

# **Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población**

**Rogelio Ramos Aguilar, Patricia Máximo Romero**  
**Facultad de Ingeniería,**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**María de la Cruz Vázquez García**  
**Bufete de Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas**

**Ana Guadalupe Martínez Ortiz**  
**Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Daniel Hernández Andrade**  
**Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica,**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Dora Marcela Benítez Ramírez**  
**Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia**

## Resumen

En este estudio se muestra el cálculo del volumen del volcán Popocatepetl y la aceleración de la gravedad en puntos específicos del edificio volcánico para la identificación de las poblaciones que se encuentran en riesgo. El volumen se calculó a través de las curvas de nivel de la carta E14B42 de INEGI. El estudio gravimétrico se realizó a través del análisis de las anomalías de Bouguer y las anomalías al aire libre. También se calculó la distancia que existe del punto central del cráter a las comunidades más importantes que se encuentran dentro del perímetro de riesgo de 25 km, tomando como referencia las coordenadas de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) zona 14Q teniendo como resultado la elaboración de base de datos de 64 localidades así como el respectivo perfil topográfico con pendiente promedio.

## Palabras clave

Cartográfico, cráter, riesgo, aceleración, volcán.

## Abstract

This study shows the calculation of the volume of the Popocatepetl volcano and the gravity acceleration on specific points of the volcanic building for the purpose of identification of the populations that are at risk. The volume was calculated through the level curves of the map E14B42 by INEGI. The gravimetric study was carried out through the analysis of the Bouguer's anomalies and outdoor anomalies. The distance from the central point of the crater to the most important communities within the 25 km perimeter of risk was also calculated, taking as reference the projection coordinates UTM (Universal Transverse Mercator) zone 14Q resulting in the elaboration database of 64

locations as well as the respective topographic profile with average slope.

## Key words

Cartographic, crater, risk, acceleration, volcano.

## Introducción

El volcán Popocatepetl se localiza en el extremo sur de la Sierra Nevada, cordillera volcánica de edad Plio-Cuaternaria situada en el sector centro-oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). (Figura 1). La composición geoquímica de sus productos es dacítico-andesítica (Franco-Ramos et al., 2017).



Figura 1. Ubicación del Cinturón Volcánico Transmexicano.

En términos geológicos el volcán Popocatepetl es joven con unos 730,000 años. La evolución del volcán consta de al menos tres etapas de construcción y destrucción de su edificio volcánico, el primero fue hace 1,000,000 de años como volcán primitivo o Nexpayantla y su colapso fue aproximadamente hace unos 200,000 años. La segunda etapa es conocida como El Ventorrillo con estimación del colapso de entre 50,000



a 30,000 años, aunque trabajos recientes sugieren 23,000 años (Macías, 2005). Desde entonces la acumulación de flujos de lava y depósitos piroclásticos han edificado el cono actual del Popocatépetl (Franco-Ramos et al., 2017).

El volcán Popocatépetl de acuerdo con Espinasa-Pereña, R. (2012) y Martin Del Pozzo A. L. et al., (2018) es uno de los volcanes más peligroso del mundo debido a la cantidad de personas que habitan en una distancia menor a 100 Km y al historial de erupciones explosivas.

Después de 70 años de inactividad el 21 de diciembre de 1994 comenzó con actividad fumarólica. (Sosa-Ceballos et al., 2012). Un análisis de la morfología del volcán y su evolución geológica muestran que se trata de un volcán que ha estado activo por más de medio millón de años y que ha presentado varias etapas de crecimiento como se ve en la figura 2, (Espinasa-Pereña, R., 2012).

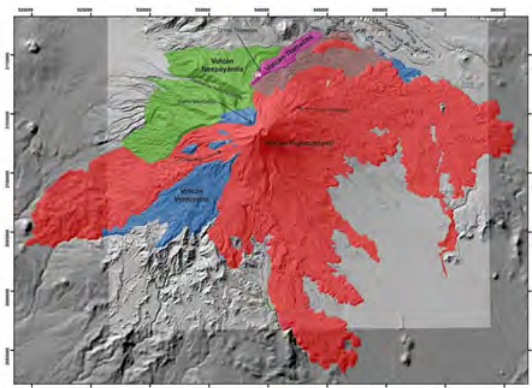


Figura 2. Identificación de los edificios de las estructuras geológicas cercanas al volcán Popocatépetl.

De acuerdo con Espinasa-Pereña, R. (2012) un aspecto a resaltar de la morfología del Popocatépetl es la asimetría en las pendientes de las laderas. El flanco este presen-

ta una pendiente mucho más acusada, lo que favorecerá el incremento de velocidad de cualquier flujo gravitacional (piroclástico, de escombros, de lava). Las fuertes pendientes no son el único factor de riesgo, el material balístico, la dirección y velocidad del viento que influye en el arrastre de cenizas también lo son (Siebe, C et al 1996). De acuerdo al modelo de viento horizontal, basado en radio-sondeos globales de 15 años (1980-1995) de la base Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS) del European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF), se identificó que, en la zona de influencia del Popocatépetl, el campo de viento presenta variaciones a diferentes altitudes.

De 5,000 a 10,000 msnm, de octubre a mayo los vientos van hacia el este, este-noreste y noreste; de junio a septiembre hacia al oeste con variaciones al sureste, sur y suroeste. De 10,000 a 20,000 msnm, en los meses de octubre a abril los vientos van hacia el este y de junio a septiembre hacia el oeste y suroeste, pero en mayo la dirección de los vientos es variables. Arriba de los 20,000 msnm, de octubre a marzo los vientos van hacia el este y sureste, de abril a noviembre hacia el oeste; pero en los meses de marzo, noviembre y diciembre el viento también puede ir hacia el noreste.

La velocidad promedio del viento por debajo de los 20,000 msnm, es de 5 m/s, aunque en enero llega a presentar velocidades de 15 m/s. Arriba de los 20,000 msnm, el viento tiene velocidades entre 10 a 15 m/s, y en los meses de julio y septiembre puede alcanzar los 30 m/s, (Delgado et al., 2013).

## Materiales y métodos

El presente trabajo busca contribuir a las

zonas de riesgo, ubicadas en los alrededores del volcán Popocatepetl limitando la zona de estudio en un radio de 25 km, en el cual se localizó a través de imágenes satelitales 64 localidades en latente riesgo que en base a los históricos han tenido daños al menos por ceniza.

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron imágenes satelitales (Google Earth), Software Auto CAD y Civil CAD, programación Macro de Excel, entre otras herramientas.

Para el cálculo del volumen del edificio y cráter volcánico se consideró un diámetro de 7579.864 m en la base y un cráter de radio 798.254 m, además de un modelo de elipse con semieje mayor de 795 m y semieje menor de 595 m, con una altura máxima de 5413.16 msnm y mínima dentro del diámetro de la base de 3900 msnm para este análisis, por considerar una geomorfología de datos más práctica en cuanto a los datos manejados; se obtuvo una nube de puntos para su procesamiento en CAD mediante la importación de puntos Google Earth a CAD, existiendo una correlación exacta, como se puede ver en la figura 3, es decir se corrigió la triangulación con cortes de 50 a 100 m de desnivel y se delimito la base del edificio volcánico.

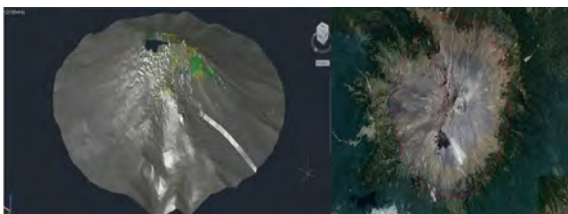


Figura 3. Nube de puntos, triangulación y vista 3D del levantamiento.

La metodología para calcular el volumen fue a través de curvas de nivel, iniciando su digitalización sobre la carta del INEGI, 2015

con clave E14B42 y con escala 1:50 000. Una vez digitalizadas las curvas de nivel, (véase figura 4) se procedió al cálculo del volumen del edificio volcánico.

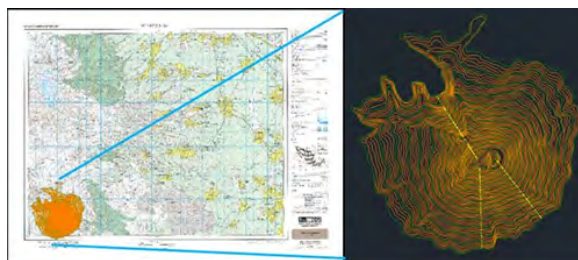


Figura 4. Digitalización de Curvas de Nivel a escala 1:50000 para determinar volumetría.

Para calcular el volumen a través de curvas de nivel de acuerdo con Alcántara (2014) se ocupó la fórmula 1 que nos proporcionará un volumen parcial entre dos curvas, es decir para tener un volumen total se necesita de un volumen acumulado como la sumatoria de los volúmenes parciales contiguos.

$$V = [A_1 + A_2] \left[ \frac{h}{2} \right] \quad (1)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son las superficies delimitadas por curvas de nivel contiguas,  $h$  es la equidistancia entre curvas de nivel. Por la cantidad de curvas de nivel generadas (figura 5) a cada 20 metros de desnivel entre la mínima 3900 msnm y la máxima 5413.16 msnm, se realizó una macro programada para el cálculo automático del volumen acumulado, como se puede analizar en la tabla 1.

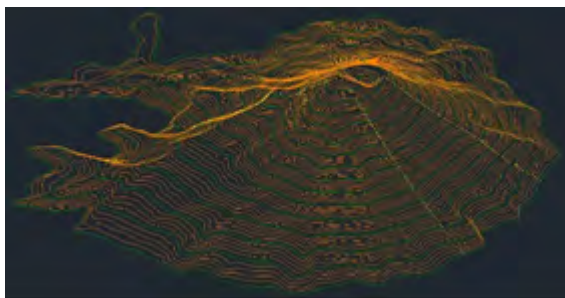


Figura 5. 3D de la digitalización de curvas de nivel.

## Zonas de riesgo

Para las zonas de riesgo del estudio se delimitó un radio de 25 km a la redonda tomando como referencia el centro del cráter con coordenadas  $X=539567.00$ ,  $Y=2103376.00$ ,  $Z=5169.16$  como se muestra en la figura 6, estipulado por las autoridades de Protección Civil de la República Mexicana.



Figura 6. Zonas de riesgo en un radio de 25 km.

## Aceleración de la gravedad

Para el cálculo de gravedad local y las anomalías se aplicó un sistema de información de gravedad desarrollado por el instituto de metrología de Alemania Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) que permite obtener la aceleración de gravedad en cualquier lugar del mundo mediante un modelo basado en la misión SRTM del Transbordador Espacial (Shuttle Radar Topography Mission) haciendo uso de la

latitud, longitud y altitud del punto en cuestión que para este caso fue la localización de cada zona de riesgo dentro del radio de 25 km. (Gravity Information System, 2017).

## Resultados y discusión

Para el cálculo automático solo se requirió la captura del área correspondiente a cada curva de nivel, el resultado del volumen dentro de las curvas cerradas fue de  $15,509,185,329.690 \text{ m}^3$  ( $15.51 \text{ km}^3$ ) como se ve en la tabla 1.

De manera detallada las áreas se obtuvieron en AutoCAD después de digitalizar las curvas de nivel de la carta 1:50 000, se captura en la macro en la columna ÁREAS, la columna A1+ A2 toma como A2 a la curva 5+380 puesto que esta es nuestra referencia inicial y no hay forma de calcular un volumen es por ello que se muestra tanto volumen parcial como acumulado, valores de cero, no así en la curva 5+360, ya que  $A1=9456.900 \text{ m}^2$  y  $A2=35161.24 \text{ m}^2$  y una distancia promedio entre curvas de 10 m (columna 4), el volumen parcial se genera como en la fórmula 1, sumatoria de áreas contiguas por un medio de la distancia que nos da  $446181.440 \text{ m}^3$  de volumen parcial que en este caso será igual al acumulado debido a que los volúmenes parciales anteriores son cero, a diferencia de la curva 5+340 ya que este volumen acumulado es la suma del acumulado anterior más su volumen parcial correspondiente a la curva 5+340 dándonos como resultado un volumen acumulado de  $1,562,901.640 \text{ m}^3$  de esta forma se calcula de manera concatenada para obtener el volumen total del edificio considerando solo curvas cerradas.

En la tabla 2 se observa la ubicación de las localidades que están dentro del radio ya

Tabla 1. Cálculo de volumen del volcán Popocatepetl

| CURVA    | ÁREAS<br>m <sup>2</sup> | A1+A2<br>m <sup>2</sup> | Dist<br>/2<br>m | VOL.<br>PARCIAL<br>m <sup>3</sup> | VOL.<br>ACUMULADO<br>m <sup>3</sup> |
|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 5+413.00 | 9456.900                | 9456.900                | 0               | 0.000                             | 0.000                               |
| 5+360.00 | 35161.24                | 44618.144               | 10              | 446181.440                        | 446181.440                          |
| 5+340.00 | 76510.78                | 111672.020              | 10              | 1116720.200                       | 1562901.640                         |
| 5+320.00 | 126204.8                | 202715.591              | 10              | 2027155.910                       | 3590057.550                         |
| 5+300.00 | 178235.3                | 304440.095              | 10              | 3044400.950                       | 6634458.500                         |
| 5+280.00 | 238155.7                | 416390.950              | 10              | 4163909.500                       | 10798368.000                        |
| 5+260.00 | 301838.8                | 539994.447              | 10              | 5399944.470                       | 16198312.470                        |
| 5+240.00 | 383776.5                | 685615.237              | 10              | 6856152.370                       | 23054464.840                        |
| 5+220.00 | 460969.9                | 844746.363              | 10              | 8447463.630                       | 31501928.470                        |
| 5+200.00 | 550312.3                | 1011282.155             | 10              | 10112821.550                      | 41614750.020                        |
| 5+180.00 | 657747                  | 1208059.273             | 10              | 12080592.730                      | 53695342.750                        |
| 5+160.00 | 1004606                 | 1662353.483             | 10              | 16623534.830                      | 70318877.580                        |
| 5+140.00 | 1124627                 | 2129233.944             | 10              | 21292339.440                      | 91611217.020                        |
| 5+120.00 | 1244303                 | 2368930.189             | 10              | 23689301.890                      | 115300518.910                       |
| 5+100.00 | 1405675                 | 2649977.547             | 10              | 26499775.470                      | 141800294.380                       |
| 5+080.00 | 1512288                 | 2917962.930             | 10              | 29179629.300                      | 170979923.680                       |
| 5+060.00 | 1617782                 | 3130070.077             | 10              | 31300700.770                      | 202280624.450                       |
| 5+040.00 | 1749306                 | 3367087.836             | 10              | 33670878.360                      | 235951502.810                       |
| 5+020.00 | 1893019                 | 3642325.325             | 10              | 36423253.250                      | 272374756.060                       |
| 5+000.00 | 2042639                 | 3935658.422             | 10              | 39356584.220                      | 311731340.280                       |
| 4+980.00 | 2201852                 | 4244490.773             | 10              | 42444907.730                      | 354176248.010                       |
| 4+960.00 | 2365205                 | 4567056.426             | 10              | 45670564.260                      | 399846812.270                       |
| 4+940.00 | 2570260                 | 4935464.295             | 10              | 49354642.950                      | 449201455.220                       |
| 4+920.00 | 2772240                 | 5342499.840             | 10              | 53424998.400                      | 502626453.620                       |
| 4+900.00 | 22971019                | 25743259.115            | 10              | 257432591.150                     | 760059044.770                       |
| 4+880.00 | 3182173                 | 26153191.670            | 10              | 261531916.700                     | 1021590961.470                      |
| 4+860.00 | 3393918                 | 6576090.869             | 10              | 65760908.690                      | 1087351870.160                      |
| 4+840.00 | 3631692                 | 7025610.639             | 10              | 70256106.390                      | 1157607976.550                      |
| 4+820.00 | 3869027                 | 7500719.854             | 10              | 75007198.540                      | 1232615175.090                      |
| 4+800.00 | 4122623                 | 7991650.159             | 10              | 79916501.590                      | 1312531676.680                      |
| 4+780.00 | 4337708                 | 8460330.910             | 10              | 84603309.100                      | 1397134985.780                      |
| 4+760.00 | 4596592                 | 8934300.153             | 10              | 89343001.530                      | 1486477987.310                      |
| 4+740.00 | 4878553                 | 9475145.150             | 10              | 94751451.500                      | 1581229438.810                      |
| 4+720.00 | 5159936                 | 10038489.091            | 10              | 100384890.910                     | 1681614329.720                      |
| 4+700.00 | 5474608                 | 10634543.823            | 10              | 106345438.230                     | 1787959767.950                      |
| 4+680.00 | 5762636                 | 11237243.958            | 10              | 112372439.580                     | 1900332207.530                      |
| 4+660.00 | 6072470                 | 11835106.328            | 10              | 118351063.280                     | 2018683270.810                      |
| 4+640.00 | 6406598                 | 12479068.192            | 10              | 124790681.920                     | 2143473952.730                      |

| <b>CURVA</b>           | <b>ÁREAS<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>A1+A2<br/>m<sup>2</sup></b> | <b>Dist<br/>/2<br/>m</b> | <b>VOL.<br/>PARCIAL<br/>m<sup>3</sup></b> | <b>VOL.<br/>ACUMULADO<br/>m<sup>3</sup></b> |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---|---|
| 4+620.00               | 6759722                        | 13166320.415                   | 10                       | 131663204.150                             | 2275137156.880                              |
| 4+600.00               | 7152763                        | 13912485.770                   | 10                       | 139124857.700                             | 2414262014.580                              |
| 4+580.00               | 7481074                        | 14633836.827                   | 10                       | 146338368.270                             | 2560600382.850                              |
| 4+560.00               | 7861115                        | 15342188.891                   | 10                       | 153421888.910                             | 2714022271.760                              |
| 4+540.00               | 5257061                        | 13118176.583                   | 10                       | 131181765.830                             | 2845204037.590                              |
| 4+520.00               | 8656787                        | 13913848.329                   | 10                       | 139138483.290                             | 2984342520.880                              |
| 4+500.00               | 9116350                        | 17773137.329                   | 10                       | 177731373.290                             | 3162073894.170                              |
| 4+480.00               | 9503181                        | 18619531.522                   | 10                       | 186195315.220                             | 3348269209.390                              |
| 4+460.00               | 9951617                        | 19454798.150                   | 10                       | 194547981.495                             | 3542817190.885                              |
| 4+440.00               | 10430004                       | 20381621.172                   | 10                       | 203816211.715                             | 3746633402.600                              |
| 4+420.00               | 10944111                       | 21374115.415                   | 10                       | 213741154.150                             | 3960374556.750                              |
| 4+400.00               | 11520997                       | 22465108.312                   | 10                       | 224651083.120                             | 4185025639.870                              |
| 4+380.00               | 12024091                       | 23545087.990                   | 10                       | 235450879.900                             | 4420476519.770                              |
| 4+360.00               | 12638515                       | 24662605.933                   | 10                       | 246626059.330                             | 4667102579.100                              |
| 4+340.00               | 13229713                       | 25868228.374                   | 10                       | 258682283.740                             | 4925784862.840                              |
| 4+320.00               | 13855358                       | 27085070.761                   | 10                       | 270850707.610                             | 5196635570.450                              |
| 4+300.00               | 14608080                       | 28463437.385                   | 10                       | 284634373.850                             | 5481269944.300                              |
| 4+280.00               | 16267576                       | 30875655.515                   | 10                       | 308756555.150                             | 5790026499.450                              |
| 4+260.00               | 16012891                       | 32280466.301                   | 10                       | 322804663.010                             | 6112831162.460                              |
| 4+240.00               | 16819517                       | 32832408.025                   | 10                       | 328324080.250                             | 6441155242.710                              |
| 4+220.00               | 17637405                       | 34456922.452                   | 10                       | 344569224.520                             | 6785724467.230                              |
| 4+200.00               | 18561837                       | 36199241.596                   | 10                       | 361992415.960                             | 7147716883.190                              |
| 4+180.00               | 19362744                       | 37924580.334                   | 10                       | 379245803.340                             | 7526962686.530                              |
| 4+160.00               | 20314914                       | 39677658.162                   | 10                       | 396776581.620                             | 7923739268.150                              |
| 4+140.00               | 21340455                       | 41655369.755                   | 10                       | 416553697.550                             | 8340292965.700                              |
| 4+120.00               | 22507098                       | 43847553.084                   | 10                       | 438475530.840                             | 8778768496.540                              |
| 4+100.00               | 23820120                       | 46327217.553                   | 10                       | 463272175.530                             | 9242040672.070                              |
| 4+080.00               | 25015789                       | 48835908.650                   | 10                       | 488359086.500                             | 9730399758.570                              |
| 4+060.00               | 26372158                       | 51387946.920                   | 10                       | 513879469.200                             | 10244279227.770                             |
| 4+040.00               | 27906474                       | 54278631.926                   | 10                       | 542786319.260                             | 10787065547.030                             |
| 4+020.00               | 29349995                       | 57256468.600                   | 10                       | 572564686.000                             | 11359630233.030                             |
| 4+000.00               | 30921866                       | 60271861.259                   | 10                       | 602718612.590                             | 11962348845.620                             |
| 3+980.00               | 32587691                       | 63509557.672                   | 10                       | 635095576.720                             | 12597444422.340                             |
| 3+960.00               | 34400516                       | 66988207.405                   | 10                       | 669882074.050                             | 13267326496.390                             |
| 3+940.00               | 36249717                       | 70650233.683                   | 10                       | 706502336.830                             | 13973828833.220                             |
| 3+920.00               | 38398543                       | 74648260.898                   | 10                       | 746482608.980                             | 14720311442.200                             |
| 3+900.00               | 40488845                       | 78887388.749                   | 10                       | 788873887.490                             | 15509185329.690                             |
| <b>VOLUMEN TOTAL =</b> |                                |                                |                          |   | <b>15509185329.690</b>                      |

**Tabla 2.** Zonas de riego delimitadas en radio de 25 km

| LUGAR                      | XUTM       | YUTM         | ZUTM     | Dist. al cráter (m) |
|----------------------------|------------|--------------|----------|---------------------|
| Popocatépetl               | 539,567.00 | 2,103,376.00 | 5,413.16 | 0                   |
| Tlamacas                   | 538,575.00 | 2,108,239.00 | 3,923.44 | 4963.15             |
| Paso de Cortés             | 537,168.00 | 2,110,455.00 | 3,694.64 | 7474.45             |
| Buena Vista                | 542,393.00 | 2,111,438.00 | 3,256.68 | 8542.96             |
| San Pedro Benito Juárez    | 547,016.00 | 2,095,060.00 | 2,394.55 | 11164.38            |
| San Juan Ocotepéc          | 547,573.00 | 2,094,212.00 | 2,299.99 | 12168.60            |
| Xalitziñtla                | 550,713.00 | 2,109,824.00 | 2,587.97 | 12876.72            |
| La Magdalena Yancuitlapan  | 543,655.00 | 2,090,891.00 | 2,308.28 | 13137.24            |
| San Pedro Nexapa           | 527,724.00 | 2,110,075.00 | 2,657.42 | 13606.37            |
| Ozolco                     | 550,862.00 | 2,111,889.00 | 2,586.75 | 14143.84            |
| Acatzingo                  | 526,104.00 | 2,096,287.00 | 2,438.58 | 15215.33            |
| Loma Verde                 | 524,688.00 | 2,099,949.00 | 2,433.08 | 15268.56            |
| San Baltazar Atlimeyaya    | 554,566.00 | 2,099,450.00 | 2,231.67 | 15504.31            |
| San Nicolás de Las Ranchos | 554,115.00 | 2,108,795.00 | 2,443.01 | 15524.49            |
| San Juan Tehuixtílán       | 524,304.00 | 2,106,753.00 | 2,502.53 | 15632.12            |
| Tochimilco                 | 545,024.00 | 2,088,713.00 | 2,083.47 | 15645.52            |
| San Miguel Tacuanipan      | 540,105.00 | 2,087,392.00 | 2,189.49 | 15993.05            |
| Atlautla                   | 523,320.00 | 2,104,097.00 | 2,419.87 | 16262.99            |
| El salto                   | 528,312.00 | 2,115,687.00 | 2,696.14 | 16680.40            |
| San Pedro                  | 527,398.00 | 2,091,925.00 | 2,532.92 | 16709.58            |
| Hueyapan                   | 532,546.00 | 2,088,211.00 | 2,340.96 | 16711.42            |
| San Diego Huehucalco       | 524,710.00 | 2,111,204.00 | 2,588.77 | 16793.09            |
| Tetela                     | 528,093.00 | 2,089,768.00 | 2,296.47 | 17799.73            |
| San Juan Tepecoculco       | 522,302.00 | 2,099,011.00 | 2,232.58 | 17808.24            |
| San Antonio Zoyatzingo     | 522,845.00 | 2,110,192.00 | 2,530.19 | 18057.77            |
| Santa María Atexcac        | 552,853.00 | 2,115,717.00 | 2,600.31 | 18133.34            |
| San Jerónimo Coyula        | 550,900.00 | 2,089,181.00 | 1,966.41 | 18164.11            |
| Ozumba de Alzate           | 521,465.00 | 2,104,989.00 | 2,362.18 | 18173.72            |
| San Tiago Mamalhuazuca     | 521,526.00 | 2,100,311.00 | 2,228.24 | 18299.51            |
| Amecameca de Juárez        | 524,541.00 | 2,114,388.00 | 2,509.69 | 18629.14            |
| San Andrés Calpan          | 555,957.00 | 2,112,653.00 | 2,446.63 | 18833.34            |
| Huechahuasco               | 522,906.00 | 2,093,991.00 | 2,167.65 | 19122.43            |
| Tianguismanalco            | 558,041.00 | 2,098,205.00 | 2,163.32 | 19184.05            |
| Huejotengo                 | 525,948.00 | 2,089,671.00 | 2,253.32 | 19321.08            |
| San Juan Tlacotompa        | 522,035.00 | 2,094,340.00 | 2,146.42 | 19723.60            |
| Jumiltepec                 | 523,724.00 | 2,091,348.00 | 2,256.65 | 19891.54            |
| San Andrés Tlamac          | 520,415.00 | 2,097,284.00 | 2,134.29 | 20097.55            |
| Nepopualco                 | 553,649.00 | 2,117,833.00 | 2,568.84 | 20181.86            |
| San Francisco Huilango     | 544,226.00 | 2,083,640.00 | 1,998.05 | 20278.46            |



| LUGAR                       | XUTM       | YUTM         | ZUTM     | Dist. al cráter<br>(m) |
|-----------------------------|------------|--------------|----------|------------------------|
| Texcala                     | 521,473.00 | 2,093,604.00 | 2,050.97 | 20564.16               |
| San Juan Tejupa             | 548,529.00 | 2,084,525.00 | 1,876.15 | 20872.89               |
| Tepetlixpa                  | 518,679.00 | 2,103,869.00 | 2,324.57 | 20893.82               |
| San Buena Ventura Nealtican | 560,304.00 | 2,106,667.00 | 2,258.66 | 20996.52               |
| San Juan Amecac             | 535,966.00 | 2,082,674.00 | 2,123.64 | 21012.85               |
| Domingo Arenas              | 556,236.00 | 2,116,245.00 | 2,433.90 | 21058.65               |
| San Antonio Tlaltecahuacan  | 524,024.00 | 2,118,003.00 | 2,496.68 | 21343.24               |
| San Antonio Tlatenco        | 553,094.00 | 2,120,096.00 | 2,556.79 | 21506.70               |
| San Francisco Zentlapan     | 522,508.00 | 2,117,369.00 | 2,466.38 | 22063.85               |
| Ayapango                    | 520,788.00 | 2,115,223.00 | 2,451.87 | 22203.65               |
| San Cristobal Poxtla        | 521,170.00 | 2,115,963.00 | 2,448.79 | 22290.85               |
| Santiago Atzitzihuacan      | 544,085.00 | 2,081,369.00 | 1,913.19 | 22465.98               |
| Ocuituco                    | 523,808.00 | 2,087,305.00 | 1,937.78 | 22508.29               |
| Atlixco                     | 557,936.00 | 2,089,855.00 | 1,877.22 | 22808.72               |
| Tetepetla                   | 519,633.00 | 2,115,295.00 | 2,441.98 | 23225.57               |
| Nepantla de Sor Juana I.C.  | 516,738.00 | 2,098,762.00 | 2,026.02 | 23290.60               |
| San Mateo Cuaptepec         | 536,571.00 | 2,080,249.00 | 2,051.06 | 23320.25               |
| San Miguel Aguacomulcan     | 547,271.00 | 2,081,281.00 | 1,807.52 | 23399.59               |
| San Jerónimo Tecuanipan     | 563,180.00 | 2,102,292.00 | 2,142.76 | 23637.87               |
| Atzacaloya                  | 526,892.00 | 2,123,668.00 | 2,862.71 | 23925.32               |
| San Francisco Xochiteopan   | 539,731.00 | 2,079,386.00 | 2,016.58 | 23990.56               |
| San Nicolás Zecoalacuayan   | 553,801.00 | 2,122,861.00 | 2,465.06 | 24130.31               |
| San Rafael                  | 525,911.00 | 2,124,183.00 | 2,625.94 | 24888.10               |
| San Matías Cuijingo         | 515,564.00 | 2,109,995.00 | 2,490.36 | 24898.90               |
| Santa María Acuexcomac      | 564,647.00 | 2,105,243.00 | 2,173.31 | 25149.40               |
| Xochitlan                   | 519,199.00 | 2,087,826.00 | 1,768.76 | 25625.34               |

mencionado, ordenados de menor a mayor distancia de alejamiento del cráter, calculado en base a las coordenadas de proyección UTM zona 14Q, es decir la distancia horizontal respecto al cráter.

Una actividad explosiva del volcán puede expulsar fragmentos de roca y lava en una trayectoria más o menos parabólica que se modifica por una fuerza de arrastre lo que provoca que las caídas de estos fragmentos conocidos como proyectiles balísticos sean más verticales que parabólicos lo que repercute en la fuerza de impacto. (Martin Del Pozzo et al., 2018).

Con base en los registros de impacto recuperados desde noviembre de 1994 a marzo de 2019 por USGS (United States Geological Survey) se han identificado históricamente 123 cráteres de impacto de menos de un metro de diámetro, de los cuales solo 65 han podido ser medidos; el cráter de impacto aumenta respecto al tamaño del balístico en promedio de 4-5 veces el diámetro como se muestra en la figura 7.

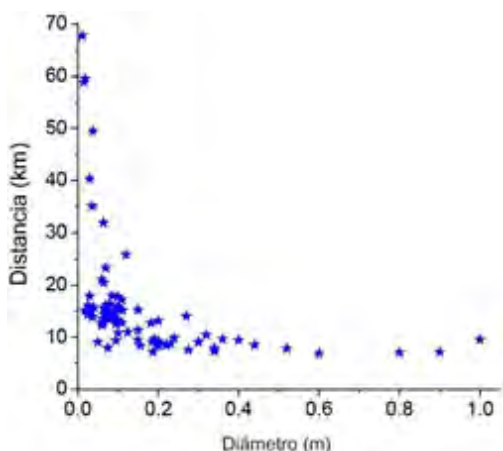


Figura 7. Fragmentos líticos encontrados en el depósito precámbrico de la erupción Pliniana de hace 14,000 años reportados por Sosa Ceballos et al. (2012) donde se muestra la relación de la distancia al cráter con diámetro máximo.

## Estudio gravimétrico

La aceleración de la gravedad se utiliza cuando el objeto de estudio es el campo de gravedad o las variaciones de densidad, las cuales son responsables de la variación de dicho campo (Arce et al., 2015).

De acuerdo con el Instituto Geográfico Nacional de España (2016) a través de la medición de pequeñas variaciones en el campo gravitatorio (anomalías gravitacionales) es posible detectar procesos geodinámicos en el interior de la corteza terrestre, incluido los movimientos del magma.

Para calcular la anomalía del aire libre se determinó la diferencia entre el valor de gravedad observado y el valor de gravedad teórico corregido por la altura del valor medido de gravedad ( $g$ ) con respecto a una superficie de referencia mediante la aplicación de una corrección del gradiente de gravedad normal; además se calculó la anomalía de Bouguer, tomando en cuenta la variación de la gravedad con la altura, así como las masas presentes entre el punto de observación y el geoide como superficie de referencia. Al aplicar esta corrección, la anomalía restante es representativa de cambios de densidad a nivel cortical y cambios de grosor en la corteza terrestre. La anomalía de Bouguer es generalmente negativa, (Hirt., et al 2019) como se puede ver en la tabla 3.

Adicionalmente se realizaron perfiles topográficos de las 64 localidades (se presentan solo algunos perfiles) trazando una pendiente promedio como se ve en la figura 8 a la 13, tomando el centro del cráter a la comunidad respectiva.

Cabe aclarar que se presenta una pendiente negativa en los perfiles debido a que hace referencia a la pendiente en descenso, es decir,

**Tabla 3.** Gravedad y anomalías de Bouguer y aire libre en 64 localidades cercanas al volcán Popocatépetl.

| Lugar                         | Latitud<br>° | Longitud<br>° | Altura<br>SNM | Gravedad<br>local<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de<br>Bouguer<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de aire<br>libre<br>m/s <sup>2</sup> |
|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---|--|
| Popocatépetl                  | 19.022651    | -98.624017    | 5,413.16      | 9.772510                              | -0.002131                                     | 0.002635   |
| Tlamacas                      | 19.066619    | -98.633347    | 3,923.44      | 9.775688                              | -0.002223                                     | 0.001951   |
| Paso de Cortés                | 19.086672    | -98.646678    | 3,694.64      | 9.776205                              | -0.002252                                     | 0.001751   |
| Buena Vista                   | 19.095453    | -98.596988    | 3,256.68      | 9.777049                              | -0.002292                                     | 0.001240   |
| San Pedro<br>Benito Juárez    | 18.947338    | -98.553436    | 2,394.55      | 9.779191                              | -0.001813                                     | 0.000807   |
| San Juan<br>Ocoatepec         | 18.939661    | -98.548166    | 2,299.99      | 9.779414                              | -0.001780                                     | 0.000743   |
| Xalitzintla                   | 19.080677    | -98.517937    | 2,587.97      | 9.778593                              | -0.002117                                     | 0.000732   |
| La Magdalena<br>Yancuitlapan  | 18.909734    | -98.585451    | 2,308.28      | 9.779375                              | -0.001777                                     | 0.000745   |
| San Pedro<br>Nexapa Nexapa    | 19.083388    | -98.736458    | 2,657.42      | 9.778447                              | -0.002114                                     | 0.000798   |
| Ozolco                        | 19.099336    | -98.516467    | 2,586.75      | 9.778565                              | -0.002152                                     | 0.000689   |
| Ecatzingo                     | 18.958799    | -98.752042    | 2,438.58      | 9.779108                              | -0.001818                                     | 0.000853   |
| Loma Verde                    | 18.991912    | -98.765446    | 2,433.08      | 9.778967                              | -0.001994                                     | 0.000677   |
| San Baltazar<br>Atlimeyaya    | 18.986825    | -98.481604    | 2,231.67      | 9.779479                              | -0.001894                                     | 0.000571   |
| San Nicolás<br>de Las Ranchos | 19.071291    | -98.485629    | 2,443.01      | 9.778977                              | -0.002028                                     | 0.000673   |
| San Juan<br>Tehuixtitlán      | 19.053409    | -98.769010    | 2,502.53      | 9.778832                              | -0.002034                                     | 0.000722   |
| Tochimilco                    | 18.890021    | -98.572501    | 2,083.47      | 9.779830                              | -0.001774                                     | 0.000518   |
| San Miguel<br>Tacuanipan      | 18.878184    | -98.619233    | 2,189.49      | 9.779574                              | -0.001809                                     | 0.000595   |
| Atlautla                      | 19.029416    | -98.778394    | 2,419.87      | 9.779038                              | -0.001980                                     | 0.000687   |
| El salto                      | 19.134098    | -98.730786    | 2,696.14      | 9.778256                              | -0.002233                                     | 0.000698   |
| San Pedro                     | 18.919360    | -98.739812    | 2,532.92      | 9.778962                              | -0.001745                                     | 0.001020   |
| Hueyapan                      | 18.885719    | -98.690986    | 2,340.96      | 9.779350                              | -0.001731                                     | 0.000835   |
| San Diego<br>Huehualco        | 19.093630    | -98.765094    | 2,588.77      | 9.778621                              | -0.002097                                     | 0.000755   |
| Tetela                        | 18.899856    | -98.733243    | 2,296.47      | 9.779447                              | -0.001732                                     | 0.000787   |
| San Juan<br>Tepecoculco       | 18.983462    | -98.788126    | 2,232.58      | 9.779513                              | -0.001847                                     | 0.000609   |
| San Antonio<br>Zoyatzingo     | 19.084506    | -98.782836    | 2,530.19      | 9.778784                              | -0.002052                                     | 0.000742   |

| Lugar                         | Latitud<br><i>o</i> | Longitud<br><i>o</i> | Altura<br>SNM | Gravedad<br>local<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de<br>Bouger<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de aire<br>libre<br>m/s <sup>2</sup> |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|---------------|---------------------------------------|--|--|
| Santa María<br>Atexcac        | 19.133879           | -98.497435           | 2,600.31      | 9.778577                              | -0.002149                                    | 0.000723   |
| San Jerónimo<br>Coyula        | 18.894114           | -98.516698           | 1,966.41      | 9.780162                              | -0.001688                                    | 0.000486   |
| Ozumba de<br>Alzate           | 19.037498           | -98.796011           | 2,362.18      | 9.779174                              | -0.001968                                    | 0.000640   |
| San Tiago<br>Mamalhuazuca     | 18.995219           | -98.795483           | 2,228.24      | 9.779474                              | -0.001904                                    | 0.000550   |
| Amecameca<br>de Juárez        | 19.122407           | -98.766660           | 2,509.69      | 9.778780                              | -0.002112                                    | 0.000653   |
| San Andrés<br>Calpan          | 19.106106           | -98.468009           | 2,446.63      | 9.778973                              | -0.002049                                    | 0.000661   |
| Huechahuasco                  | 18.938087           | -98.782446           | 2,167.65      | 9.779687                              | -0.001774                                    | 0.000607   |
| Tianguismanalco               | 18.975478           | -98.448628           | 2,163.32      | 9.779649                              | -0.001826                                    | 0.000536   |
| Huejotengo                    | 18.899008           | -98.753612           | 2,253.32      | 9.779534                              | -0.001730                                    | 0.000741   |
| San Juan<br>Tlacotompa        | 18.941250           | -98.790715           | 2,146.42      | 9.779728                              | -0.001775                                    | 0.000582   |
| Jumiltepec                    | 18.914191           | -98.774709           | 2,256.65      | 9.779528                              | -0.001736                                    | 0.000737   |
| San Andrés<br>Tlamac          | 18.967874           | -98.806071           | 2,134.29      | 9.779760                              | 6-0.001785                                   | 0.000562   |
| Nepopualco                    | 19.152981           | -98.489808           | 2,568.84      | 9.778692                              | -0.002108                                    | 0.000732   |
| San Francisco<br>Huilango     | 18.844191           | -98.580192           | 1,998.05      | 9.779994                              | -0.001760                                    | 0.000443   |
| Texcala                       | 18.934604           | -98.796061           | 2,050.97      | 9.779931                              | -0.001761                                    | 0.000494   |
| San Juan<br>Tejupa            | 18.852093           | -98.539326           | 1,876.15      | 9.780287                              | -0.001720                                    | 0.000357   |
| Tepetlixpa                    | 19.027403           | -98.822498           | 2,324.57      | 9.779285                              | -0.001929                                    | 0.000640   |
| San Buena<br>Ventura Nealtica | 19.051886           | -98.426869           | 2,258.66      | 9.779427                              | -0.001941                                    | 0.000566   |
| San Juan<br>Amecac            | 18.835621           | -98.658615           | 2,123.64      | 9.779843                              | -0.001660                                    | 0.000685   |
| Domingo Arenas                | 19.138560           | -98.465253           | 2,433.90      | 9.779054                              | -0.002012                                    | 0.000685   |
| San Antonio<br>Tlaltecahuacan | 19.155084           | -98.771531           | 2,496.68      | 9.778766                              | -0.002166                                    | 0.000581   |
| San Antonio<br>Tlatenco       | 19.173447           | -98.495023           | 2,556.79      | 9.778697                              | -0.002140                                    | 0.000687   |
| San Francisco<br>Zentlapan    | 19.149371           | -98.785956           | 2,466.38      | 9.778849                              | -0.002149                                    | 0.000573   |
| Ayapango                      | 19.129995           | -98.802335           | 2,451.87      | 9.778921                              | -0.002101                                    | 0.000612   |



| Lugar                         | Latitud<br>° | Longitud<br>° | Altura<br>SNM | Gravedad<br>local<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de<br>Bouger<br>m/s <sup>2</sup> | Anomalia<br>de aire<br>libre<br>m/s <sup>2</sup> |
|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------------------|--|--|
| San Cristobal<br>Poxtla       | 19.136679    | -98.798695    | 2,448.79      | 9.778919                              | -0.002111                                    | 0.000597   |
| Santiago<br>Atzitzihuacan     | 18.823670    | -98.581581    | 1,913.19      | 9.780262                              | -0.001651                                    | 0.000462   |
| Ocuituco                      | 18.877650    | -98.773961    | 1,937.78      | 9.780192                              | -0.001695                                    | 0.000437   |
| Atlixco                       | 18.900020    | -98.449873    | 1,877.22      | 9.780329                              | -0.001708                                    | 0.000375   |
| Tetepetla                     | 19.130657    | -98.813317    | 2,441.98      | 9.778950                              | -0.002093                                    | 0.000610   |
| Nepantla de<br>Sor Juana I.C. | 18.981265    | -98.840987    | 2,026.02      | 9.780002                              | -0.001766                                    | 0.000462   |
| San Mateo<br>Cuapatepec       | 18.813694    | -98.652918    | 2,051.06      | 9.780004                              | -0.001632                                    | 0.000634   |
| San Miguel<br>Aguacomulcan    | 18.822804    | -98.551345    | 1,807.52      | 9.780458                              | -0.001668                                    | 0.000333   |
| San Jerónimo<br>Tecuanipan    | 19.012262    | -98.399679    | 2,142.76      | 9.779746                              | -0.001833                                    | 0.000549   |
| Atzacoyaloya                  | 19.206245    | -98.744178    | 2,862.71      | 9.777975                              | -0.002232                                    | 0.000890   |
| San Francisco<br>Xochiteopan  | 18.805836    | -98.622945    | 2,016.58      | 9.780083                              | -0.001617                                    | 0.000611   |
| San Nicolás<br>Zecoalacuayan  | 19.198416    | -98.488222    | 2,465.06      | 9.778871                              | -0.002165                                    | 0.000564   |
| San Rafael                    | 19.210912    | -98.753503    | 2,625.94      | 9.778447                              | -0.002228                                    | 0.000629   |
| San Matías<br>Cuijingo        | 19.082794    | -98.852050    | 2,490.36      | 9.778896                              | -0.002022                                    | 0.000732   |
| Santa María<br>Acuexcomac     | 19.038884    | -98.385643    | 2,173.31      | 9.779683                              | -0.001852                                    | 0.000566   |
| Xochitlan                     | 18.882407    | -98.817714    | 1,768.76      | 9.780545                              | -0.001685                                    | 0.000267   |

se tomó como pendiente promedio del punto central del cráter del Popocatepetl al punto en cuestión de la localidad, por ejemplo, para el perfil de la figura 8 se descenderá 19.7274m verticales por cada 100 m horizontales.

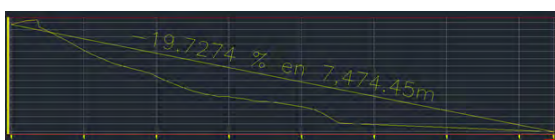


Figura 8. Perfil Paso de Cortés.

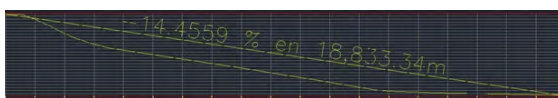


Figura 9. Perfil San Andrés Calpan.

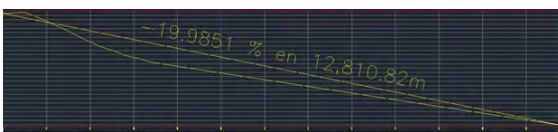


Figura 10. Perfil Xalitzintla.



Figura 11. Perfil San Nicolás de los Ranchos.



Figura 12. Perfil San Baltazar Atlimeyaya.

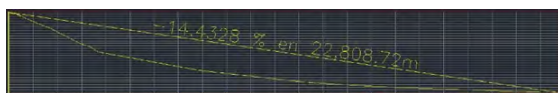


Figura 13. Perfil Atlixco.

Análisis de las figuras 8 a la 13: Las distancias calculadas con base en coordenadas de

una proyección, una pendiente promedio y un perfil, amplían el panorama en cuanto el riesgo que corren las poblaciones cercanas al volcán, por la relación distancia-pendiente: a menor distancia y mayor pendiente mayor riesgo, a mayor distancia y menor pendiente menor riesgo aunque en los peores escenarios un colapso del edificio volcánico desplazaría material a unos 80 km, con una destrucción total, (Ramos et al., 2018), pero las áreas de mayor afectación serían las que se mencionan en la tabla 3 por la cercanía al cráter y las pendientes pronunciadas. Los perfiles analizados muestran que el riesgo volcánico debido a la topografía del terreno, respecto a la relación pendiente-distancia de las comunidades en orden decreciente es: Xalitzintla, San Baltazar Atlimeyaya, San Nicolás de los Ranchos, San Andrés Calpan y Atlixco. Pero, la región de Atlixco es la comunidad más vulnerable por riesgo volcánico debido a su densidad poblacional, aunque los flujos de material piroclástico y ceniza volcánica llegarían más rápido a las otras comunidades.

## Conclusiones

Este trabajo pretende contribuir a los mapas de riesgo generados por las dependencias de Protección Civil de los Estados cercanos al volcán Popocatepetl; determinando las zonas de riesgo, ubicadas en un radio de 25 km; este análisis se realizó con fundamento al convenio que se tiene entre la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y BITS-Geospacial, por lo que fue posible utilizar imágenes satelitales de la plataforma PLANET de la constelación SkySat a 80 cm y poder determinar con exactitud 64 localidades con riesgo latente no sólo en la caída de cenizas sino en un posible flujo piroclástico y lahar que pudiera afectar inmediatamente a las comunidades determi-

nadas.

A través del análisis cartográfico se pudieron definir las características morfológicas del volcán con un modelo ideal de forma elíptica, cuya elevación máxima del cono volcánico se calculó en 5413.16 msnm en la curva máxima cerrada por medio de cartografía digital e imágenes satelitales; de manera similar se obtuvo el volumen del volcán de 15.51 km<sup>3</sup>, calculado para la fecha en que se realizó la digitalización de la carta INEGI.

Se tomó en cuenta la actividad presente en este primer cuatrimestre del 2019 que ha modificado micrométricamente su estructura por el material piroclástico emanado.

El estudio gravimétrico realizado sirvió para determinar las anomalías gravimétricas que contribuyen a determinar las variaciones de densidad y en los procesos geodinámicos (cambios de densidad a nivel cortical y cambios de grosor en la corteza terrestre) que puedan contribuir a una aceleración de algún elemento volcánico como nube ardiente o flujos de lahar.

En la tabla 3 con la aceleración de la gravedad en puntos importantes, se presentan dos tipos de anomalías, Bouger y aire libre, que probablemente son imperceptibles pero útiles en el análisis de la dinámica subcortical generado por actividad volcánica en los riesgos mencionados.

Finalmente se tiene que mencionar que los trabajos son apoyados por el grupo interdisciplinario de la Facultad de Ingeniería, el Instituto de Ciencias y la Vicerrectoría de Investigación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Proyecto financiado por la Vicerrectoría de

Investigación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (clave 100409011-VIEP2018-19).

## Referencias

- [1] Franco Ramos, O., Vázquez Selem, L., Zamorano Orozco, J. y Villanueva Díaz, J. (2017). “Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancas en el sector norte del volcán Popocatépetl, México”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. (69), UNAM, México, pp. 1-19.
- [2] Macías, J.L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 3, 395–399.
- [3] Alcántara García, Dante, (2014). “Topografía y sus aplicaciones”, Ed. Patria, primera edición, México, pp. 129-184.
- [4] Espinasa-Pereña, R. (2012). Historia de la actividad del volcán Popocatépetl. 17 años de erupciones. Recuperado el 21 de junio de 2019 de <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-historiadelaactividaddelvolcanpopocatpetl-17aosdeerupciones.pdf>.
- [5] Martin Del Pozzo A. L. y Alatorre Ibarquengoitia M. (2018). “Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatépetl”, Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatépetl. Monografías instituto de geofísica, vol. 22, México.
- [6] Delgado Granados H., Valdéz González C y Ramos Jiménez E. (2013). Las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la aeronavegación infraestructura aeroportuaria. CENAPRED, Instituto de Geofísica, UNAM, México, pp. 20-61.

- [7] Gravity Information System. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2017, Germany. Disponible en línea: [www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php](http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php)
- [8] Sosa Ceballos G., Gardner J.E., Siebe C. and Macías J.L., (2012). “A caldera forming eruption 14,100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*”, vol. (213), Elsevier, USA, pp. 27-40.
- [9] Arce G. J.L., Sosa Ceballos, J. L., Macías, García Tenorio, F., Layer P., Schaaf P. and Solís Pichardo G. (2015). “El Ventorrillo, a paleostructure of Popocatepetl volcano: insights from geochronology and geochemistry”, *Bulletin of Volcanology*, vol. (310), Springer, USA, pp. 77-91.
- [10] Instituto Geográfico nacional de España. La vulcanología es multiparamétrica, 14 de octubre de 2016, disponible en línea: <http://www.multiteide.es/2016/10/la-vulcanologia-multiparametrica/>
- [11] Hirt, C., Bucha, B., Yang, M. and Kuhn, M. (2019). “A numerical study of residual terrain modelling (RTM) techniques and the harmonic correction using ultra-high-degree spectral gravity modelling”. *Journal of Geodesy*, vol. (44), Springer, Switzerland, pp. 1-18.
- [12] Ramos Aguilar, R. et al. (2018). “Photogrammetric follow-up of the Popocatepetl volcano exhalations, in Mexico, during the year 2016”. *Investigación y Ciencia*, vol. (73), UAA, México, pp. 37-48.
- [13] Cortés Ramos, J., and Delgado Granados, H. (2012). “The recent retreat of Mexican glaciers on Citlaltépetl Volcano detected using ASTER data. *The Cryosphere Discussions*”, UGM, vol. (6), México, pp. 3149-3176.
- [14] García, F., Ramos, E., and Domínguez, R. (1996). “Posible flujo de lodo en el costado oriente del volcán Popocatepetl. En *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995*”. CENAPRED, UNAM, México, pp. 109-119.
- [15] Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M; Obenholzner, J., 1996, La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatepetl: *Ciencias*, 41, 36-45.
- [17] INEGI, Topografía. (2015), Recuperado el 08 de febrero de 2019: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>