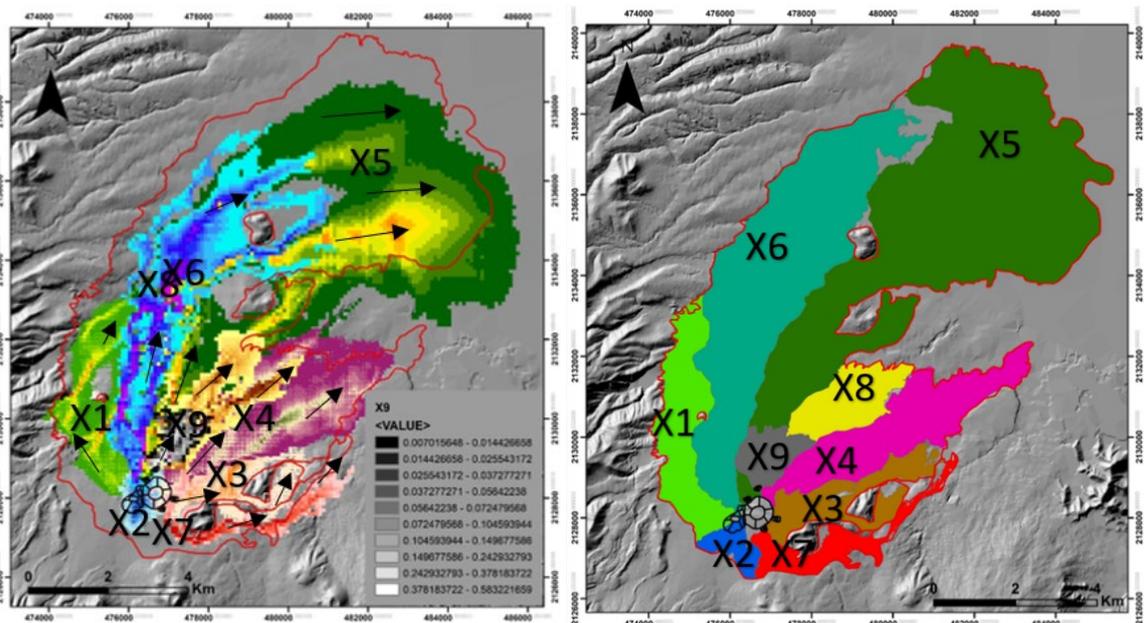


Figura 34. Derrames X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8 y X9. Derrames visibles a la derecha y simulados a la izquierda. Las flechas indican las direcciones de flujo de la lava. En la imagen de la simulación los el color gris claro del derrame X9 indican las zonas de probabilidad de inundación por la simulación. Se muestran todos los valores de probabilidad en la leyenda.

Los valores más altos de probabilidad por inundación de lava simulada se muestran en color blanco, con valores de hasta 0.583. Los valores de probabilidad más baja corresponden hasta 0.00701 y se muestran en color negro (Figura 34).

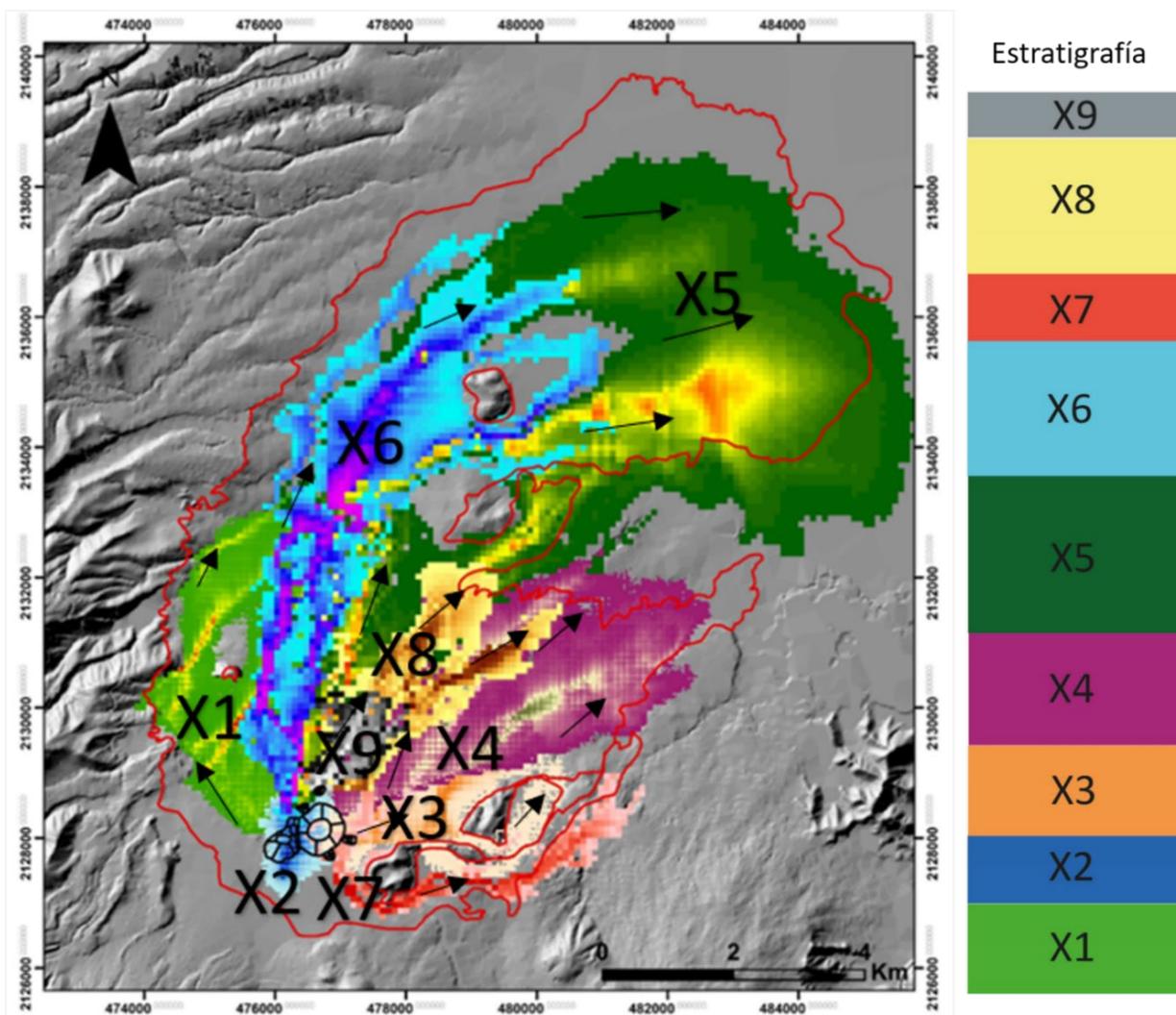


Figura 35. Mapa final y columna estratigráfica de los derrames de lava simulados del volcán Xitle. El contorno rojo indica la dispersión real del derrame de lava del volcán Xitle.

Los derrames simulados siguen una trayectoria similar a la de los derrames originales. Las variaciones entre los derrames reales y simulados se deben a que el programa solo considera parámetros como el relieve que recorre, el origen de la emisión, el espesor y longitud del derrame y a partir de estos calcula un volumen de lava que se va repartiendo píxel por píxel conforme el derrame va avanzando. En la columna estratigráfica se muestra el orden de emplazamiento de los derrames de lava que se consideró para hacer las simulaciones (Figura 35).

Se muestran en la Tabla 9 los resultados calculados de la sobreestimación, subestimación, positivo verdadero y la suma de estos parámetros de cada derrame de lava. La subestimación nos dice las áreas que no fueron afectadas en los resultados de la simulación pero que si fueron afectadas por los derrames de lava reales. La sobreestimación se refiere a las áreas que fueron afectadas por la simulación pero que en la realidad no fueron cubiertas por los derrames de lava reales. El positivo verdadero indica la precisión entre la distribución de los derrames de lava simulados y los derrames de lava reales; entre más se acerque a 1 mejor se habrán simulado los derrames. La suma de estos cálculos debe dar 1. Los resultados de estos cálculos se muestran de manera gráfica en la Figura 36.

Los valores más altos de sobreestimación son para los derrames X1, X2, X3 y X4. Esto se debe a que los primeros cuatro derrames de lava que se observan en la topografía actual no están completos, es decir que no se ve la parte que está enterrada por los derrames de lava posteriores: X5, X6, X8 y X9, como ya se explicó anteriormente. El valor para el derrame X7 vuelve a ser un poco alto, esto se debe a que también parte de este derrame, principalmente la parte que viajó al norte, está enterrada por los derrames X8 y X9. Es posible que en la realidad la parte sobreestimada de los primeros cuatro derrames de lava no sea tan grande, sino que actualmente no se puede ver esa parte porque está enterrada por los derrames posteriores. Al comparar las áreas sobreestimadas con las áreas de la parte visible de los derrames en el relieve actual obtenemos estos resultados de sobreestimación tan grandes.

La subestimación es baja para todas las simulaciones, con excepción de los derrames X6 y X7. En el caso del derrame X6 el valor de la subestimación se debe al cambio de pendiente en la topografía al oeste, por la presencia de los depósitos del Complejo Volcánico San Miguel, por lo que la lava simulada no alcanzó a estos depósitos, en cambio en el derrame de lava real visible vemos que lava tuvo un mayor alcance sobre esta pendiente (Figuras 25 y 35). Esto se debe a que el derrame de lava X6 es un derrame compuesto por varias unidades, y en este trabajo no se simularon estos tipos de derrames, sino que solo se consideró una unidad. En el caso del derrame X7 se debe a que en esa zona también hay un cambio de pendiente, por lo que la lava simulada se dirige más hacia el norte, por la pendiente, en lugar de extenderse un poco más al sur (Figuras 25 y 35).

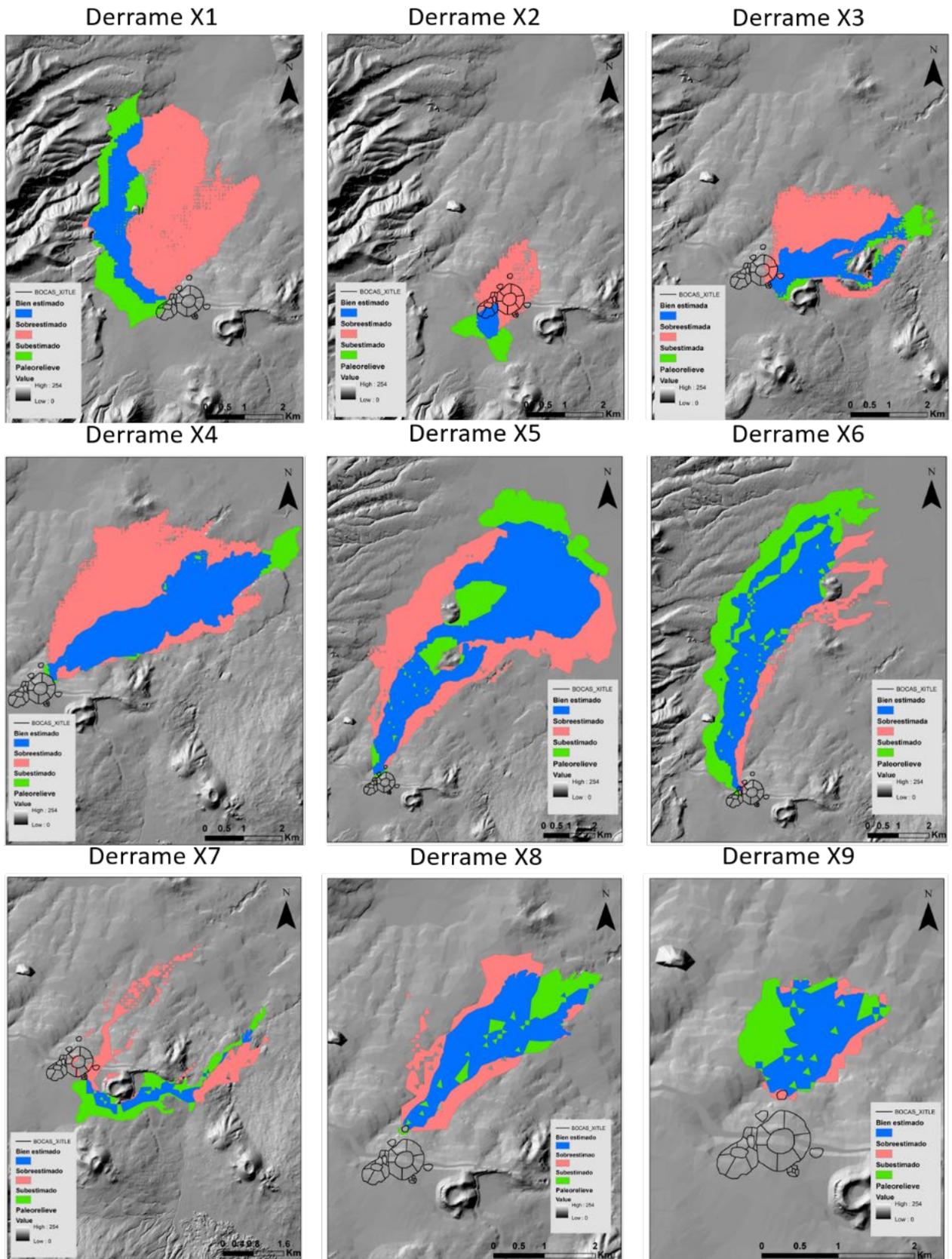


Figura 36. La sobreestimación se muestra en color rosa, la subestimación en color verde y el positivo verdadero se muestra en azul.

Tabla 9. Resultados de la sobreestimación, subestimación y el positivo verdadero.

Derrame	Sobreestimación	Subestimación	Positivo Verdadero	Suma
X1	0.54	0.22	0.24	1
X2	0.59	0.19	0.22	1
X3	0.44	0.09	0.47	1
X4	0.51	0.05	0.44	1
X5	0.31	0.16	0.53	1
X6	0.16	0.34	0.50	1
X7	0.36	0.30	0.34	1
X8	0.30	0.16	0.54	1
X9	0.12	0.26	0.62	1

En el caso de los resultados del positivo verdadero, se obtuvieron valores de entre 0.22 y 0.62. Estos valores relativamente bajos se deben a que, como se explicó antes, se hizo la simulación de una unidad de flujo de cada derrame de lava y como ya se mencionó en el capítulo de antecedentes 1.3.3, los derrames de lava del volcán Xitle son derrames compuestos de varias unidades de flujo. Actualmente no existe un programa en el cual se puedan simular derrames de lava compuestos, pero los resultados aquí obtenidos dan una buena aproximación a la realidad.

3.5. Impacto de la erupción del volcán Xitle en el suroeste de la Cuenca de México.

La erupción del volcán Xitle tuvo un gran efecto en la parte suroeste de la Cuenca de México a nivel morfológico, ecológico e incluso social.

La erupción modificó todo al paso de sus emisiones de lava. El drenaje de los ríos fue desviado por los derrames de lavas. También rellenaron y secaron los canales de los paleo-canales hasta que llegaron al lago de Xochimilco. La erupción del volcán Xitle provocó que algunos paleo-canales desaparecieran por completo, como en el caso de los ríos Cuicuilco y Peña Pobre. Aunque aún hay un escurrimiento de agua en el Bosque de Tlalpan, que era un afluente del río Peña Pobre, en el Parque Nacional Fuentes Brotantes aún hay presencia de agua que probablemente provenga de debajo de las lavas del volcán Xitle (Figura 37).

Otros fueron desviados, como el paleo-canal Magdalena que fue desviado por los derrames de lava X5 y X6 hacia el límite entre las lavas del Xitle y los depósitos de lahar del Complejo Volcánico San Miguel. Los afluentes del río Magdalena y

Cuicuilco que escurrían del volcán Ajusco se convirtieron en el río Eslava, que en su camino se encuentra con el río Magdalena aportándole agua. El río El Rosal también fue desviado y ahora sus aguas forman parte de la parte baja del actual río Magdalena. Dejando la configuración de los ríos como la conocemos ahora (Figura 37).

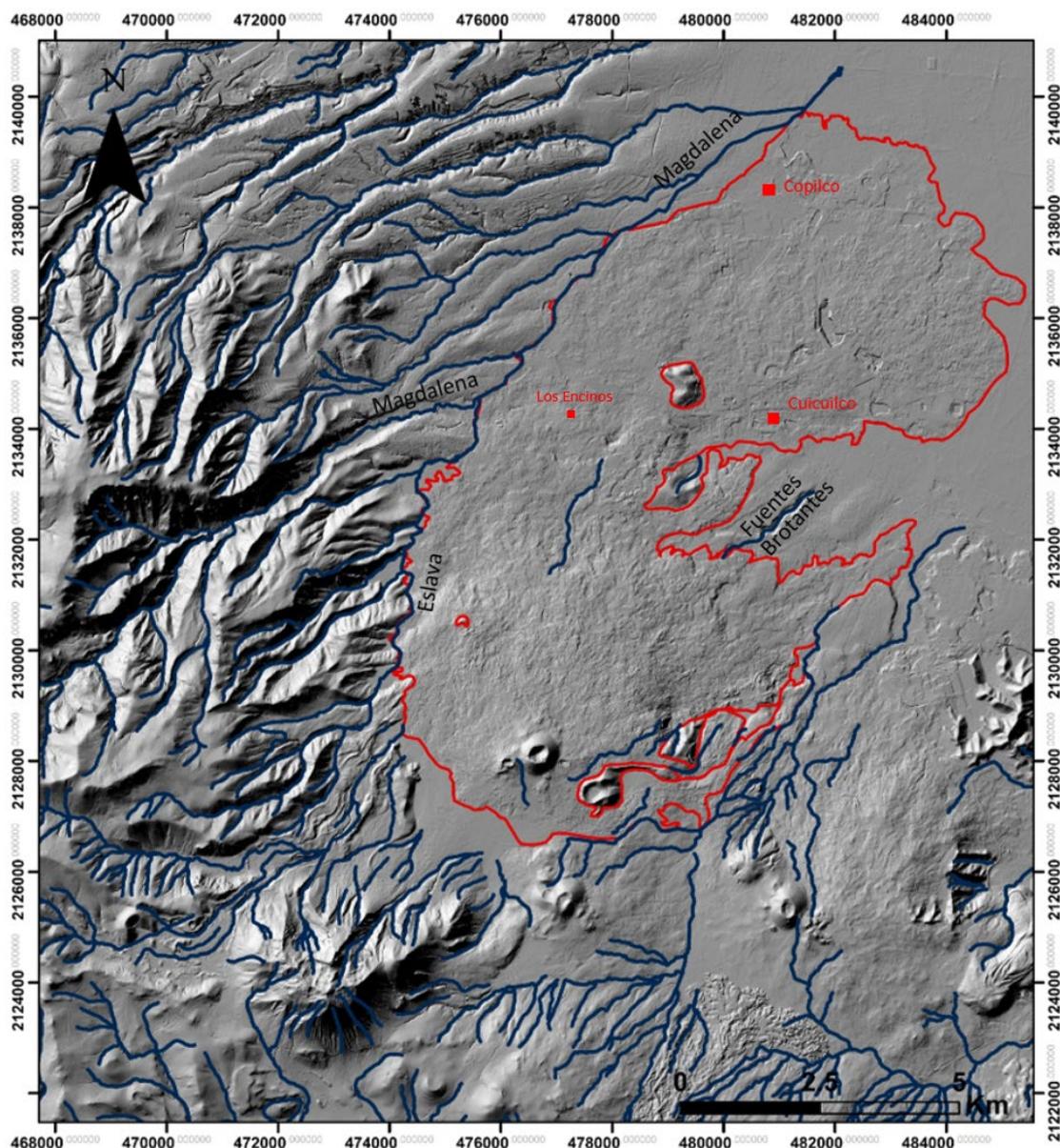


Figura 37. Este mapa muestra el derrame de lava del volcán Xitle en negro y la configuración actual de los ríos principales ríos que son el Magdalena, el Eslava y Fuentes Brotantes y sus escurrimientos. Se puso la ubicación de dos sitios para facilitar la ubicación en el mapa.

En la Figura 38 se puede observar de forma más clara cómo fue el cambio en la distribución de los ríos después de la erupción del volcán Xitle. Se muestran los ríos actuales y los paleo-canales.

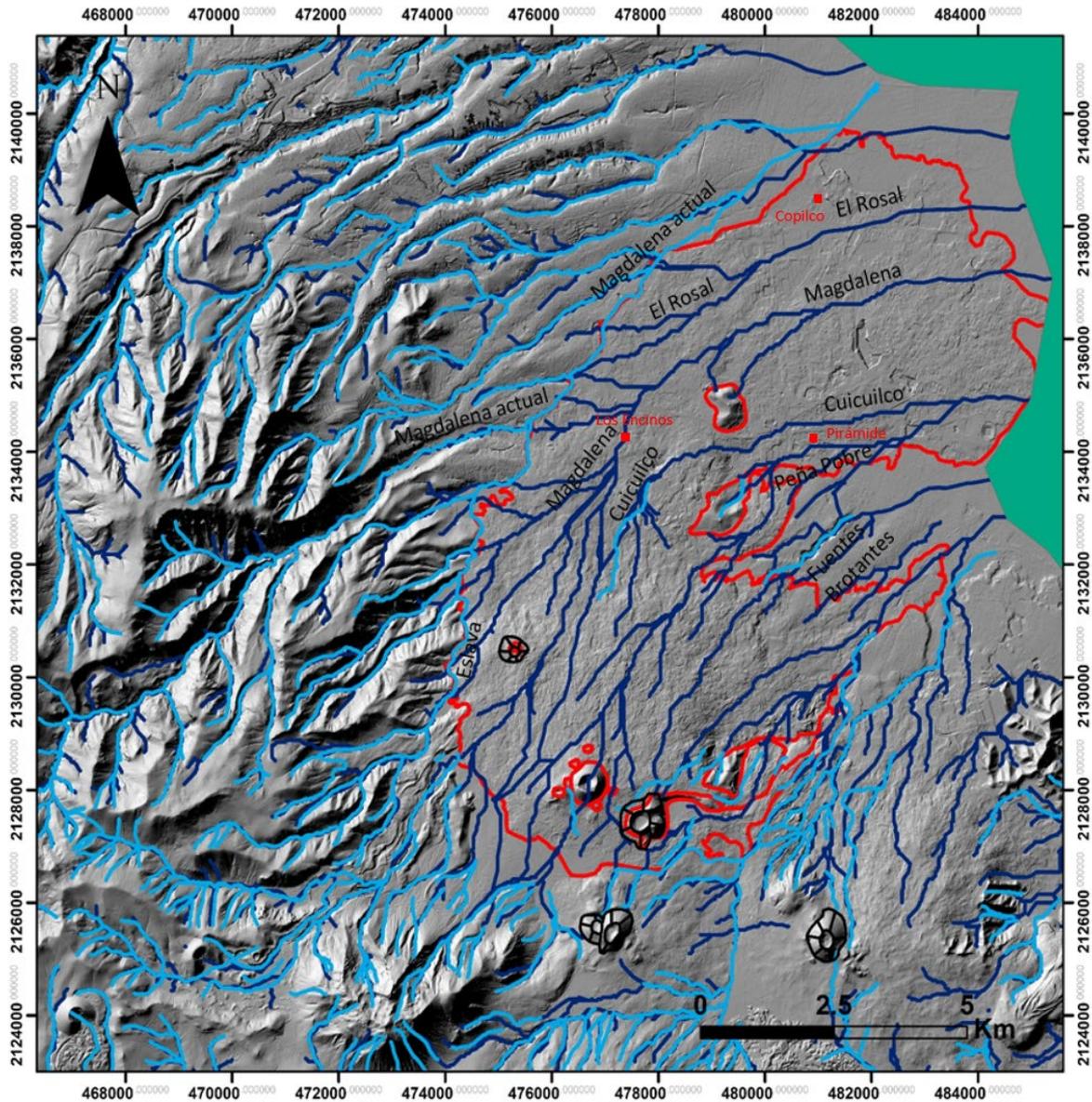


Figura 38. Se muestran los ríos actuales en azul claro y los paleo-canales en azul oscuro.

La erupción del volcán Xitle también tuvo un efecto social porque el derrame de lava X5 cubrió por completo a la zona de la población de Cuicuilco, con excepción de las estructuras más altas y anchas que fueron cubiertas parcialmente, como El Gran Basamento que se encuentra en Cuicuilco A; las estructuras de Cuicuilco B que son los edificios VI, VIII, IX o Heizer y El Palacio; y Cuicuilco C donde se encuentra el Montículo de Peña Pobre (INAH, 2007).

Además del impacto social y en el drenaje antes mencionado, las lavas modificaron la morfología del terreno y al ecosistema de la zona. Después de la erupción comenzaron a crecer sobre las lavas plantas características del matorral xerófilo, como son por ejemplo el Palo Loco, Chapulixtle, Siempre Viva, Cabello de Ángel, Nopal, Agave, Yuca, la Oreja de Burro, las Dalias. La zona se convirtió en hábitat de

diferentes especies de animales que hoy en día son muy característicos de la zona, como Cincuate, Tlacuaches, Cacomixtles, Tarántulas, Víboras de Cascabel y la Lagartija de Collar (PROREPSA, 2008).

Actualmente se pueden ver las características de la morfología de las lavas y de la biodiversidad sobre todo en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) como el Parque Ecológico de la Ciudad de México, que está en la zona del Ajusco Medio; en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, que se encuentra principalmente en la Ciudad Universitaria de la UNAM, y en Los Encinos que se encuentra a un lado de las instalaciones de TV Azteca (Figura 39).

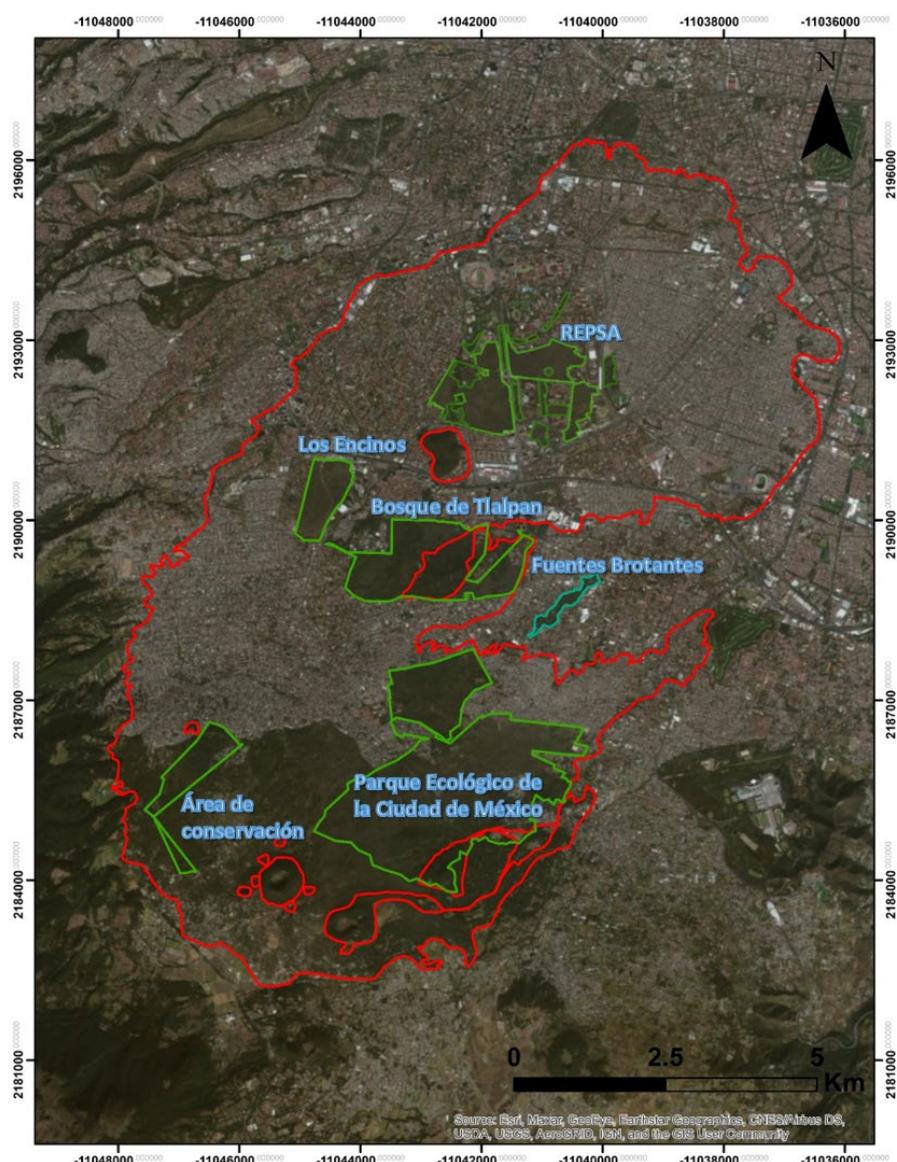


Figura 39. Áreas Naturales Protegidas dentro y cerca del derrame de lava del volcán Xitle.

La mancha urbana ha ido ocupando los derrames de lava y arrasando con la flora y fauna original y característica del pedregal del Xitle. La Figura 40 muestra cómo se ha ido extendiendo la mancha urbana desde el año de 1984 hasta el 2020, y se observa que el crecimiento urbano fue mayor del año 1984 al 2000.

Los lugares donde ha habido más crecimiento urbano son a los alrededores del cono del volcán Cuilotepec, hacia el Parque Ecológico de la Ciudad de México hacia el cono de los volcanes Xitle y Coatzontle. En menor cantidad ha habido crecimiento urbano cerca del Bosque de Tlalpan, en algunos lugares dentro de la REPSA y al norte y un poco al este y al oeste de Los Encinos (Figura 41).

La conservación de todas estas áreas es muy importante, ya que estos sitios nos brindan múltiples beneficios, siendo uno de los más importantes la provisión de agua a los acuíferos del sur de la CDMX (Canteiro, 2019).

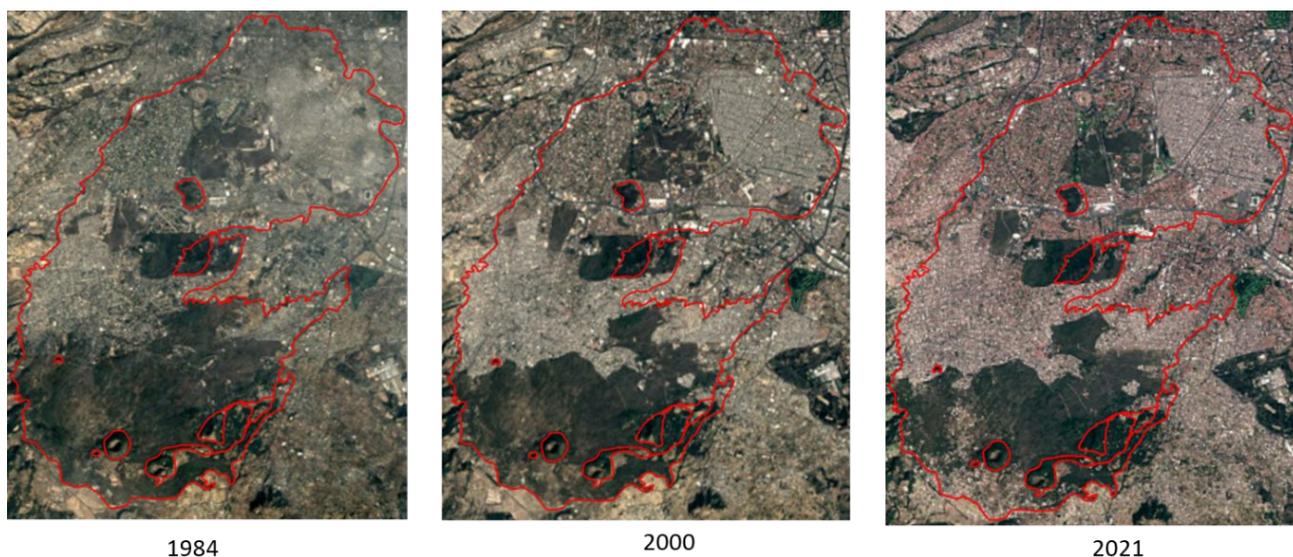


Figura 40. Crecimiento de la mancha urbana dentro del derrame del volcán Xitle del año de 1984 a 2020.

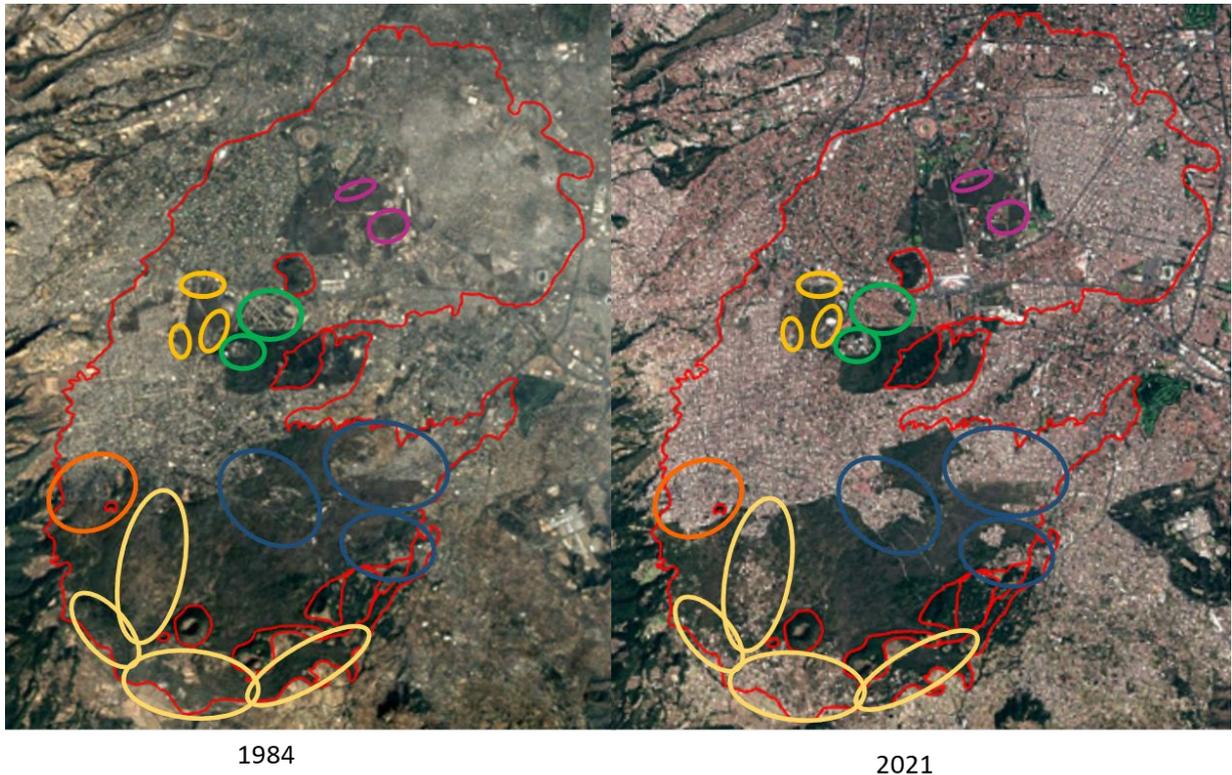


Figura 41. Zonas de mayor crecimiento urbano en los últimos 36 años dentro de los pedregales del volcán Xitle. Los lugares donde ha habido más crecimiento urbano son a los alrededores del cono del volcán Cuilotepec (círculos color naranja), hacia el Parque Ecológico de la Ciudad de México (círculo color azul), hacia el cono de los volcanes Xitle y Coatzontle (círculo color crema), cerca del Bosque de Tlalpan (círculo color verde), en algunos lugares dentro de la REPSA (círculo color morado) y al norte y un poco al este y al oeste de Los Encinos (círculo color amarillo).

4. Discusión

La reconstrucción del paleo-relieve que se hizo modificando las curvas de nivel a 10 m del DEM actual, la cuál es la máxima resolución que se puede obtener y que además es confiable. Las modificaciones eliminaron el efecto del relieve actual, lo cual permitió observar la morfología antigua previa a la erupción del volcán Xitle.

En el paleo-relieve se encuentran depósitos de lava de los volcanes Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinalé, así como los depósitos de lahares del Complejo Volcánico San Miguel y de la avalancha del Volcán Ajusco, como los *hummocks* llamados Bosque de Tlalpan y Cerro Zacatépetl.

La reconstrucción del paleo-relieve se hizo modificando cada curva de nivel a partir de interpretaciones de la morfología del relieve actual que se observa en las imágenes satelitales y en el DEM. Se realizó también considerando los afloramientos de campo, así como los espesores de los derrames de lava y la información

publicada. Sin embargo, aun considerando esta metodología se pudieron generar algunos errores en las trayectorias de los paleo-canales y los derrames de lava debido a que en muchas zonas los espesores de los derrames y los canales se tuvieron que estimar porque están cubiertos.

La erupción del volcán Cuilotepec fue de tipo estromboliana, con lavas más viscosas que las del volcán Xitle. La simulación de las lavas del volcán Coatzontle indica que la lava que se encuentra en Fuentes Brotantes proviene de este volcán. De la mineralogía de las muestras obtenidas del volcán Coatzontle se concluye que se trata de lava andesítica, es decir, más viscosa que las del Xitle y Cuilotepec. Sus lavas tienen un espesor de 15 m en Fuentes Brotantes y de 20 m cerca del cono. Las lavas del volcán Yololica son un poco menos viscosas que estas. Esto se observa en su morfología y mineralogía ya que contiene olivino, aunque en menor proporción que el Xitle. Este volcán y el Malinala no jugaron un papel tan importante en la reconstrucción del paleo-relieve porque sus lavas no se encuentran debajo de las del volcán Xitle, como es el caso de los volcanes Coatzontle y Cuilotepec.

Varios paleo-canales fluyeron sobre los depósitos de los volcanes pre-Xitle antes mencionados. Los paleo-canales principales fueron El Rosal, Magdalena, Cuicuico, Peña Pobre y Fuentes Brotantes; todos estos desembocaban en el antiguo Lago de Xochimilco.

En el paleo-relieve reconstruido se simularon los nueve derrames de lava del volcán Xitle. Las lavas se emitieron de siete diferentes bocas, cuatro de las cuales se encuentran alineadas en dirección este-oeste: El Xicontle 1 con sus dos bocas, produjo tres derrames; el cono principal emitió escoria y ceniza principalmente, pero también un derrame de lava y el Xicontle 2. La alineación de estas bocas indica que el origen de este volcán fue fisural. Las otras tres bocas nacieron al norte, noroeste y sureste del cono principal.

Las lavas emitidas de las bocas fueron andesitas basálticas de tipo aa y pahoehoe, con un contenido de SiO₂ entre 51 y 53% (Martin Del Pozzo, 1990). Las lavas pahoehoe son poco viscosas y tienen por lo general una tasa de emisión <5-10 m³/s mientras que las del tipo aa tienen una tasa de emisión más alta >5-10 m³/s (Rowland and Walker, 1990).

La parte efusiva de la erupción del volcán Xitle inició con la emisión de lava que formó la boca 1 del Xicontle 1, desde esta se emitieron los derrames de lava X1 y X2, que son de tipo transicional y aa respectivamente. La transición de pahoehoe a aa en el derrame de lava X1 se dio cuando hubo un aumento en la tasa de efusión mientras ocurría el derrame de lava; esta transición ocurre con mayor frecuencia cuando los flujos se mueven desde pendientes pronunciadas (en donde van más rápido) hasta terreno plano (en donde disminuyen su velocidad) (Hon et.al., 2003). Es decir que el que haya una transición de lava tipo pahoehoe a aa en el mismo derrame depende también de la velocidad que tome la lava y de la pendiente por la que viaje, ya que estas características están directamente relacionadas con el esfuerzo cortante aplicado y afectan la tasa de deformación cortante, lo que marca la diferencia entre tener uno u otro tipo de lava.

Posteriormente hubo una disminución en la tasa de efusión y se formó la boca del Xicontle 2, desde la que se emitió el derrame X3 que es de tipo pahoehoe. Hubo un incremento en la tasa de efusión y se emitió un derrame de lava aa desde el cono principal, el derrame X4.

La tasa de emisión disminuyó y se formó la boca secundaria NW por la que fluyó lava pahoehoe formando al derrame X5. Después se formó la boca 2 del Xicontle 1, por donde salió también lava pahoehoe dando origen al derrame X6. Estos dos derrames viajaron por la abrupta pendiente de los depósitos de los volcanes pre-Xitle, que alcanzó hasta 31° en las partes más altas y por los canales de los paleo-canales, características que dieron lugar a que se formaran varios tubos de lava. Gracias a los tubos de lava se formaron derrames compuestos de varias unidades de flujo que tuvieron un largo alcance y espesor. En estos derrames se pueden apreciar distintas estructuras características de los tubos de lava como los levantamientos de lava (lava rise), los cuales ocurren cuando la lava fluye por dentro levantando la superficie del derrame ya solidificada, los hornitos que se originan por la fractura en un tubo de lava por donde sale la lava levantando la parte superficial ya endurecida, o los túmulos, formados cuando la lava es empujada hacia la superficie desde abajo.

Los derrames de lava compuestos más gruesos se pueden ver en algunas zonas de la Ciudad Universitaria de la UNAM donde los espesores alcanzan hasta 25 metros, y contienen varios tubos de lava rellenos y varias unidades de flujo.

En el Área Natural Protegida Los Encinos existen dos derrames de lava sobrepuestos, el derrame X6 sobre el X5, como se puede ver en la simulación de estos dos derrames (Figura 30 y Figura 31). En el paleo-relieve se observa que en este sitio había un cambio de pendiente y se observa también la presencia de varios afluentes del paleo-canal Magdalena (Figura 21).

Hay notables diferencias entre los derrames de lava de tipo pahoehoe de los derrames X5 y X6, con el X3 antes mencionado, ya que aunque son el mismo tipo de lava no presentan las mismas estructuras, como los tubos de lava. La diferencia se debe a que el derrame X3 no viajó por la abrupta pendiente ni sobre paleocanales de ríos principales como los derrames X5 y X6. La pendiente y los canales de los paleo-canales jugaron un papel muy importante en la formación de los tubos de lava.

Posterior a la emisión de los derrames X5 y X6, aumentó la tasa de efusión y se formó la Boca SE, desde la que emanó el derrame de lava X7 que es lava tipo aa. Los siguientes derrames de lava, X8 y X9, también fueron de tipo aa y se emitieron desde la Boca N. Los derrames de lava de tipo aa tuvieron un alcance menor en comparación con los derrames de lava de tipo pahoehoe.

Se sabe que hubo cambios en las tasas de efusión durante la erupción del volcán Xitle debido a que de un derrame al otro existieron cambios entre lavas tipo aa y tipo pahoehoe, y como se explicó anteriormente cada tipo de lava se forma cuando hay diferentes tasas de efusión. Según Rowland y Walker (1990) cuando la tasa de efusión es $<5-10 \text{ m}^3/\text{s}$ (pero más típicamente $\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$) se originan lavas tipo pahoehoe que forman tubos de lava, cuando la tasa de efusión es $>5-10 \text{ m}^3/\text{s}$ se forman lavas tipo aa. La erupción del Xitle tuvo una tasa de efusión de entre 5 y $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Nieto, 2020); siendo de $\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando se formaron lavas pahoehoe y de $\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando se formaron lavas aa.

El programa Q-LavHA es usado principalmente para simular derrames de lava tipo aa, por lo que al simular derrames de lava tipo pahoehoe puede haber errores, ya que las reologías de estas lavas son diferentes. Esto si se consideran aproximaciones determinísticas, tomando en cuenta la reología de las lavas; la tasa

de efusión, la velocidad de enfriamiento, la desgasificación y la pendiente por la que viaja, por ejemplo cuando se trabaja con el modelo FLOWGO. En este trabajo se hizo una aproximación probabilística utilizando el modelo L_{max} considerando solamente el DEM y los datos de longitudes máximas y espesores conocidos. Esto quiere decir que no hay diferencia entre simular un derrame de lava tipo aa o pahoehoe usando un modelo probabilístico. Se encontraron áreas de inundación probables para cada derrame de lava simulado usando esta aproximación probabilística. Se trató de tener el menor error posible variando los espesores (H_c) y las longitudes de cada derrame de lava de acuerdo a lo visto en campo, en las imágenes satelitales, en el DEM y en los trabajos previos. Las simulaciones de los derrames de lava tipo pahoehoe, en los cuales se observan varias unidades de flujo, se seleccionaron los espesores más grandes de una sola unidad para tener un resultado más ajustado a la realidad.

En el resultado final de las simulaciones se observa que en el sector oeste los derrames simulados no llegan hasta el límite en donde se encuentran los derrames reales, esto se debe a que en la simulación el derrame de lava no tuvo el alcance para llegar a los depósitos del lahar del Complejo Volcánico San Miguel, como el derrame de lava real y visible. Esto es debido a que los derrames pahoehoe son compuestos y en este trabajo se simuló un solo miembro de cada uno de los nueve derrames.

Los valores de las probabilidades para las simulaciones generales del volcán Xitle, el volcán Cuilotepec y para las simulaciones de los derrames individuales del volcán Xitle oscilan entre 0.617 y 0.000111, en ningún caso se obtuvo valor de 1, con excepción de la simulación del derrame de lava del volcán Coatzontle. Estos resultados se deben en parte a la resolución del DEM; a mayor resolución la probabilidad será menor, y a menor resolución la probabilidad será mayor (Mosseoux, 2016). Se usaron DEM's con resolución de 30 y 90 m (Tablas 5 y 6) y como muestran las Figuras 26 a 34 las probabilidades más altas que se obtuvieron fueron para los derrames simulados en los DEM's con resolución de 90 m.

Los valores de probabilidad dependen también del número de iteraciones. Se atribuye una probabilidad de inundación en cada iteración a los píxeles que forman parte de la línea de flujo del derrame simulado (Mosseoux, 2016), lo que quiere decir

que la probabilidad en cada pixel se da en función de cuantas veces pasó la lava por el mismo camino. Se hicieron simulaciones de 1500 iteraciones debido al tiempo de procesamiento y a la capacidad de la computadora en la que se ejecutaron las simulaciones.

En cuanto a las estimaciones de cada derrame de lava simulado se obtuvo que la sobreestimación es alta en los derrames X1, X2, X3, X4 y X7. Esto es debido a que parte de los primeros derrames quedaron enterrados bajo las lavas de los derrames más recientes, y actualmente no podemos ver estas lavas enterradas. El derrame de lava X7 obtuvo un valor alto de sobreestimación porque la parte que se emplazó al norte fue cubierta por los derrames de lava posteriores. Las áreas con las que se compararon los derrames de lava simulados fueron las áreas de los derrames reales que se observan actualmente en campo, lo que afectó los resultados de la sobreestimación, sobre todo para los primeros derrames de lava.

La Tabla 9 muestra que los valores más altos del positivo verdadero corresponden a los últimos derrames de lava, X5, X6, X8 y X9 esto se debe a que el relieve en el que fueron simulados ya era más parecido al relieve actual y no fueron cubiertos por derrames de lava posteriores, como en el caso de los derrames de lava X1, X2, X3, X4 y X7 que se encuentran parcialmente cubiertos. Además, al no estar cubiertos por derrames de lava posteriores el área del derrame simulado ya era muy parecida al área del derrame de lava visible actual, por lo que sus diferencias fueron menores y sus similitudes fueron mayores. Los valores de positivo verdadero oscilan entre 0.22 y 0.62, por lo que la precisión de las simulaciones fue buena, ya que la dispersión de cada derrame de lava se acerca y se ajusta a la realidad.

Los derrames de lava del volcán Xitle provocaron cambios en la red de drenaje que había en el paleo-relieve. La mayoría de los paleo-canales desaparecieron bajo las lavas, pero algunos otros como el Magdalena y una parte de El Rosal solamente cambiaron su trayectoria formando al actual río Magdalena. Algunos afluentes del paleo-canal Magdalena que escurrían del volcán Ajusco también fueron desviados por las lavas del Xitle, formando al actual río Eslava.

Las lavas del volcán Xitle propiciaron las condiciones para que la zona fuera poblada por plantas y animales características del matorral xerófilo. Actualmente estos

organismos y las estructuras de las lavas antes mencionadas se pueden apreciar principalmente en las ANP's. Aunque hay algunas áreas dedicadas a la conservación del ecosistema natural del pedregal del Xitle, también hay gran número de asentamientos humanos que deterioran el ecosistema y las estructuras geológicas.

5. Conclusiones

La reconstrucción del paleo-relieve permitió hacer simulaciones de los nueve derrames de lava del volcán Xitle y de los volcanes pre-Xitle cercanos para conocer sus trayectorias.

Las lavas del volcán Cuilotepec se encuentran enterradas por las lavas del volcán Xitle, con la reconstrucción del paleo-relieve fue posible conocer la probable distribución de su derrame de lava también mediante la interpretación de la morfología del paleo-relieve y la simulación de su derrame de lava, esta alcanzó una distancia de 5.7 km y cubrieron un área de 11.83 km².

Mediante la interpretación de la morfología del paleo-relieve y la simulación del derrame de lava del volcán Coatzontle podemos concluir que las lavas del Parque Nacional Fuentes Brotantes fueron emitidas por este volcán. Sus lavas tuvieron un alcance de 7.2 km y cubrieron un área de 40.06 km².

Los paleo-canales principales fueron El Rosal, Magdalena, Cuicuico, Peña Pobre y Fuentes Brotantes; todos estos ríos desembocaban en el antiguo Lago de Xochimilco. Es posible que los pobladores de Cuicuico usaran el agua de los ríos Cuicuico y Peña Pobre debido a su cercanía.

Las trayectorias de los derrames de lava, así como de los tubos de lava fueron controladas por la variación en la tasa de efusión y por la abrupta pendiente del paleo-relieve, aunque los paleo-canales fueron los rasgos controladores principales, los *hummocks* del volcán Ajusco y los conos de los volcanes pre-Xitle Cuilotepec y Coatzontle sirvieron como obstáculos para los derrames de lava, obligándolos a cambiar sus direcciones.

El Área Natural Protegida de Los Encinos se caracteriza por tener grandes tubos de lava, actualmente en donde se encuentra esta área, en el paleo-relieve existía la unión de varios afluentes del paleo-canal Magdalena (Figura 23). Esta fue una de las características que dio lugar a que se formaran los tubos de lava.

La distribución de los ríos en el paleo-relieve cambió después de la erupción del volcán Xitle. Los canales de los paleo-canales fueron rellenados por los diferentes derrames de lava emitidos por el volcán Xitle, provocando que los paleo-canales fueran desviados como el caso de los paleo-canales Magdalena y El Rosal que ahora forman parte del actual río Magdalena, así como los afluentes de los paleo-canales Magdalena y Cuicuilco que hoy forman al río Eslava. Otros desaparecieron como los paleo-canales Cuicuilco, Peña Pobre y Fuentes Brotantes.

La topografía del paleo-relieve fue cambiando conforme la ocurrencia de los diferentes derrames de lava, por lo que cada derrame de lava se fue emplazando de acuerdo a la nueva topografía que dejaba el derrame de lava anterior. Los derrames de lava se podían desviar, como ocurrió con el derrame de lava X7 que al encontrarse al suroeste con el derrame X2 y al este con el derrame X3, tomó dirección hacia el sureste.

Los derrames de lava más recientes viajaron principalmente por encima de los derrames de lava anteriores, es por esto que actualmente no se observan los derrames de lava completos, lo que explica los altos valores obtenidos en el cálculo de la sobreestimación de los primeros derrames de lava simulados.

Las simulaciones de los derrames de lava compuestos, como es el caso de los derrames de lava fluida (basáltica), se deben hacer considerando cada unidad de flujo para obtener un resultado más parecido a la realidad. Las simulaciones para los volcanes que tienen derrames de lava más viscosos pueden hacerse simulando un solo evento, pero hay que tomar en cuenta las características de la erupción, lo observado en campo y el relieve por el que viajan las lavas. Estos factores y cualidades se deben tomar en cuenta para la elaboración de mapas de peligros en cuanto a las lavas.

Como ya se explicó el pedregal creado por el Xitle tiene gran importancia ecológica y geológica por la cantidad de especies de flora y fauna que lo habitan y por las diferentes estructuras de las lavas como los tubos de lava, los tumulis, los hornitos, entre otras.

Los derrames de lava del Xitle proporcionan diversos servicios ecosistémicos como la infiltración del agua, esta infiltración se da en la zona debido a las estructuras que se encuentran en las lavas.

Las lavas del Xitle actualmente están sujetas a un gran deterioro por el crecimiento urbano descontrolado, lo que pone en peligro dichos servicios, a las especies que las habitan y a las mismas lavas. Es necesario un conocimiento integral de la zona para poder conservarlo.

Referencias bibliográficas

1. Arce, J.L., Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Salinas, I., 2015. The ~2000 yr BP Jumento volcano, one of the youngest edifices of the Chichinautzin Volcanic Field, Central México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 308, 30–38.
2. Canteiro M., Olea S., Escolero O. and Zambrano L. 2019. Relationships between urban aquifers and preserved áreas south of Mexico City. *Groundwater for Sustainable Development*. DOI: 10.1016/j.gsd.2018.12.007.
3. Cañón Tapia, E., Walker, G. P. L., & Herrero Bervera, E. 1995. Magnetic fabric and flow direction in basaltic Pahoehoe lava of Xitle Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 65, 249-263.
4. Cervantes, Pablo, and Molinero, Ricardo, 1995, Eventos volcánicos al sur de la ciudad de México: Mexico City, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Bachellor thesis, 74 p.
5. Cervantes, P., Wallace, P., 2003. Magma degassing and basaltic eruption styles: a case study of ~2000 year BP Xitle volcano in central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 120, 249-270.
6. Córdova C., Martín Del Pozzo A. L. and López J. 1994. Paleolandforms and Volcanic Impact on the Environment of Prehistoric Cuicuilco, Southern Mexico City. *Journal of Archaeological Science*. 21, 585-596. ISSN: 03054403.
7. Delgado H. and Martín Del Pozzo A.L.. 1993. Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of Mexico City. *Geofísica Internacional*. 32, 3, 511-522.
8. Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto, J., Lozano, R., Macías, H.L., Mendoza, C., Silva, G. 1998. Geology of the Xitle Volcano in Southern Mexico City- a 2000 year old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 15, 2, 115-131.

9. Diamani M.L., Gropelli G., Norini G., Berino E., Gigliuto A., and Nucita A. 2006. A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy). *Computers & Geosciences*. 32. 512–526. doi:10.1016/j.cageo.2005.08.011.
10. Esri. GIS Mapping Software. ArcGIS for Desktop. 2016. Herramientas y definiciones. <https://www.esri.com/en-us/home>.
11. Felpeto, A., Araña, V., Ortiz, R., Astiz, M., García, A., 2001. Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands). *Natural Hazards*. 23, 247–257.
12. García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J.L., 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 1, 158–178.
13. Hon, K., Gansecki, C., Kauahikaua, J. 2003. The transition from ‘a‘ä to Pāhoehoe Crust on Flows Emplaced during the Pu‘u ‘Ö‘ö-Kūpaianaha Eruption. U.S. *Geological Survey professional paper*. 1676 89-104
14. Hubp J.L., Inbar M., Pastrana A., Flores A. and Zamorano J.J. 2001. Interpretation of the geomorphic setting of the Cuicuilco basin, Mexico City, affected by the pre-Hispanic eruption of the Xitle volcano. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*. 3, 223-232.
15. Kirianov, V.Y., Koloskov, A.B., De la Cruz, S., Martin Del Pozzo, A.L., 1990. The major stages of manifestation of recent volcanism in the Chichinautzin zone. USSR Academy of Science, Geological Series 311, 432-434.
16. Jaimes M.C., Martin Del Pozzo A.L., Layer P.W., Benowitz J.A. and Nieto A. 2018. Timing the evolution of a monogenetic volcanic field: Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 356, 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.013>.
17. Martin Del Pozzo A.L. 1982. Monogenetic Vulcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico. *Bulletin of Volcanology*. 45-1, 1982.
18. Martin Del Pozzo, A.L. 1990. Geoquímica y paleomagnetismo de la Sierra Chichinautzin. Tesis para obtener el grado de doctora en ciencias (Geología). UNAM.

19. Martin Del Pozzo A. L., Córdova C. and Lopez J. 1997. Volcanic Impact on the Basin of Mexico during the Holocene. *Quaternary International*. 43, 181-224. ISSN: 1040-6182.
20. Mora G., Caballero C., Urrutia J. and Uchiumi S. 1991. Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? - A preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study. *Geofísica Internacional*. 30, 2, 61-70.
21. Mooser, F. et al., 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks, VII, a paleomagnetic and petologic study of volcanics of The Valle de Mexico, 451-483.
22. Mosseoux S., Saey M., Bartolini S., Poppe S., Canters C., and Kervyn M. 2016. Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers & Geosciences* 97. 98–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.09.003>.
23. Nieto, A. and Martin Del Pozzo, A.L. 2019. Spatio-temporal hazard assessment of monogenetic volcanic field, near México City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 371. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.006>.
24. Nieto, A. 2020. Evaluación del riesgo asociado al vulcanismo monogenético hacia la Ciudad de México. Tesis de doctorado. Instituto de Geofísica UNAM. 180 pp.
25. Osete, M.L., Ruiz, V.C., Caballero, C., Galindo, C., Urrutia, J. and Tarling, D.H. 2000. Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: palaeomagnetic and radiometric evidence. *Tectonophysics*. 318. 201–215.
26. Pérez, M., Rangel, F.C., Sandoval, Z., 2002. Cuicuilco, Ciudad de México. Instituto Nacional de Antropología e Historia. 2da ed. 9 pp.
27. Peterson, D.W., Tilling, R.T., 1980, Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea volcano, Hawaii; field observations and key factors, in McBirney, A.R., ed., *Gordon A. Macdonald memorial volume: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, 3–4, 271–293.
28. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (PROREPSA), 2008. Manual de Procedimientos. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 108 pp.

29. Romero, E. 1998. Geología del volcán Ajusco. Tesis para obtener el grado de ingeniera geóloga. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 109 pp.
30. Romero, E. 2001. Geología del Complejo Volcánico San Miguel, al Sur Poniente de la Cuenca de México. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. 92 pp.
31. Rowland, S.K., Walker, G.P.L. 1990. Pahoehoe and aa in Hawaii: volumetric flow rate controls the lava structure. *Bulletin of Volcanology*. 52, 615–628.
32. Siebe, C., 2000, Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 104, 45-64.
33. Strahler, A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*. 63, 11, 1117-1142.
34. Strahler, A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 38, 6, 913-920.
35. Walker, G.P.L., Croasdale, R. 1971. Characteristics of some basaltic pyroclastics. *Bulletin of Volcanology*, 35, 808-317.
36. Walker, G.P.L. 1973. Explosive volcanic eruption – a new classification scheme. *Geologische Rundschau*, 62, 431-446.
37. White S.E., 1990. El Ajusco: Geomorfología Volcánica y acontecimientos glaciares durante el Pleistoceno Superior y comparación con las series Glaciares Mexicanas y de las Montañas Rocallosas. (Trad. José L. Lorenzo), *Colección científica*, México, INAH.
38. White S.E. and Valastro S. 1984. Pleistocene Glaciation of Volcano Ajusco, Central Mexico, and Comparison with the Standard Mexican Glacial Sequence. *Quaternary Research*. 21, 21-35.