

APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA BASADA EN TIG AL SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL CRÁTER ACTIVO DEL POPOCATÉPETL (MÉXICO, 1994-2003)

NURIA ANDRÉS DE PABLO
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC.
C/ Serrano, 115, bis. 28006 Madrid, España.
nuriand@mncn.csic.es

RESUMEN

El presente trabajo presenta una metodología basada en las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) donde se combinan tratamientos tradicionales, como la fotointerpretación, con procedimientos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para realizar un seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del volcán Popocatepetl (19°03' N; 98°35' O; 5424 m). Tras sesenta y siete años de quietud, el Popocatepetl entró de nuevo en erupción en diciembre de 1994 y sus mayores episodios eruptivos se produjeron en abril de 1995, julio de 1997, diciembre de 2000 y enero de 2001, asociados al crecimiento y destrucción de domos de lava en el cráter. La actividad remitió a partir de 2003. Tras un minucioso análisis geomorfológico y morfométrico de una serie temporal de fotografías aéreas se han diferenciado cuatro fases en las que se relacionan las formas observadas con el tipo de actividad volcánica: pre-eruptiva, destructiva, constructiva y muy destructiva. Además se ha observado que entre 1994 y 2003 el cráter se rellenó con $6,78 \times 10^6 \text{ m}^3$ de material, con una elevación media del fondo de 17 m.

Palabras clave: cráter, TIG, MDE, SIG, fotografías aéreas, geomorfología volcánica, Popocatepetl.

APPLICATION OF A GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES (GIT) BASED METHOD TO MONITORING THE GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION OF POPOCATÉPETL ACTIVE CRATER (MEXICO, 1994-2003)

ABSTRACT

This paper presents a methodology based on Geographic Information Technologies (GIT), which combines traditional treatments, such as photo-interpretation, with Geographic Information

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Systems (GIS) based procedures to control the geomorphological evolution of the active crater Popocatepetl volcano (19 ° 03 'N, 98 ° 35' W, 5424 m). Following 67 years of calm, Popocatepetl resumed activity in December 1994. The most significant eruptive episodes occurring in April 1995, July 1997, December 2000 and January 2001, associated with domes building and destruction. The activity subsided from 2003. After a detailed geomorphological and morphometric analysis of aerial photograph series, the paper identifies four development phases in which the forms observed are related to the type of volcanic activity: pre-eruptive, destructive, constructive and highly destructive. It has also been observed that the crater was filled with $6.78 \times 10^6 \text{ m}^3$ of material between 1994 and 2003, with an average bottom elevation of 17 m.

Keywords: crater, GIT, DEM, GIS, aerial photographs, volcanic geomorphology, Popocatepetl.

1. Introducción

Las modificaciones en el aspecto externo de un volcán pueden ser síntoma de una determinada actividad volcánica. Así, por ejemplo, se han observado numerosos volcanes en los que la actividad está vinculada a fases de construcción-destrucción de domos y en los que el colapso del domo ha desencadenado una situación de amenaza natural (St. Helens, 1980; Unzen, 1991-95; Merapi, varias fechas; Galunggung, 1982-83; Soufriere Hills, 1995-98). Según esto, la observación y análisis de la evolución morfológica y morfométrica de un aparato volcánico activo se ha convertido en un medio eficaz para establecer patrones de comportamiento y valorar adecuadamente la amenaza que puede suponer el volcán al área circundante. En especial, resulta de suma utilidad establecer un seguimiento pormenorizado de las variaciones que experimenta un cráter activo, ya que éstas se pueden relacionar con otras manifestaciones, como temores o emisiones de diferentes gases.

Las técnicas de estudio para la detección de variaciones morfológicas en volcanes varían desde el simple trabajo de campo, pasando por el análisis de datos proporcionados por aparatos instalados sobre los volcanes (por ejemplo, clinómetros), hasta la manipulación de la información adquirida a través de percepción remota. Dentro de esta última línea se encuadran las investigaciones cuyo fin consiste en identificar y cartografiar estructuras volcánicas difíciles de reconocer en el campo o situadas en lugares inaccesibles, como por ejemplo el trabajo de Kouli y Seymour (2006), que emplea una serie de imágenes Landsat-TM (*Landsat Thematic Mapper*) y SPOT-Pan (*Satellite Positioning and Tracking - Panchromatic*), o el estudio de Ulusoy *et al.* (2004) con imágenes SPOT combinadas con modelos de elevación. La información adquirida a partir de satélites también se ha manejado para inferir velocidades de extrusión de lavas en los complejos domáticos. Este es el caso, entre otras, de las investigaciones llevadas a cabo por Harris *et al.* (2002) a partir de una serie temporal de imágenes Landsat; las de Ramsey *et al.*, (2003), mediante el uso de los datos de alta resolución espacial del sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), y las de Adleman *et al.* (2004) y Adleman (2005), con el manejo de datos del ASTER combinados con otros obtenidos en trabajos de campo.

Entre la información obtenida por sensores remotos hay que destacar la importancia de las fotografías oblicuas y aéreas. Donnadieu *et al.* (2003) analizan y validan la aplicación de técnicas

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

fotogramétricas al estudio de las variaciones de distintas formas volcánicas y otros autores han empleado estas técnicas con éxito (Koch *et al.*, 2004; Pavez *et al.*, 2006; Procter *et al.*, 2006, entre otros).

En cuanto a las áreas de observación, de especial relevancia resultan las investigaciones llevadas a cabo en volcanes cuya actividad está vinculada a fases de construcción-destrucción de domos en su cráter, asociadas a fenómenos peligrosos. Entre los estudios que analizan la evolución morfológica y morfométrica de sus cráteres destacan los desarrollados en las Soufriere Hills (Montserrat) y en el St. Helens (EE.UU.). En el primer caso, el Observatorio Volcánico de Montserrat (MVO, creado tras la erupción del 18 de julio de 1995) realiza con regularidad medidas topográficas del domo con telémetros de alta precisión (*Electronic Distance Measurement*, EDM), desde tierra o desde helicóptero, así como restituciones de fotografías aéreas, con el fin de cuantificar el volumen del domo y sus tasas de crecimiento (MVO Staff, 1999; Watts *et al.*, 2002). A partir de 2004 las medidas topográficas del cráter se realizan además con el sistema AVTIS (*All-weather Volcano Topography Imaging Sensor*) (Wadge *et al.*, 2005; Loughlin *et al.*, 2007) y se añade la instrumentación LIDAR (*Light Detection and Ranging*) (Jones, 2005; SAC, 2007).

En el segundo caso, el *U. S. Geological Survey* y la Universidad de Washington se encargan de monitorizar el volcán St. Helens, con especial atención al cráter. Aquí, los trabajos realizados a partir de las fotografías aéreas y de fotografías oblicuas tomadas desde puntos fijos en tierra resultaron ser eficaces para determinar el crecimiento del domo y predecir episodios de crecimiento (Iwastubo y Swanson, 1992; Topinka, 1992; Yamashita y Kaisier, 1992; Brantley y Miers, 2000; Schilling *et al.*, 2006; Major *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2009). Aunque también se emplearon otras técnicas para la obtención de datos como las imágenes LIDAR (Haugerud *et al.*, 2004a; y Haugerud *et al.*, 2004b) o las imágenes InSAR (*Satellite interferometric Synthetic Aperture Radar*) (Dzurisin *et al.*, 2009; Poland y Lu, 2008).

Un repaso pormenorizado a los últimos trabajos que tratan las variaciones morfológicas en distintos volcanes (Andrés, 2011) muestra que, si bien la aplicación de las últimas tecnologías de percepción remota (radiómetros, lectores radar, instrumentación LIDAR, etc.) ofrecen datos de alta precisión, los mejores resultados se obtienen cuando se combinan con técnicas fotogramétricas (SAC, 2007; Dzurisin *et al.*, 2008; Dzurisin *et al.*, 2009) y que estas últimas por sí solas siguen manteniendo su validez (Donnadieu *et al.*, 2003), como demuestran trabajos recientes (Schilling *et al.*, 2006; Major *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2009), con la ventaja de que no requieren una elevada financiación.

2. Objetivos

Ante la necesidad de realizar un seguimiento de la evolución del cráter para establecer patrones de comportamiento en relación con la actividad y llevar a cabo una prevención adecuada de la amenaza volcánica en los alrededores del volcán, se plantea la elección de la metodología más adecuada para el tratamiento de la información. Ésta depende en gran medida del tipo de información de partida, en consonancia con los recursos económicos que se puedan invertir y con el tipo de actividad volcánica, y con las características del aparato volcánico (accesibilidad, grado de

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

riesgo en la aproximación, morfometría, etc.). El objetivo del artículo se centra en presentar una metodología que integra teorías y técnicas propias del conocimiento geográfico mediante una aplicación práctica a un caso real: el seguimiento de los cambios geomorfológicos sucedidos en el cráter del Popocatepetl (México) entre 1994 y 2003. Para ello se presenta en primer lugar el área de estudio, cuyas características (en especial, tipo de actividad y accesibilidad) condicionan el tipo, la cantidad y la calidad de la información. Particularmente, la documentación gráfica queda supeditada a los medios económicos y técnicos de los gestores responsables de este área natural, que han puesto a nuestra disposición su colección de fotografías aéreas e informes escritos con las observaciones directas del volcán. Con estas condiciones de partida se presenta a continuación una metodología basada en el tratamiento de una serie multitemporal de fotografías aéreas combinando procedimientos tradicionales de fotointerpretación, con análisis espaciales llevados a cabo en un SIG, con el fin de determinar los cambios morfológicos sufridos en el cráter del Popocatepetl. Una vez implementadas las técnicas, los resultados se comparan con los obtenidos por otros estudios previos y con los derivados de otras investigaciones llevadas a cabo en otros volcanes. Por último, de esta confrontación se extraen unas conclusiones sobre la validez del método y sobre la aplicación del mismo.

3. Área de estudio

El volcán Popocatepetl (19° 03'N; 98° 35'O; 5.424 m s.n.m.) constituye el extremo sur de la Sierra Nevada de México, que, a su vez, forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) que cruza el altiplano central de México entre los paralelos 19° y 20° N ([figura 1](#)). La actual morfología elíptica del cráter del Popocatepetl se debe a la última erupción Plineana que sufrió el volcán hace 1.100 años (Macías y Siebe, 2005). La actividad posterior, registrada en los documentos históricos pre-hispánicos y coloniales (Cruz-Reyna *et al.*, 1995), no produjo depósitos identificables alrededor del volcán ni modificaciones en el borde exterior del cráter.

En 1919 el Popocatepetl entró en erupción y atrajo a muchos geólogos, viajeros y artistas que ascendieron a la cima e hicieron valiosas descripciones, fotografías y dibujos del cráter. Varios científicos (Friedländer, 1921; Waitz, 1921; Murillo, 1939; Camacho, 1925) dan testimonio del crecimiento de un domo de lava en el fondo del cráter y de su posterior destrucción parcial, que dejó un pequeño cráter interior.

Tras el periodo eruptivo 1919-1927, el Popocatepetl no mostró actividad hasta diciembre de 1994. Se sucedieron entonces las emisiones de columnas que alcanzaron 3 km de altura sobre el cráter hasta marzo de 1995, cuando las emanaciones disminuyeron. El volcán permaneció tranquilo durante un año y después inició una fase de actividad explosiva con eventos violentos en junio y julio de 1997. Erupciones de similares dimensiones tuvieron lugar el 18 de diciembre de 2000 y el 21 de enero de 2001 (que produjo un flujo piroclástico rico en escorias). Estas explosiones vulcanianas se han relacionado con la destrucción de cuerpos domáticos formados en el cráter (Macías, 2005). La evolución de todo el proceso está principalmente controlada por la temperatura y densidad del magma (Macías, 2005; Macías y Siebe, 2005).

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

De nuevo los estudiosos del volcán dirigieron su atención sobre el Popocatepetl en el comienzo del actual periodo eruptivo en 1994, pero en esta ocasión los científicos evitaron el riesgo de la ascensión al cráter para efectuar observaciones directas (de hecho, las autoridades prohibieron el acceso al cono superior del volcán). Las nuevas técnicas de percepción remota posibilitaron la continuación de los estudios de los cambios sufridos en el cono superior. Esta nueva serie de trabajos comienza por establecer la situación en la que quedó el cráter al finalizar el anterior periodo eruptivo. Así, Cruz-Reyna *et al.* (1998), a partir de fotografías oblicuas tomadas al final de la fase eruptiva precedente, indican que el punto más bajo se encontraba entonces a 4.963 m s.n.m.; que el cráter interior tenía un diámetro de 160 m y una profundidad de 50 m; que la altura media del fondo del cráter era de 5.030 m s.n.m.; y que la capacidad del cráter hasta su punto más bajo en el borde (5.180 m) era aproximadamente de $35 \times 10^6 \text{ m}^3$. En este estudio se hace un seguimiento de las transformaciones sufridas en el cráter entre marzo de 1996 y diciembre 1997, apoyándose en cálculos morfométricos realizados sobre una serie de fotografías aéreas. En este periodo los autores contabilizan el crecimiento y destrucción de un total de 6 domos. Del mismo modo, estiman que desde marzo de 1996 a octubre de 1997 el cráter se rellenó con $9,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de material, que ocuparon el 27% de la capacidad del cráter hasta el punto más bajo de su borde exterior. Entre el mes de octubre y el de noviembre de 1997 el cráter se rellenó con $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ más y desde aquí hasta diciembre aumentó en $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo que se rellenó el 38% de su capacidad. Pero calculan que la explosión del 1 de enero de 1998 evacuó $1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ de material, dejando el cráter al 35% de su capacidad.

Otra técnica de percepción remota empleada en el estudio del Popocatepetl, es el análisis de datos de radiación infrarroja adquiridos por el satélite meteorológico GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que Wright *et al.* (2002) utilizan para identificar la actividad magmática en el cráter. El crecimiento y desaparición del domo de noviembre-diciembre de 1998 es detectado claramente por variaciones en la emisión de radiación, lo que no sucede con el domo de febrero de 2000.

Matiella *et al.* (2008) hacen una comparación entre los resultados obtenidos al analizar la información adquirida por distintos satélites durante la erupción de diciembre de 2000/enero de 2001. Concluyen que los datos obtenidos con el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) resultan ser los más precisos, aunque indican que este sensor tiene muchas dificultades con las interferencias meteorológicas propias de las latitudes tropicales.

Las estaciones geomagnéticas instaladas en el Popocatepetl registran anomalías magnéticas que se pueden asociar con la ascensión del magma y con el crecimiento-destrucción de sus domos (Martín-Del Pozo *et al.*, 2003). Estos autores identifican así cuatro domos que se desarrollaron y desaparecieron entre septiembre de 2000 y febrero de 2001. Los resultados de analizar las gráficas elaboradas con los datos geomagnéticos se comparan con las fotografías aéreas existentes entre las dos fechas, sobre las que dibujan esquemas geomorfológicos que se relacionan con los procesos de crecimiento y destrucción de los domos en el cráter.

Salvo algún cálculo realizado por el CENAPRED (1997-2003) y reflejado en los informes diarios de la situación del volcán, ningún otro estudio vuelve a hacer referencia a los cambios de morfología en el cráter, al volumen de los domos, a la cantidad de material desalojado o la

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

capacidad restante del cráter hasta su borde inferior. Tan sólo Macías y Siebe (2005) mencionan que un grupo de vulcanólogos ascendió hasta el cráter el 24 de febrero de 2004 y pudieron observar que el fondo del cráter se encontraba relleno por el material producido en las explosiones de los domos. Los autores indican que dicho relleno alcanzaba casi el borde del cráter y, que, comparando esta situación con las fotografías tomadas en 1994, suponía un incremento en el espesor de 250 m. Además, los investigadores observan que, a la vez que el fondo del cráter ha experimentado un ascenso, los flujos piroclásticos han sido más frecuentes, por lo que muestran su preocupación porque en el futuro las paredes del cráter no puedan contener nuevos domos o explosiones, que ocasionarían flujos piroclásticos por las laderas del cráter superior.

Mención especial merece el trabajo de Tanarro *et al.* (2005), que realiza un seguimiento de las morfologías que se suceden en el cráter del Popocatepetl con el apoyo de técnicas fotogramétricas para los cálculos del área y de los diámetros de los domos y cráteres interiores. En este estudio se emplean 10 pares de fotografías aéreas, que son fotointerpretadas para obtener mapas geomorfológicos de detalle. Las fotografías y los mapas se georreferencian y transforman utilizando el programa de CAD (*Computer Aided Design*) MicroStation (extensión Descartes). La transformación realizada con una función polinómica de tercer orden obtuvo desviaciones estándar medias de los errores entre 3 y 7 m. Los autores presentan como resultado una secuencia de mapas geomorfológicos acompañados de una descripción que establece una relación entre las formas observadas y la actividad eruptiva del volcán.

La comunidad científica ha puesto de manifiesto el desconocimiento de una pauta clara en la actividad del Popocatepetl y el temor ante la posibilidad de una gran erupción que conlleve graves consecuencias para la población (Macías y Siebe, 2005). Sin embargo, las descripciones de la actividad del volcán en el actual periodo eruptivo realizadas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2001 y 1997-2003), y el estudio de los datos recogidos por las estaciones geomagnéticas (por ejemplo, Martín-Del Pozo *et al.*, 2003), muestran que la actividad reciente del Popocatepetl viene marcada por la sucesión de crecimiento-destrucción de domos en su cráter. Se presenta entonces la necesidad de realizar un estudio pormenorizado de las variaciones morfológicas que viene experimentando el cráter del Popocatepetl en su actual etapa eruptiva, que se pueda relacionar con los registros de actividad y, así, establecer un patrón de comportamiento.

4. Metodología

La estructura metodológica y su aplicación se han dividido en dos bloques que emplean técnicas diferentes. Por un lado, se realiza la cartografía geomorfológica con procedimientos de fotointerpretación convencional y herramientas cartográficas de SIG. Los mapas resultantes se comparan en *ArcGIS*, teniendo en cuenta la variable temporal. Por otra parte, se estudian los valores morfométricos derivados de la topografía que ofrecen las restituciones fotogramétricas, mediante un análisis espacio-temporal llevado a cabo en *ArcGIS*. Los resultados obtenidos de aplicar ambos paquetes metodológicos son complementarios.

4.1. Cartografía geomorfológica

4.1.1. Información de partida y fotointerpretación

La información de base para la realización de las cartografías geomorfológicas consistió en una serie temporal de fotografías aéreas, seleccionadas de la colección accesible de fotografías que posee la Dirección General de Carreteras Federales (DGCF), dependiente de la Secretaría de Carreteras y Transporte (SCT) de México. Los criterios fundamentales se basaron en que las fotografías debían permitir la visibilidad del cráter, sin presentar gran cantidad de nubes o fumarolas; que tuvieran una escala adecuada para distinguir las formas del cráter y que estuvieran realizadas en la vertical (con ángulos inferiores a 3°). Se eligieron, así, 22 tripletas de fotografías aéreas, entre noviembre de 1982 hasta agosto de 2003, en intervalos temporales desiguales ([tabla 1](#)). De fechas anteriores al inicio del presente periodo eruptivo existen muy pocas fotografías aéreas del Popocatepetl y solo se han podido emplear las tomadas en noviembre de 1982 y mayo de 1989. Después de diciembre de 1994 la frecuencia se incrementa, aunque no todas las imágenes se pueden utilizar por falta de visibilidad o por su oblicuidad. La primera tripleta en la que se puede trabajar con fiabilidad es la del 14 de noviembre de 1997. Con el tiempo la calidad va mejorando y hay una mayor cantidad de fotografías. Además se contó con el apoyo de la colección de fotografías oblicuas, tomadas desde helicóptero, propiedad del CENAPRED, muchas publicadas en su página web (www.cenapred.unam.mx/es/).

Mediante fotointerpretación convencional con un estereoscopio de reflexión se delimitan las formas de relieve del cráter del Popocatepetl sobre un acetato fijado a la fotografía central de cada una de las tripletas. La cartografía geomorfológica se basa en una leyenda simple y con clases excluyentes en la que se realiza una subdivisión inicial, atendiendo a la velocidad a la que experimentan cambios las formas del cráter, distinguiendo, así, las formas del **cráter principal**, donde siempre están presentes la pared (afloramiento de lava masiva) y la rampa (constituida por material suelto de distintos tamaños), y las del **complejo volcánico reciente**, con variaciones en la distribución de uno o varios domos, cráteres, conos o fondos planos.

4.1.2. Ortoproyección y edición digital

Las fotografías aéreas siempre tienen un cierto grado de deformación provocada por las distorsiones de la lente, la curvatura terrestre, la refracción, la inclinación de la cámara y la topografía del terreno, que puede ser corregido o minimizado (Welch y Jordan, 1996). En el caso que nos ocupa, al tratarse de un área reducida, no es necesaria la corrección del error introducido por la esfericidad terrestre. En cambio, las imágenes aparecen especialmente distorsionadas por la configuración topográfica del volcán que tiene pendientes muy escarpadas (>30°). Por otro lado, la actividad volcánica también dificulta la realización totalmente vertical de las fotografías. Debido a esto, las fotografías y los mapas realizados sobre ellas mediante fotointerpretación (en realidad *pseudomapas*) tienen que someterse a un proceso de corrección geométrica u ortoproyección. Actualmente, los SIG incluyen funciones que "remuestrean" las fotografías aéreas en formato digital para crear una imagen rectificadas. En el caso de estudio se han seguido las recomendaciones

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

de Welch y Jordan (1996) para el proceso de ortorrectificación y georreferenciación con el *software* ArcGIS (ESRI©). En primer lugar, la imagen que se va a procesar se escanea con alta resolución y se transforma a un formato ráster compatible (JPEG o TIFF). Después se elige una serie de puntos de control fácilmente reconocibles en las imágenes y de los que se tenga una correcta localización en el sistema de coordenadas que se esté empleando (11 puntos en coordenadas UTM sobre la ortofoto 1:20.000 de noviembre de 1982 (INEGI, 1983)). Por último se procede a la ortorrectificación propiamente dicha, en este caso, mediante el empleo de la herramienta *Georeferencing* que relaciona los puntos elegidos sobre la imagen con las coordenadas reales de dichos puntos y, posteriormente, lleva a cabo la transformación geométrica ([figura 2](#)). Entre las opciones que se presentan para realizar la transformación se eligió la polinómica de tercer grado; consigue rectificaciones geométricas de alta precisión mediante un proceso que mueve, escala, gira y torsiona la fotografía. Esta precisión tiene carácter global, por lo que siempre se obtiene un error residual cuadrático medio (RMS) en la localización de los puntos de control. En el proceso se obtuvieron errores medios de $\pm 2,21$ m para las fotografías y de $\pm 2,04$ m para los *pseudomapas*, situados ambos por debajo del error tolerable de $\pm 2,23$ m para una escala de trabajo de 1:10.000 (Sanjosé *et al.*, 2004).

En el mismo SIG se digitalizaron las cartografías geomorfológicas con una base de datos asociada, en la que se calculó su superficie. Las bases de datos se exportaron a *Excel* para sintetizar la información y expresarla en gráficos que facilitaran la interpretación de los resultados ([figura 3](#)). De igual manera, se produjo una serie cartográfica cuya edición final se hizo, en este caso, en un programa de dibujo (*CorelDraw*), aunque los SIG también ofrecen unas buenas salidas gráficas. En el diagrama de flujos de la [figura 3](#) se resumen los pasos metodológicos que se han seguido en el bloque de técnicas aplicadas a la cartografía geomorfológica.

4.2. Tratamiento de los datos topográficos

4.2.1. Restitución de fotografías aéreas y creación del MDE

La restitución topográfica la desarrolló el equipo del Dr. J.J. de Sanjosé en el Departamento de Expresión Gráfica de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura.

Tan sólo 8 de los 22 triplas de fotografías aéreas resultaron aceptables para el trabajo de restitución, ya que cumplían los requisitos de: buen contraste y claridad (sin nubes ni fumarolas), área cubierta similar, datos técnicos completos (escala, altura de vuelo, certificación de la cámara, marcas fiducias, distancia focal...) y verticalidad (inclinación del aparato con un ángulo inferior a 3°). Las fechas elegidas fueron: 14 de noviembre de 1997, 2 de diciembre de 1998, 2 de junio de 1999, 4 de noviembre de 2000, 6 de abril de 2001, 17 de junio de 2002, 2 de diciembre de 2002 y 13 de febrero de 2003 (ver características en la [tabla 1](#)).

El equipo de topógrafos proporcionó la información de alturas en formato .dwg, tanto las curvas de nivel como la nube de puntos de apoyo. Estos ficheros se pueden abrir y trabajar directamente en el SIG, aunque aquí se optó por transformarlos a capas de información de tipo.shp.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

A partir de ellas se generó el Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante el método de triangulación (TIN: *Triangulated Irregular Network*), uno de los más utilizados en Topografía. El modelo TIN se transformó a raster y se recortó con el límite exterior del cráter para delimitar con precisión el área de estudio.

La disponibilidad de esta valiosa información topográfica, junto con las ortofotografías, proporciona la posibilidad de una visualización en 3D de los fotogramas (*ArcScene*). El efecto visual es similar al que ofrece el estereoscopio, con la ventaja de que se puede orientar fácilmente sin perder la visualización en 3D y realizar correcciones sobre la cartografía en formato digital ya georreferenciada. Esto sirvió de gran ayuda durante la fase de fotointerpretación

4.2.2. Comparaciones entre dos fechas de los MDE

Para calcular las cantidades de material perdido o incorporado en el cráter entre dos fechas, el SIG es capaz de comparar dos capas raster con la información de altitud. En la aplicación elegida para este trabajo (*ArcGIS*, Esri©) la secuencia de operaciones es: *3D Analyst –Surface Analysis - Cut/Fill*. El resultado final ([figura 4.A](#)) es otra capa en formato .grd con sus celdillas clasificadas en tres colores: rojo (*net gain*), gris (*unchanged*) y azul (*net loss*). Las áreas rojas son las que han experimentado una elevación entre la primera fecha (nov 97, en el ejemplo) y la segunda (dic 98, en el ejemplo). Las áreas coloreadas en gris no han variado su altura y las azules han disminuido.

La base de datos asociada lista los grupos de celdillas de cada una de las categorías e indica el volumen de variación entre los dos momentos. Las tablas fueron exportadas a *Excel*, donde se automatizaron los cálculos para obtener el volumen de disminución y el de aumento, así como las áreas que experimentan una variación topográfica, positiva o negativa, y las que permanecen iguales.

También se calculó la variación media de altura experimentada en el cráter entre dos fechas. La operación consistió en restar a la capa que contiene las alturas de una fecha determinada la capa de fecha anterior, de manera que los valores positivos resultantes suponen un aumento de altura entre la primera y la segunda situación y los valores negativos una disminución. Como resultado ([figura 4.B](#)) se obtuvo otra capa ráster con la información de la variación de altura en cada celdilla, clasificada según una gama de colores que varían desde los azules (pérdidas) hasta el rojo (aumento), pasando por el verde claro (0). Las reclasificaciones y consultas realizadas sobre esta capa resultaron de gran utilidad, no solo para localizar posibles errores (valores demasiado altos o bajos aislados por ejemplo), sino también para determinar los valores extremos y medios de variación, así como determinar qué formas se han visto afectadas por la adición o sustracción de material en mayor medida, mediante la superposición a los mapas geomorfológicos.

En la [figura 5](#) se esquematiza en un diagrama de flujos la secuencia de técnicas empleadas en la comparación de MDE.

4.2.3. Calculo del espacio libre en el cráter para cada fecha

Se pretende conocer la capacidad del cráter del Popocatepetl en cada uno de los momentos de estudio, desde el punto más bajo del cráter interior hasta el punto más bajo del borde del cráter exterior, considerando este último como el lugar en el que se produciría el desbordamiento en el caso de un crecimiento desmesurado del domo interior o por un derrame de lava. Para ello se simuló un plano de corte que pasara por el punto más bajo del borde del cráter exterior (5.180 m) y, así, poder calcular el volumen comprendido entre la topografía del fondo del cráter y el plano simulado. La secuencia de procedimientos en el *software* empleado es: *3D Analyst o Surface Analyst – Area and Volume*. Se obtiene así el área planimétrica del espacio analizado (*2D Area*); el área real, que tiene en cuenta la pendiente (*3D Area*) y el volumen comprendido entre la superficie topográfica elegida (tin) y el plano de corte.

La visualización en 3D del cráter y el plano de corte en una secuencia temporal ayudó en la comprensión del proceso de vaciado/relleno del cráter. De igual manera, una serie de cortes topográficos realizados sobre los MDE muestran la variación en la capacidad del cráter (*3D Analyst-Interpolate Line-Create Profile Graph*).

5. Resultados

El análisis al que han sido sometidas las 22 tripletas de fotografías aéreas ha dado como resultado la distinción de cuatro etapas ([figura 6](#)), de desigual duración, en los que la geomorfología del cráter muestra una clara relación con el tipo de actividad dominante. Por otra parte, los procedimientos aplicados a los 8 MDE ofrecen como resultado la distribución espacial de las áreas afectadas por aumento o disminución de volumen (véase un ejemplo en [figura 4](#)) y una estimación cuantitativa de los volúmenes perdidos o ganados y las áreas afectadas ([tabla 2](#)). Los MDE también han servido para evaluar en cada momento del estudio la capacidad libre de material entre el fondo del cráter y el punto más bajo del borde del cráter exterior ([tabla 3](#)).

En cada una de las etapas en las que se ha dividido el periodo analizado el cráter presenta una morfología característica que se relaciona con la actividad volcánica. También las medidas tomadas sobre los MDE muestran una pauta que se adapta a las etapas que marca la evolución geomorfológica. La primera de ellas, denominada *etapa pre-eruptiva*, queda caracterizada por las fotografías aéreas de noviembre de 1982 y mayo de 1989. Antes del comienzo del actual periodo eruptivo, fijado en diciembre de 1994, las paredes del cráter exterior y las rampas coluviales ocupan aproximadamente el 90% de la superficie del cráter ([figura 6](#) y [figura 7](#)). En el espacio restante, un cráter interno de fondo plano, rodeado parcialmente por un exíguo cono de escorias, conforma lo que se ha denominado genéricamente complejo volcánico reciente, en este caso formado en la anterior etapa eruptiva (1919-1938). La lejanía temporal de la actividad volcánica y el reparto de las formas sugiere que los procesos geomorfológicos dominantes se refieren a la dinámica de laderas, acción de hielo-deshielo, arroyada, etc., que afectan fundamentalmente a la pared y a la rampa. El fondo plano del cráter indica claramente una colmatación por el material circundante, ante la ausencia de actividad volcánica, y el incremento del área entre las dos fechas (1.000 m²) corrobora la afirmación. Algunos autores (Tanarro *et al.*, 2005) han indicado incluso la presencia de un cuerpo

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

de agua intermitente en el interior del cráter, que no es visible en las fotografías utilizadas, pero da idea de la estabilidad volcánica dominante.

En la *segunda etapa*, el complejo volcánico reciente gana extensión y *el cráter interior se ensancha y profundiza*, en relación con el crecimiento de domos de pequeño tamaño, que se destruyen casi por completo. Esta fase de carácter destructivo se desarrolla entre el inicio del actual periodo eruptivo y noviembre de 2000. Aunque carecemos de fotografías aéreas hasta noviembre de 1997, parece que el crecimiento y desaparición de domos en el cráter es la actividad dominante. De estos domos se encuentran algunas citas en los informes internos del CENAPRED (2001) o en el trabajo de Franco (2005), que reconstruye una secuencia de cuatro domos entre 1996 y 1997. Las explosiones de abril de 1995 y de junio/julio de 1997 parecen haber estado originadas así, ya que, aunque no hay una mención explícita en los informes de actividad, en la prensa local aparecen referencias (recogidas por Franco, 2005) a cantidades de lava que obstruían los conductos de salida, una dinámica de crecimiento y destrucción violenta de domos en el cráter.

Entre el 14 de noviembre de 1997 y el 2 de diciembre de 1998 ([figura 8](#)) el cráter se profundiza, pero el cono y las rampas aumentan su altura por acumulación de material, por lo que el espacio comprendido bajo la isohipsa de 5.180 m se reduce a una tasa del 47.694,75 m³/mes. Desde diciembre de 1998 hasta noviembre de 2000 se produce el mayor vaciamiento del cráter interior y la capacidad del cráter hasta el punto de desbordamiento se ve incrementada a razón de 12.331,65 m³/mes, en relación con un aumento de la explosividad volcánica. En las fotografías disponibles dominan las morfologías de cráteres concéntricos y, en alguna ocasión, se puede ver un pequeño domo de lava fresca que se destruye por completo en explosiones posteriores. El complejo volcánico reciente experimenta también un ensanchamiento y en la fotografía del 2 de febrero de 1999 alcanza su máxima extensión (42,5% del cráter total). En esta fecha, se observan dos domos en el interior de varios cráteres sobrepuestos.

La actividad volcánica que caracteriza a esta fase da lugar a la construcción y destrucción de domos de lava en el interior del cráter, a un ritmo que no permite un gran desarrollo de estos cuerpos y con una intensidad explosiva que impide la acumulación significativa de restos de estas lavas en el fondo del cráter. Se puede establecer la siguiente pauta en la actividad:

- Episodios volcano-sísmicos, que indican la fracturación de la roca como resultado de la intrusión de magma o movimientos de fluidos a alta presión.
- Crecimiento en el interior del cráter de un domo de lava, acompañado por algunas emisiones de balísticos y formación de fumarolas de vapor de agua, otros gases y pequeñas cantidades de ceniza.
- Destrucción total del domo en una o varias explosiones.
- Construcción de un nuevo domo en el interior del cráter.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

La *tercera etapa* está caracterizada por el *ascenso del fondo del cráter* debido a la acumulación de material y se extiende desde la fotografía de noviembre de 2000 (donde el domo que aparece, posiblemente, sea el inicio del gran domo de diciembre de 2000) hasta el comienzo de la actividad freatomagmática de julio de 2003. A partir de la fotografía tomada en noviembre de 2000 se observa un cambio cuantitativo en la emisión de lava que alimenta los domos, de forma que se desarrollan cuerpos de lava mayores que no son desmantelados por completo por la actividad explosiva. El mayor incremento del relleno se produce por la adicción de los domos de diciembre de 2000 y enero de 2001 (hecho sucedido entre la toma de las fotografía aéreas de noviembre de 2000 y abril de 2001, [tabla 2](#)), cuando la capacidad hasta el punto más bajo del borde del cráter exterior se reduce a un ritmo de 712.869,22 m³/mes. Sin embargo, este aumento de material retenido en el cráter coincide con la erupción más violenta registrada en el actual periodo eruptivo (22 de enero de 2001), de lo que se puede deducir que las cantidades emitidas por el volcán se incrementaron indudablemente en esta etapa.

La fotografía aérea posterior a esta explosión (15 de marzo de 2001) muestra que la erupción modificó la morfología del cráter interior, ensanchándolo hacia el este, mientras que la extensión de las paredes se reduce a favor de la acumulación en las rampas, en especial en el sector noroccidental, hacia donde colapsa la columna de piroclastos del día 22 de enero. Las imágenes siguientes van mostrando el crecimiento de domos que no llegan a desaparecer por completo. Así, en la fotografía del 20 de agosto de 2001 se cartografía un cuerpo de lava de 40.353,8 m² ([figura 9](#)) en el que se distinguen dos unidades según el aspecto más antiguo (1) o más fresco (2) de las lavas y la topografía de su superficie más plana (1) o abombada (2). La actividad precedente parece indicar que durante el mes de julio se produjo una desgasificación, más que una destrucción del domo por completo, por lo que se van superponiendo las formas.

La actividad eruptiva ligada al crecimiento y destrucción parcial de estos grandes domos tiene como consecuencia la elevación del fondo del cráter interior ([tabla 3](#)), de forma que en abril de 2001 el punto más bajo del cráter alcanza aproximadamente la altitud que tenía en noviembre de 1997. En toda la etapa, entre noviembre de 2000 y febrero de 2003, el espacio libre hasta el límite de desbordamiento disminuye a razón de 102.900,72 m³/mes. La secuencia de actividad en estos casos se puede sintetizar en los siguientes pasos:

- La emisión de lavas hacia el exterior viene anunciada, igual que en la etapa anterior, por episodios de tremor armónico que indican movimientos de fluidos a alta presión.
- Acumulación de gran cantidad de lava en el interior del cráter, acompañada de exhalaciones de vapor de agua, otros gases y pequeñas cantidades de ceniza.
- Procesos de desgasificación de la lava acumulada mediante exhalaciones y explosiones poco destructivas, que acaban por colapsar el domo.
- Nuevo ascenso de lavas que cubren los restos del antiguo domo.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Esta actividad volcánica se refleja en una morfología más compleja que en el periodo anterior, caracterizada por la superposición de conos de escorias, formados por la acumulación de restos de domos, y por la adición de cuerpos de lava, que adoptan forma de cúpula mientras están siendo alimentados, o formas colapsadas, cuando cesa la afluencia de material.

Para finalizar, las dos últimas fotografías que constituyen la serie de análisis ilustran la **cuarta etapa**, con morfologías completamente distintas a las analizadas hasta el momento, en estrecha relación con una actividad que no había tenido lugar hasta la fecha: explosiones freatomagmáticas. Según los reportes del CENAPRED el crecimiento de domos y su desmantelamiento parcial se mantiene hasta el 1 de julio de 2003, momento en el que se produce la primera explosión de origen freatomagmático, coincidiendo con un periodo de fuertes precipitaciones. Durante el mes de junio se registraron episodios de tremor ligados a la emisión de lavas que alimentaban un nuevo domo. Pero esta actividad reaccionó con el agua procedente de las copiosas lluvias y que se recogían en el cráter. Se produjeron explosiones prácticamente a diario durante ese mes que dieron como resultado una morfología deprimida en escalones, a modo de cráteres encajados unos en otros, como la que se observa en la fotografía del 21 de julio de 2003 ([figura 10](#)). La sucesión de estas explosiones no sólo evacuó las lavas acumuladas de los domos anteriores, sino que impidieron que se produjeran nuevas acumulaciones, razón por la cual no se ve ningún domo en el interior del cráter. La actividad explosiva disminuye durante el mes de agosto y el día 25 de ese mes se puede apreciar un relleno de las oquedades internas. Se desconoce qué capacidad de evacuación tuvo esta actividad ya que estas fotografías no se pudieron restituir para comparar su topografía con la situación anterior. Las fotografías aéreas que se realizaron durante el resto del año siguen mostrando una gran oquedad con un fondo plano ([figura 10](#)).

En el seguimiento de la evolución del cráter mediante los MDE se ha observado un relleno generalizado del fondo del cráter interior, a pesar de que en un primer momento se produjera un vaciado. A partir de estos resultados, si se supone que la actividad se mantiene igual que en los 5 años y 3 meses analizados, con un ritmo de relleno de 106.455,12 m³/mes, a partir de febrero de 2003 el fondo alcanzaría el nivel de desbordamiento en 8,78 años. Por otro lado, si se mantiene la situación de febrero de 2003, un escenario como el que desarrolló el domo de diciembre de 2000 acabaría con el desbordamiento de las lavas por la ladera nororiental del volcán.

6. Discusión y validación del método

La mayoría de los trabajos sobre el actual periodo eruptivo del Popocatepetl hacen referencia a las características sísmico-volcánicas de su actividad desde el punto de vista geofísico. Excepto los informes del CENAPRED que aportan alguna descripción sobre la morfología del cráter o las dimensiones de los domos, muy pocas investigaciones tienen en cuenta la geomorfología del cráter para explicar los efectos de la actividad volcánica. El primer estudio que hace referencia a cambios morfológicos y mediciones en el cráter es el de Cruz-Reyna *et al.* (1998), que analiza la evolución del cráter entre 1996 y la erupción de enero de 1998 sobre la base de fotografías oblicuas y aéreas. Los datos que aportan en el crecimiento del domo visible en el fotograma del 14 de noviembre de 1997 parecen estar de acuerdo con los obtenidos en esta investigación. Así, indican que la parte alta del domo se encuentra a 5.105 m el 10 de octubre de

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

1997 y el día 22 está a 5.115 m. En nuestro estudio, en el MDE generado para el 14 de noviembre, la parte más alta del domo se encuentra a 5.110 m, cifra acorde con las anteriores si notamos que el domo ha comenzado a colapsar.

Por otro lado, Cruz-Reyna *et al.* (1998) parten de la hipótesis de que la capacidad del cráter desde el fondo hasta el punto más bajo del borde era aproximadamente de $35 \times 10^6 \text{ m}^3$ al inicio de la actividad eruptiva. Para realizar esta estimación se apoyan en las dimensiones del borde del cráter exterior, con forma elíptica y con ejes mayor y menor de 820 m y 650 m, la localización del punto más bajo del borde del cráter exterior (5.180 m s.n.m.), la altura del punto más bajo del interior del cráter (4.963 m) y la elevación media del cráter (5.030 m s.n.m.). De estos datos tan sólo la altitud del punto más bajo del cráter exterior coincide con la medida sobre los MDE, mientras que los ejes del borde exterior presentan unas distancias reducidas a la horizontal de 823 m (para el eje mayor de este a oeste entre el Pico Anáhuac y la cota de 5.245 m) y de 686 m (para el eje mayor de norte a sur). De cualquier forma, hay que tener en cuenta que los límites del cráter interior no marcan el límite de desbordamiento, sino que éste viene dado por la intersección del plano horizontal a la altura 5.180 m y las paredes del cráter.

Suponiendo una capacidad libre de $35 \times 10^6 \text{ m}^3$, Cruz-Reyna *et al.* (1998) estiman que entre marzo de 1996 y octubre de 1997 el cráter se rellena con $9,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ y entre octubre y noviembre de 1997 se incrementa en $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo que en la última fecha el espacio vacío hasta el borde desbordamiento es de $24 \times 10^6 \text{ m}^3$. Los cálculos realizados en esta investigación con el MDE, restituído sobre la fotografía aérea del 14 de noviembre de 1997, indican que en esa fecha la capacidad del cráter hasta el plano horizontal de 5.180 m es de $17,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Por lo tanto, la coincidencia de los resultados sugiere que Cruz-Reyna *et al.* (1998) estimaran por exceso la capacidad de la situación inicial, ya que tuvieron en cuenta el perímetro total del cráter exterior y no la línea que dibuja la altura de desbordamiento. Tal vez los autores hayan calculado la capacidad total del cráter y luego la trataron como si fuera el espacio comprendido entre el fondo y el límite de desbordamiento.

Martín-Del Pozo *et al.* (2003) realizan esquemas geomorfológicos del cráter para el 4 noviembre de 2000, 23 diciembre de 2000, 20 de enero de 2001 y 15 de marzo de 2001 para relacionar las anomalías magnéticas con la existencia de un domo. A pesar de que cartografían las formas sobre las fotografías sin corregir, se aprecia que el domo dibujado el 4 de noviembre de 2000 es mucho mayor que el estimado aquí. Esto es porque los autores consideran como un único domo el espacio ocupado por lava fresca en forma de cúpula (lo que únicamente se cartografía aquí como domo), más un pequeño cráter interior y su cono de escorias que son restos de un domo anterior. Para el 20 de enero de 2001, los autores consideran domo todo el cráter interior y parte del cono de escorias, aunque solamente dibujan grietas de distensión circulares en la parte del domo activa. Por último, el esquema que realizan sobre la fotografía del 15 de marzo de 2001 resulta similar a la cartografía del presente estudio para la misma fecha.

Los esquemas que presentan Martín-Del Pozo *et al.* (2003) cumplen el objetivo de relacionar la morfología con las anomalías magnéticas registradas en el Popocatepetl. Si en un próximo estudio se quieren poner en relación las tasas de crecimiento de los domos y con las

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

anomalías magnéticas, con el objeto de predecir situaciones futuras, se tendrían que realizar los cálculos sobre fotografías corregidas y sobre cartografías más precisas.

El único trabajo en el que se realiza un seguimiento de las morfologías que se desarrollan en el cráter del Popocatepetl es el de Tanarro *et al.* (2005). Estos autores interpretan 10 pares de fotografías aéreas de diferentes fechas y derivan mapas geomorfológicos a través de técnicas CAD. Este estudio se basa además en la obtención de una serie de medidas de superficies de formas y de los diámetros de los domos y cráteres interiores. En la presente investigación se emplean algunas fotografías aéreas de las mismas fechas, entre otras, y se obtienen cartografías muy similares. Las únicas diferencias significativas en la interpretación de formas se localizan en la cartografía generada para el 20 de enero de 2001, donde Tanarro *et al.* (2005) consideran que existe un cráter interno en lugar de un domo, y para el 17 de septiembre de 2002, donde los autores delimitan un domo de grandes dimensiones, mucho mayor que el cartografiado en esta investigación. En el resto de cartografías las dimensiones de los domos y de los cráteres interiores calculadas por Tanarro *et al.* (2005) difieren entre el 2% y el 10% con las obtenidas en la presente investigación.

Las técnicas empleadas para el estudio del cráter de distintos volcanes en el mundo varían desde las más sofisticadas y precisas de percepción remota hasta la simple visualización directa. En el caso del Popocatepetl, el acceso al cono superior no es posible debido a su elevado grado de peligrosidad, por lo que el conocimiento del cráter pasa por el empleo de técnicas remotas de obtención de datos.

En grandes estratovolcanes, como el St. Helens (EE.UU) o las Soufriere Hills (Montserrat), se emplean técnicas punteras en las medidas de las variaciones que puedan presentar sus formas. En ambos casos se cuenta con una red de puntos de control a partir de los cuales se pueden realizar medidas exactas o se pueden emplear para referenciar con máxima precisión las fotografías aéreas. En el caso del Popocatepetl no existe una red parecida o puntos con coordenadas conocidas en el terreno y visibles desde el aire para realizar correcciones y referenciaciones precisas del material fotográfico. En el presente trabajo se ha recurrido a una ortofoto (INEGI, 1983) para localizar puntos que no hubieran sufrido modificaciones y fueran identificables en todos los fotogramas. A pesar de la laboriosidad de esta operación, el resultado final siempre hay que interpretarlo con un margen de error no cuantificable y achacable a la subjetividad de la persona que realiza las observaciones.

Por otra parte, los trabajos realizados a partir de interpretación de fotografías aéreas y fotogrametría han ofrecido resultados muy aceptables en el conocimiento de la evolución morfológica de los volcanes (Donnadieu *et al.*, 2003), además de ser un recurso relativamente económico. El resto de imágenes y productos obtenidos con otros sensores resultan menos accesibles y más caros, si bien ofrecen resultados más precisos. Así, la utilización de la tecnología LIDAR para la obtención de modelos de elevación resulta óptima en cuanto a la resolución ofrecida, como lo demuestran los trabajos realizados en el St. Helens (Haugerud *et al.*, 2004a y Haugerud *et al.*, 2004b) y en Soufriere Hills (SAC, 2007) para calcular el volumen de los domos de lava. Como desventaja hay que notar que esta técnica resulta especialmente costosa.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Otras imágenes, como las del Landsat, ofrecen en este caso poca información debido a su resolución espacial (30 m, excepto en la banda térmica), mientras que las del SPOT, con mejor resolución espacial (10 m), resultan costosas. Los modelos de elevaciones creados para el Popocatepetl en otros estudios (Huggel *et al.*, 2005 y 2008), derivados de la restitución de imágenes ASTER o de la interferometría SAR del SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), presentan resoluciones espaciales de 30 y 90 m, respectivamente, que resultan menores a las obtenidas por restitución de fotografías aéreas convencionales (10 m).

En relación con las imágenes utilizadas, otro aspecto que hay que valorar es la disponibilidad temporal de fotografías. Mientras que las imágenes de satélite se producen en intervalos fijos, la realización y comercialización de las fotografías aéreas depende de la toma de decisiones de un organismo, en el caso del volcán Popocatepetl, de la DGCF dependiente de la SCT de México. A pesar de que esta institución ha valorado como una prioridad la toma de imágenes de este volcán por encontrarse activo y presentar una serie de amenazas a la población circundante, no se puede fotografiar el volcán en cualquier momento (nubosidad, actividad volcánica, corrientes convectivas...). En este sentido, se advierte la falta de fotografías aéreas verticales justo antes del inicio de la actividad eruptiva y durante el comienzo de esta (por ejemplo, desde 1992) con las cuales poder valorar la relación entre la actividad y los cambios morfológicos que tuvieron lugar en el cráter. Serían también de suma utilidad imágenes anteriores o posteriores a los principales eventos eruptivos, como por ejemplo fotografías tomadas durante el crecimiento del domo de mayo de 1997 y las posteriores a su destrucción en junio y julio de ese año. Igualmente interesante sería poder disponer de fotografías pertenecientes a la segunda mitad de 1999 y al año 2000, periodo que en los informes del CENAPRED aparece descrito como de escasa actividad, pero que no parece haber sido tan tranquilo a juzgar por la morfología complicada que presenta el cráter en noviembre de 2000.

Por otra parte, se ha visto que no todas las fotografías pueden ser restituidas para generar MDE ya que no cumplen los requisitos para ello: verticalidad, datos técnicos completos, área cubierta similar, buen contraste y claridad. Tan sólo se ha realizado la operación con 8 pares de los 22 disponibles y con intervalos temporales diferentes. En este sentido, hubiera sido de suma utilidad disponer de un MDE de la fotografía de julio o agosto de 2003 para cuantificar el material evacuado por las últimas explosiones y la capacidad hasta el punto de desbordamiento.

En cuanto a la realización de cálculos morfométricos a partir de la información topográfica proporcionada por las distintas fuentes, los recientes estudios han confirmado la utilidad de las técnicas tradicionales en topografía, como el tratamiento de la información en programas de diseño asistido por ordenador (CAD), y han validado las nuevas herramientas que ofrecen los SIG, muy eficaces no sólo para realizar cálculos de superficies y volúmenes, sino para relacionar esta información con otras variables espaciales y temporales. En el primer caso, se puede citar el trabajo ya comentado de Tanarro *et al.* (2005). En el segundo caso, la comparación de modelos de elevación del terreno en un SIG resulta útil para calcular las variaciones de volumen entre dos momentos determinados, así como para obtener una visualización más próxima a la realidad en tres dimensiones. De esta forma trabajan Kaye y Frank (2002) para calcular el volumen total del volcán Mauna Loa (Hawaii) partiendo de los modelos digitales de elevación aéreos y subacuáticos, Schilling *et al.*, (2006) para analizar los cambios sufridos en el cráter del St Helens, y Procter *et al.*

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

(2006) para estimar la cantidad del material que encierra el domo del Egmont (Nueva Zelanda) en la actualidad y cuál era la capacidad del domo inicial.

7. Conclusiones

Las Tecnologías de la Información Geográfica ponen a nuestro alcance un amplio conjunto de técnicas y conocimientos geográficos que posibilitan la adquisición, el manejo y el análisis espacio temporal de la información geográfica. En el presente trabajo se presenta una metodología basada en una determinada combinación de técnicas apoyadas en el conocimiento geográfico, con el objetivo de explicar la evolución geomorfológica de un cráter activo y relacionarla con el tipo de actividad volcánica. La presentación de los procedimientos se ha llevado a cabo de una forma práctica, adaptando y aplicando la metodología a un caso real, el cráter activo del volcán Popocatepetl. Las características del área de estudio y la disponibilidad de la información espacial han condicionado en gran medida la elección de las técnicas. La información de partida está constituida por una serie de fotografías aéreas, verticales y oblicuas, y los datos sobre la actividad volcánica recogidos en diferentes medios, especialmente en los informes del CENAPRED (1997-2003, 2001). A partir de estos datos, se siguieron dos líneas de tratamiento. En la primera se cartografió la geomorfología del cráter para cada una de las fechas de estudio mediante fotointerpretación convencional. Después se ortorrectificaron y editaron tanto las fotografías como las cartografías y, gracias a las herramientas SIG, se cuantificaron las superficies ocupadas por cada forma a lo largo de periodo de estudio. En otra línea de actuación, se restituyeron las fotografías aéreas con características idóneas y se levantaron los MDE. Mediante herramientas SIG se calcularon las variaciones de volumen entre las fechas de observación y el espacio libre en el cráter hasta el punto de desbordamiento en el borde del cráter.

La interpretación de los productos de estos procesos dio como resultado el establecimiento de cuatro etapas, en las que las formas de relieve observadas se relacionan con el tipo de actividad dominante en cada momento. Así, en la etapa pre-eruptiva predominan los procesos geomorfológicos no volcánicos, con un gran desarrollo de las paredes del cráter exterior y de las rampas coluviales, mientras que el cráter interior, de fondo plano, va siendo colmatado. En la segunda etapa, de carácter destructivo, el complejo volcánico reciente gana extensión y el cráter interior se ensancha y profundiza, en relación con el crecimiento de domos de pequeño tamaño, que se destruyen casi por completo. Por el contrario, a partir de noviembre de 2000 se observa un claro ascenso del fondo del cráter debido al desarrollo de cuerpos domáticos de lava de mayor tamaño en el fondo del cráter que no son desmantelados por completo por la actividad explosiva. Los restos de estos domos se acumulan y colmatan la quedad interior, lo que caracteriza la morfología constructiva de esta etapa. Por último, en la cuarta etapa se forman cráteres interiores escalonados originados por una serie de explosiones freatomagmáticas.

Entre noviembre de 1997 y febrero de 2003 se ha observado que las formas construidas-destruidas por la reciente actividad volcánica han ido ganando superficie en el interior del cráter, en detrimento de las paredes, que quedan relegadas a las partes más escarpadas y elevadas (con el consiguiente aumento de pendiente), y de las rampas coluviales, que también se estrechan y ocupan posiciones topográficas más altas. En todo el periodo de estudio, el 80% de la superficie del cráter

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

ha incrementado su altura en una media de 22,36 m, con una adicción de material aproximada de $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Este relleno se produce fundamentalmente en la parte más baja del cráter, es decir, la ocupada por el complejo volcánico reciente. Por esa razón, el espacio libre entre el fondo del cráter y el punto más bajo del borde se reduce y el 13 de febrero de 2003 se estima en $11,21 \times 10^6 \text{ m}^3$. En esta fecha, un escenario como el desarrollado en el mes de diciembre de 2000 daría como resultado el desbordamiento del cráter en unas pocas horas.

La metodología empleada aquí en la aplicación concreta al cráter del Popocatepetl ha resultado validada al encontrar una relación directa entre la morfología reflejada en las cartografías 2D; las variaciones de volumen, entendidas como relleno o vaciamiento del cráter, y las descripciones de la actividad volcánica. Por otra parte, algunas de estas técnicas se han aplicado de forma individual o combinadas con otras (en especial con teledetección) para la observación de las variaciones en áreas volcánicas, en particular para la cuantificación y seguimiento de los avances o retrocesos de las masas de hielo alojadas en los cuerpos volcánicos (por ejemplo, Tanarro *et al.*, 2005; Schilling *et al.*, 2006) del crecimiento de domos de lava (por ejemplo, MVO Staff, 1999; Watts *et al.*, 2002; Major *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2009) y de las deformaciones en las laderas de sus conos (por ejemplo, Ulusoy *et al.*, 2004).

Sin embargo, en la aplicación práctica del método se han encontrado algunas dificultades que dependen de las características del área de estudio, de la cantidad y calidad del material de trabajo y de la accesibilidad al mismo. Por ejemplo, a pesar de contar con una extensa colección de fotografías aéreas, no todas resultan apropiadas para la realización de la cartografía geomorfológica del cráter, por causas de escala o mala visibilidad, ni para su rectificación y referenciación geográfica, por presentar una fuerte inclinación respecto a la vertical, con lo que se restringen las fechas de estudio. Así, determinados momentos no se han podido analizar con la profundidad que se han tratado otros, aunque revistieran sumo interés por la proximidad temporal de algún evento volcánico documentado en otras fuentes, como por ejemplo los episodios de abril de 1995 y junio-julio de 1997.

Otra de las dificultades se ha encontrado a la hora de referenciar las fotografías y las cartografías realizadas por medio de fotointerpretación, ya que para el área de estudio no existe una red de puntos de control establecidos a partir de la red geodésica y que sean visibles desde el aire. A falta de estos elementos precisos, se empleó la ortofoto a escala 1:20.000 de noviembre de 1982 (INEGI, 1983), para localizar puntos de control visibles en todas la fotografías. El procedimiento no sólo alargó el proceso, sino que introdujo un error de subjetividad en la percepción y localización de los puntos que se estimó en 4 m. Si bien se consideró que las fotografías transformadas de este modo tenían todas el mismo error de localización y, por lo tanto, eran comparables entre sí (Sanjosé *et al.*, 2004), este tratamiento no permite realizar comparaciones con otras cartografías o fotografías corregidas según otras técnicas y limita las posibilidades de continuación del trabajo con otro tipo de imágenes o técnicas de referenciación más precisas.

La creación de MDE mediante restitución topográfica también estuvo condicionada por la calidad de las imágenes, por lo que al final sólo se pudo realizar el proceso con 8 de las fechas posibles. Por una parte, esto originó periodos de análisis desiguales con intervalos entre 17 y 2,5 meses de duración, por lo que se han calculado tasas mensuales y las comparaciones se han tenido

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

que hacer con esa salvedad. Por otro lado, las fotografías apropiadas para realizar las restituciones no cubren todo el periodo de estudio ni son las más representativas. Así, hubiera resultado muy apropiado manejar el MDE de junio o agosto de 2003 para determinar qué variación en volumen supuso la actividad freatomagmática detectada en las últimas fechas.

A pesar de estas dificultades, el trabajo presenta una caracterización válida de la evolución geomorfológica del cráter del Popocatepetl durante su última fase de actividad y su relación con los tipos de actividad, mediante la aplicación de una metodología basada en la utilización sencilla de un SIG y de unos recursos económicos de percepción remota. De igual manera, anima a mantener el seguimiento geomorfológico en el volcán Popocatepetl, y en otros de características similares, a la vez que se van solventando las dificultades observadas para poder contar en el futuro con una abundante documentación y realizar valoraciones acertadas ante posibles amenazas naturales en estos volcanes.

Agradecimientos:

La metodología que se expone en este trabajo, así como su aplicación práctica, se han desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Recursos y Prevención de riesgos hidrovulcánicos en estratovolcanes tropicales activos" (CGL2006-01983), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, y constituye parte de la tesis doctoral de la autora.

Además, este trabajo ha sido posible gracias al apoyo institucional de Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (con un agradecimiento especial al Dr. José Juan Zamorano) y a la labor del equipo topógrafos dirigido por el Dr. José Juan de Sanjosé, perteneciente al departamento de Expresión Gráfica de la Universidad de Extremadura.

Inestimables han sido las observaciones que han realizado al trabajo los doctores Julio Muñoz Jiménez, David Palacios, Luis Miguel Tanarro y dos revisores anónimos.

Referencias bibliográficas

- Adleman, J.N., Larsen, J.F., Ramsey, M.S., McGimsey, R.G. y Neal, C.A.(2004): "Analysis of composition and chronology of dome emplacement at Black Peak, Alaska utilizing ASTER remote sensing data and field-based studies", *Abstract Volume, IAVCEI General Assembly*, Pucon, Chile. s08c_pf_165. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en www.avo.alaska.edu/pdfs/cit4060.pdf
- Adleman, J.N. (2005): *Analysis of composition and chronology of dome emplacement at Black Peak volcano, Alaska utilizing ASTER remote sensing data and field-based studies*. University of Alaska Fairbanks MS thesis. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en www.avo.alaska.edu/pdfs/cit4005.pdf
- Andrés, N. (2011): "Técnicas de información geográfica aplicadas al estudio del origen de los lahares y su experimentación en estratovolcanes tropicales", Tesis Doctoral UCM. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid. <http://eprints.ucm.es/12688/1/T31875.pdf>

Andrés de Pablo, N. (2001): “Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Brantley, S. y Miers, B. (2000): *Mount St. Helens – From the 1980 eruption to 2000*, U. S. Geological Survey Fact Sheet, Report n° 036-00. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en <http://pubs.usgs.gov/fs/2000/fs036-00>

Camacho, H. (1925): “Resultados de la visita al cráter del Popocatepetl el 9 de marzo de 1922”, *Anales del Instituto de Geología*, 2, pp. 64-66.

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (1997-2003): *Reportes de la actividad volcánica del Popocatepetl*, [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en www.cenapred.unam.mx/cgi-bin/popo/reportes/consulta.cgi.

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2001): *Resumen de la actividad del volcán Popocatepetl de diciembre de 1994 a mayo de 2001*. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en: www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/Resumen/

Cruz-Reyna, S. de la, Quezada, J.L., Peña, C., Zepeda, O. y Sánchez, T. (1995): “Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354–1995)”, en CENAPRED-UNAM (Ed.): *Volcán Popocatepetl: Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995*, México, D.F., Secretaría de Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 3-22.

Cruz-Reyna, S. de la, Meli, R., Macías, J.L., Castillo, F. y Cabrera, B. (1998): *Cyclical dome extrusions that by late 1997 filled one-third of crater capacity*. Smithsonian-GVP Monthly Reports, Popocatepetl, Smithsonian Institution. Bull. Glob. Volcanism Netw, (GVN), 23 (2): 2-4. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en: www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1401-09=&volpage=var

Donnadieu, F., Kelfoun, K., Van Wyk de Vries, B., Decchi, E. y Merle, O. (2003): “Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, 1-2, pp. 161-180.

Dzurisin, D., Lisowski, M., Poland, M.P., Sherrod, D.R. y LaHusen, R.G. (2008): “Constraints and Conundrums resulting from ground-deformation measurements made during the 2004–2005 dome-building eruption of Mount St. Helens, Washington”, en Sherrod, D.R., Scott, W.E. y Stauffer, P.H. (Eds.): *A volcano rekindled; the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004-2000*. Washington, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1750, pp. 281-300.

Dzurisin, D., Lisowski, M. y Wicks, C.W. (2009): “Continuing inflation at Three Sisters volcanic Oregon Cascade Range, USA, from GPS, leveling, and InSAR observations”, *Bulletin of Volcanology*, 5, pp. 1091-1110.

Franco, O. (2005): *Geomorfología del volcán Popocatepetl*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía de México. (Inédita).

Friedländer, I. (1921): “La erupción del Popocatepetl”, *Memorias de la Sociedad Científica “Antonio Alzate”*, 40, pp. 219–227.

Harris, A.L., Rose, W.I. y Flynn, L.P. (2002): “Temporal trends in Lava Dome extrusion at Santiaguito 1922-2000”, *Bulletin of Volcanology*, 65, pp. 77-89.

Haugerud, R.A., Harding, D.J., Mark, L.E., Zeigler, J., Queija, V. y Johnson, S.Y. (2004a): “Lidar measurement of topographic change during the 2004 eruption of Mount St. Helens, WA”, *Eos Trans. AGU*, 85(47), Fall Meeting Suppl., abstract V53D-01A.

Haugerud, R.A., Harding, D.J., Queija, V. y Mark, L.E. (2004b): *Elevation change at Mt. St Helens, September 2003 to October 4-5, 2004*, Mapa E. 1:6000. USGS.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México) (1983): *Fotomapa del volcán Popocatepetl*. E, 1:20.000, E14B42-D.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Huggel, C., Schneider, D., Julio, P., Delgado, H. y Kääh, A. (2005): "Modeling of glacier-induced lahars using ASTER and SRTM terrain data", *Geophysical Research Abstracts*. European Geosciences Union, 7, 05291.

Huggel, C., Schneider, D., Julio, P., Delgado, H. y Kääh, A. (2008): "Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modelling: A case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1-2), pp. 99-110.

Iwastubo, E.Y. y Swanson, A. (1992): "Methods used to monitor deformation of the crater floor and lava dome at Mount St Helens, Washington", en Ewert, J.W. y Swanson, D.A. (Eds.): *Monitoring volcanoes: Techniques and strategies used by the staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-1990: USGS Bulletin*, 1966, pp. 53-66.

Jones, L.D. (2005): *Establishment of a baseline DEM on the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, using terrestrial LiDAR*. British Geological Survey, pp. 1-14 (IR/05/136) (Inédito) [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en <http://nora.nerc.ac.uk/11138/1/IR05136.pdf>

Kaye, G.D. y Frank, A. (2002): "Using GIS to estimate the total volume of Mauna Loa, Hawaii", *98th Annual Meeting Abstracts*. Geological Society of America. [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en http://gsa.confex.com/gsa/2002CD/finalprogram/abstract_34712.htm

Koch, N., Carey, S. y Lundin, S. (2004): "Mapping of the Crater of the Submarine Arc Volcano, Kick'em Jenny, in the Lesser Antilles Volcanic Arc", *Papers from the Summer Undergraduate Research Fellowship Program in Oceanography*, Univ Rhode Island, GSO Technical Report n° 2004-1, pp 40-45.

Kouli, M. y Seymour, K. St. (2006): "Contribution of remote sensing techniques to the identification and characterization of Miocene calderas, Lesvos Island, Aegean Sea, Hellas", *Geomorphology*, 77, pp. 1-16.

Loughlin, S.C., Christopher, T., Luckett, R., Jones, L. y Baptie, B. (2007): "Large volume dome collapse at the Soufrière Hills Volcano, Montserrat, 20 May 2006", *Geophysical Research Abstracts*, 9, 11090.

Macías, J.L. (2005): "Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana, 57, 3, pp. 379-424.

Macías, J.L. y Siebe, C. (2005): "Popocatepetl crater filled to the brim: significance for hazard evaluation", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, pp. 327-330.

Major, J.J., Kingsbury, C.G., Poland, M.P., LaHusen, R.G. y Dzurisin, D. (2008): "Extrusion rate of the Mount St. Helens lava dome estimated from terrestrial imagery: November 2004–December 2005", en Sherrod, D.R., Scott, W.E. y Stauffer, P.H. (Eds.): *A volcano rekindled; the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004-2006*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1750.

Major, J.J., Dzurisin, D., Schilling, S.P. y Poland, M.P. (2009): "Monitoring lava-dome growth during the 2004-2008 Mount St. Helens, Washington, eruption using oblique terrestrial photography", *Earth and Planetary Science Letters*, 286, pp. 243-254.

Martín-Del Pozzo, A.L., Cifuentes-Nava, G., Cabral-Cano, E., Bonifaz, F., Correa, I. y Mendiola, I.F. (2003): "Timing magma ascent at Popocatepetl Volcano, Mexico, 2000-2001", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125, pp. 107-120.

Matiella, M.A., Watson, I.M., Delgado, H., Rose, W.I., Cárdenas, L. y Realmuro, V.J. (2008): "Volcanic emissions from Popocatepetl volcano, Mexico, quantified using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) infrared data: A case study of the December 2000-January 2001 emissions", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 1-2, pp. 76-85.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

- Morán-Zenteno, D.J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R.G., Martiny, B., SCAF, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M.S. y Solís-Pichardo, G.N. (1999): "Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt", *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 6, pp. 513-535.
- Murillo, G. (Dr. Atl) (1939): *Volcanes de México. La actividad del Popocatepetl*. México. Ed. Polis, I.
- MVO Staff (1999): *Scientific Report 100*, Montserrat Volcano Observatory, Montserrat, West Indies, [Consulta: 10-05-2011]. Disponible en www.geo.mtu.edu/volcanoes/west.indies/soufriere/govt/scireps/mvo_report0100.html.
- Pavez, A., Remy, D., Bonvalot, S., Diament, M., Gabalda, G., Froger, J.L., Julien, P., Legrand, D. y Moisset, D. (2006): "Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring", *Remote Sensing of Environment*, 100, pp. 307-320.
- Poland, M. y Lu, Z. (2008): "Radar interferometry observations of surface displacements during pre- and co-eruptive periods at Mount St. Helens, Washington, 1992-2005", en Sherod, D., Scott, W. y Stauffer P. (Eds.): *A Volcano Rekindled: the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004-2006*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1750, pp. 361-386.
- Procter, J.N., Platz, T. y Cronin, S.J. (2006): "A remnant summit lava dome and its influence on future eruptive hazards", *Geophysical Research Abstracts*, 8, 10211.
- Ramsey, M.S., Dehn, J., Adleman, J.N., Larsen, J.F., McGimsey, R.G., Neal, C.A. y Wessels, R.L. (2003): "Deciphering Silicic Dome Emplacement Processes in the North Pacific: Quantitative Analyses of High Resolution Satellite and Field-Based Data", *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract V51F-0346.
- SAC (Scientific Advisory Committee) on Montserrat Volcanic Activity (2007): *Assessment of the hazards and risks associated with the Soufriere Hills volcano, Montserrat*, Eighth Report, pp. 1-38.
- Sanjosé, J.J., Martínez, E. y López, M. (2004): *Topografía para estudios de grado*, Sección Geodesia y Topografía n° 10, Bellisco, pp. 413.
- Schilling, S.P., Ramsey, D.W., Messerich, J.A. y Thompson, R.A. (2006): *Map: Rebuilding Mount St. Helens*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 2928.
- Tanarro, L. M., Zamorano, J.J. y Palacios, D. (2005): "Glacier degradation and lahar formation on the Popocatepetl volcano (Mexico) during the last eruptive period (1994-2003)", *Zeitschrift Geomorphologie*, 140, pp. 73-92.
- Topinka, L. (1992): "Basic Photography at Mount St. Helens and Other Cascades Volcanoes", en Ewert, J.W. y Swanson, D.A. (Eds.): *Monitoring Volcanoes: Techniques and Strategies Used by the Staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-1990*, USGS Bulletin, 1966, pp. 195-217.
- Ulusoy, I., Cubukcu, E., Aydar, E., Labazuy, P., Gourgaud, A. y Vincent, P.M. (2004): "Volcanic and deformation history of the Bodrum resurgent caldera system (southwestern Turkey)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, pp. 71-96.
- Wadge, G., Macfarlane, D.G., Robertson, D.A., Hale, A.J., Pinkerton, H.R., Burrell, V., Norton, G.E. y James, M.R. (2005): "AVTIS: A novel millimetre-wave ground based instrument for volcano remote sensing", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 4, pp. 307-318.
- Waitz, P. (1921): "Popocatepetl again in activity", *American Journal Sciences*, 1, pp. 81-85.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Watts, R.B., Herd, R.A., Sparks, R. S. J. y Young, S.R. (2002): "Growth patterns and emplacement of the andesitic lava dome at Soufrière Hills Volcano, Montserrat", *Geological Society, London, Memoirs*, 21, pp. 115-152.

Welch, R. y Jordan, T. R. (1996): "Using scanned air photographs", en Morain, S. y Baros, S.L. (Eds): *Raster Imagery in geographic Information Systems*, Onward Press, pp. 55-69.

Wright, R., Cruz-Reyna, S. de la, Harris, A., Flynn, L. y Gómez-Palacios, J.J. (2002): "Infrared satellite monitoring at Popocatepetl: Explosions, exhalations, and cycles of dome growth", *Journal of Geophysical Research*, 107(B8), 2153. doi:10.1029/2000JB000125

Yamashita, K.Y. y Kaisier, W.P. (1992): "Using First-Order Class II Geodetic Leveling Procedures to Monitor Vertical Displacement", en Ewert J.W. y Swanson, D.A. (Eds.): *Monitoring volcanoes: Techniques and strategies used by the staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-1990: USGS Bulletin*, 1966, pp. 135-141.

TABLAS

Tabla 1. Relación de las fotografías aéreas empleadas en este trabajo, donde se indica la fecha de vuelo, numeración de los fotogramas, escala aproximada y distancia focal.

| Fecha | Nº de la foto | Escala aprox. | Distancia focal (f) |
|------------|----------------|---------------|---------------------|
| Nov, 1982 | 18-19-20 | 1:80.000 | 153.43 |
| Mayo, 1989 | 8790-8791 | 1:19.000 | 152.97 |
| 14-nov-97 | - | 1:13.000 | 152.97 |
| 13-abr-98 | 5-6-7 | 1:13:000 | 152.97 |
| 8-jun-98 | 1005-1006-1007 | 1:10.000 | 152.97 |
| 2-dic-98 | 396-398 | 1:10.000 | 152.97 |
| 2-feb-99 | 1007-1008-1009 | 1:10.000 | 152.97 |
| 2-jun-99 | 7605-7606-7607 | 1:14.000 | 153.10 |
| 14-oct-99 | 6-7-8 | 1:10.000 | 152.97 |
| 4-nov-00 | 1008-1009 | 1:10.000 | 152.97 |
| 20-ene-01 | 1483-1484-1485 | 1:10.000 | 152.97 |
| 15-mar-01 | 289-290-291 | 1:10.000 | 152.97 |
| 6-abr-01 | 411-412-413 | 1:10.000 | 152.97 |
| 13-jul-01 | 1848-1849-1850 | 1:10.000 | 152.97 |
| 20-ago-01 | 3096-3097-3098 | 1:13.000 | 152.97 |
| 20-sep-01 | 2512-2513-2514 | 1:10.000 | 152.97 |
| 17-jun-02 | 3-4-5 | 1:14.000 | 152.97 |
| 17-sep-02 | 433-434 | 1:14.000 | 152.97 |
| 2-dic-02 | 653-654-654 | 1:13.000 | 152.97 |
| 13-feb-03 | 894-895-896 | 1:10.000 | 152.97 |
| 21-jul-03 | 1133-1134-1135 | 1:10.000 | 152.97 |
| 25-ago-03 | 1339-1340-1341 | 1:10.000 | 152.97 |

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Cálculo de la variación de volumen y superficie ocupada por los aumentos, las pérdidas y las áreas que no varían en el cráter del Popocatepetl, entre dos fechas. Se incluye el balance neto de volumen sufrido entre dos fechas consecutivas y entre la primera y la última fecha analizadas.

| | AUMENTO | | DISMINUCIÓN | | SIN VARIACIÓN | BALANCE |
|-------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | Volumen (m ³) | Superficie (m ²) | Volumen (m ³) | Superficie (m ²) | Superficie (m ²) | Volumen (m ³) |
| nov97/dic98 | 2.421.870 | 243.870 | -1.653.720 | 149.515 | 4.366 | 768.150 |
| dic98/jun99 | 1.754.410 | 242.831 | -1.748.140 | 135.531 | 19.389 | 6.270 |
| jun99/nov00 | 888.097 | 159.529 | -903.391 | 204.518 | 33.704 | -15.294 |
| nov00/abr01 | 3.922.390 | 294.961 | -579.257 | 98.041 | 4.749 | 3.343.133 |
| abr01/jun02 | 2.373.750 | 280.425 | -634.793 | 92.857 | 24.469 | 1.738.957 |
| jun02/dic02 | 1.321.990 | 216.796 | -602.019 | 150.337 | 30.618 | 719.971 |
| dic02/feb03 | 1.158.650 | 173.166 | -1.264.950 | 200.649 | 23.936 | -106.300 |
| nov97/feb03 | 7.102.340 | 317.591 | -648.478 | 77.870 | 2.290 | 6.453.862 |

Fte. Elaboración propia a partir de la información topográfica del cráter del Popocatepetl para las distintas fechas.

Tabla 3. Capacidad, en m³, del cráter del Popocatepetl desde el punto más bajo de su cráter interior hasta el plano horizontal de intersección con el punto más bajo de su borde exterior, porcentaje de capacidad libre respecto a la capacidad de la primera fecha y altitud (en metros) del punto más bajo del cráter interior en cada fecha.

| FECHA | Capacidad (m ³) hasta el punto más bajo del borde | % de capacidad libre respecto a la primera fecha | Altitud (m) del punto más bajo del cráter interior |
|-----------|---|--|--|
| 14-nov-97 | 17.920.385,22 | 100 | 5.092,96 |
| 2-dic-98 | 17.324.200,85 | 96,67 | 5.073,10 |
| 2-jun-99 | 17.328.609,74 | 96,70 | 5.044,04 |
| 4-nov-00 | 17.607.828,78 | 98,26 | 5.060,00 |
| 6-abr-01 | 14.043.482,68 | 78,37 | 5.090,00 |
| 17-jun-02 | 11.892.434,95 | 66,36 | 5.100,00 |
| 2-dic-02 | 11.635.986,77 | 64,93 | 5.110,00 |
| 13-feb-03 | 11.213.712,79 | 62,58 | 5.110,00 |

Fte. Elaboración propia a partir de la información topográfica del cráter del Popocatepetl para las distintas fechas.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

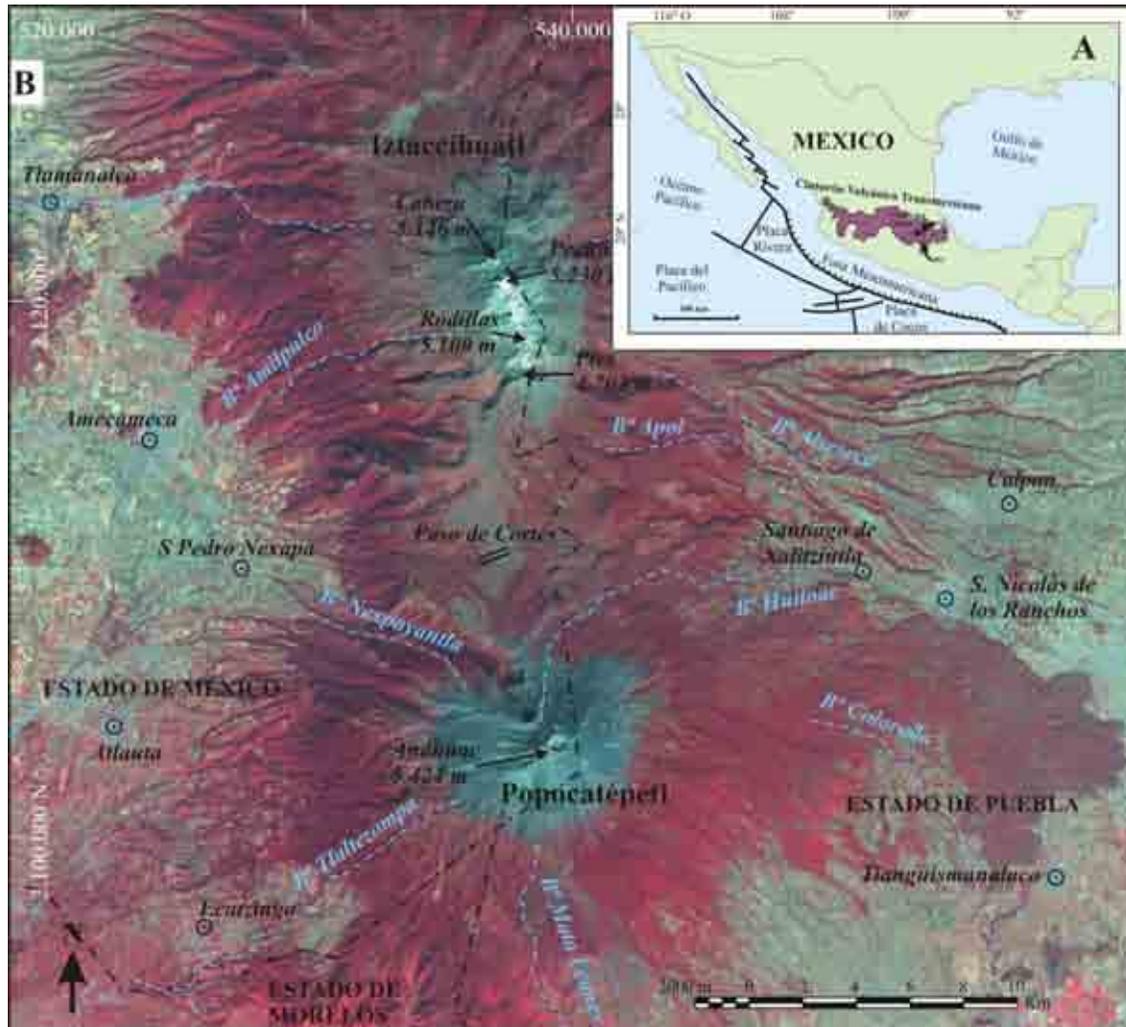


Figura 1. A. Localización del volcán Popocatepetl en el Cinturón Volcánico Transmexicano. El volcanismo del CVTM se debe a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana, a lo largo de la Fosa Mesoamericana (Modificado de Morán-Zenteno *et al.*, 1999). B. Imagen SPOT (2004) del complejo volcánico Popocatepetl-Iztaccihuatl, donde se señalan las cumbres y las poblaciones cercanas.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

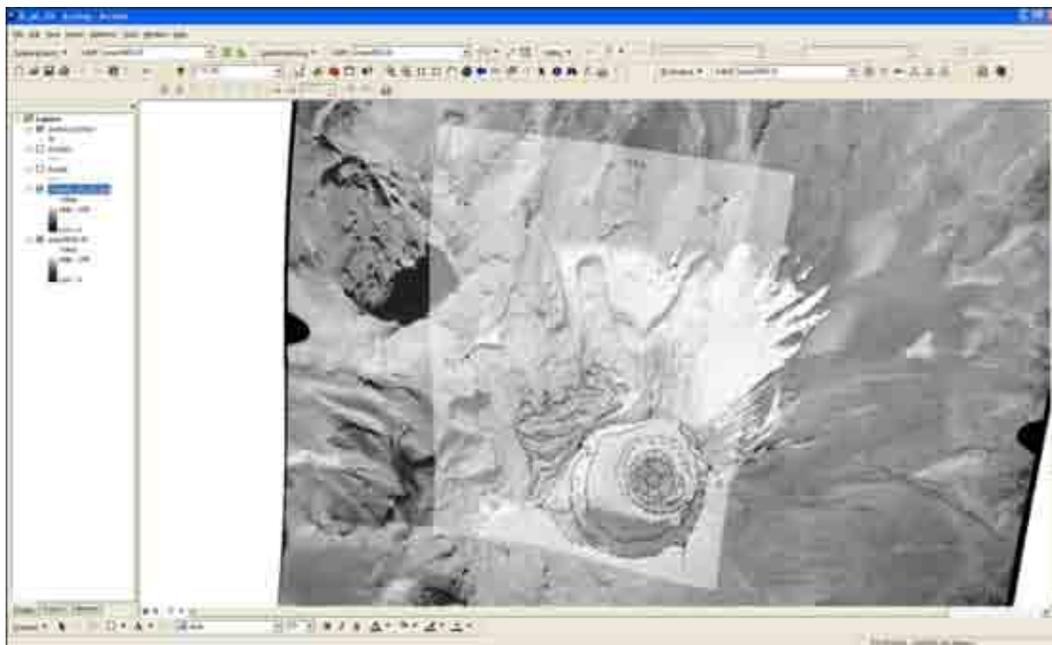


Figura 2. Resultado de la rectificación y georreferenciación de la fotografía aérea del cráter del Popocatepetl del 2 diciembre de 2002 y de la cartografía geomorfológica, mediante el empleo de la herramienta *Georeferencing* de ArcGIS.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

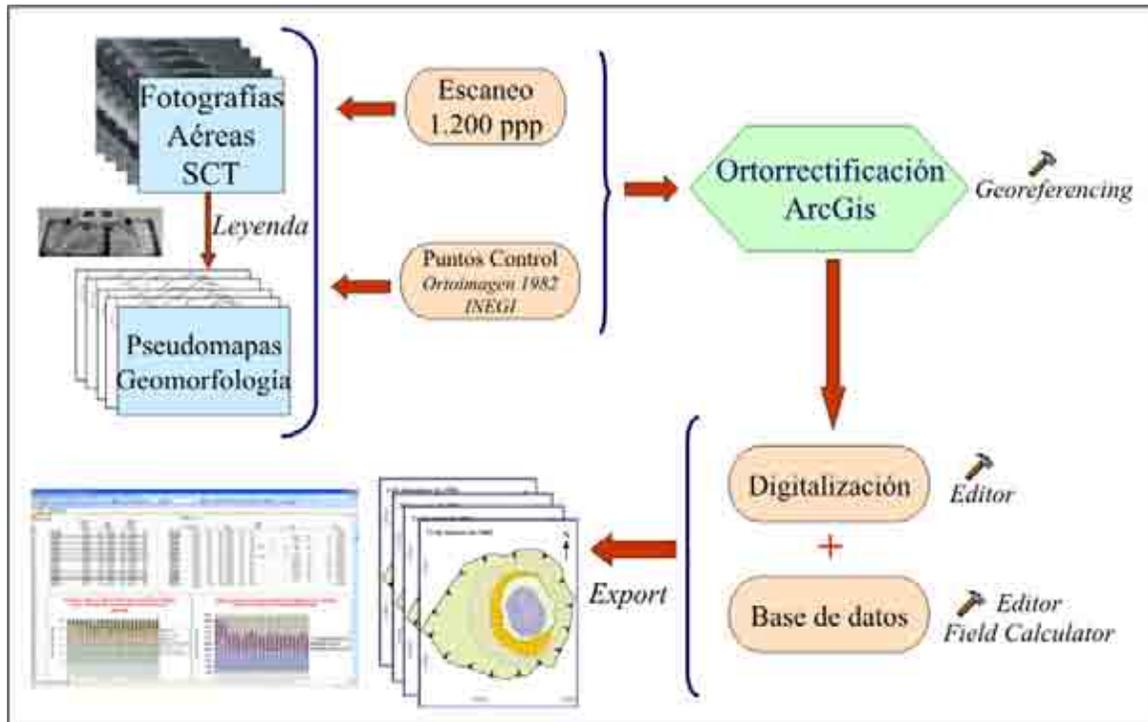


Figura 3. Diagrama de flujos de la secuencia de aplicación del método para la realización de la cartografía y análisis geomorfológico.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

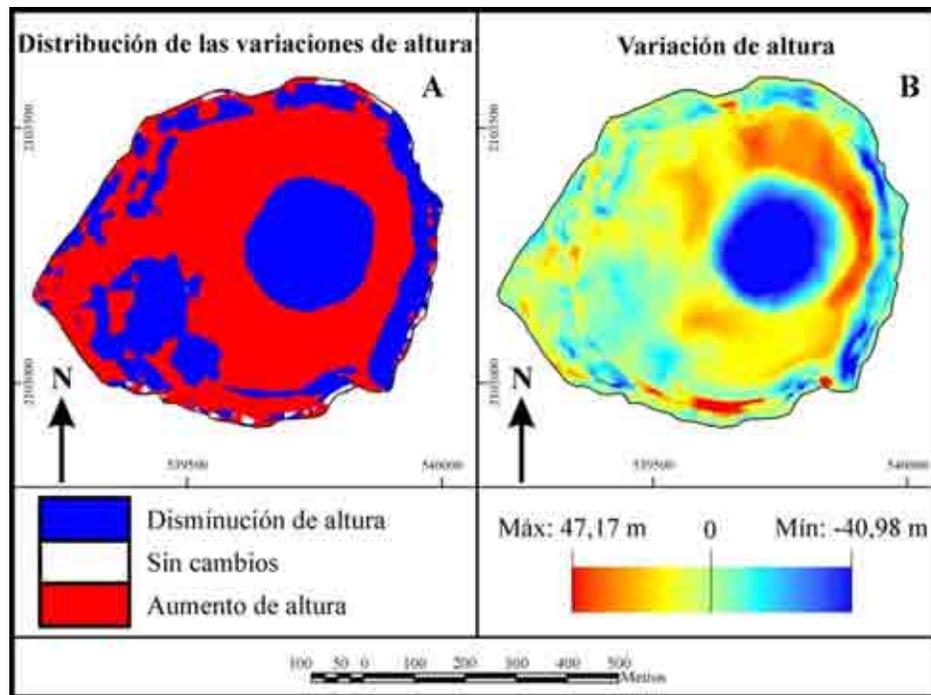


Figura 4. A.- Resultado de la comparación de las capas de información de altura del cráter del Popocatepetl correspondientes a noviembre de 1997 y diciembre de 1998. En azul se señalan las áreas con pérdida de altura, en rojo las que experimentan un incremento y en gris las que no cambian. B.- Al restar las capas con la información de altura en dos fechas consecutivas (noviembre de 1997 y diciembre de 1998) se obtiene otra capa con la altura de variación entre las dos fechas.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

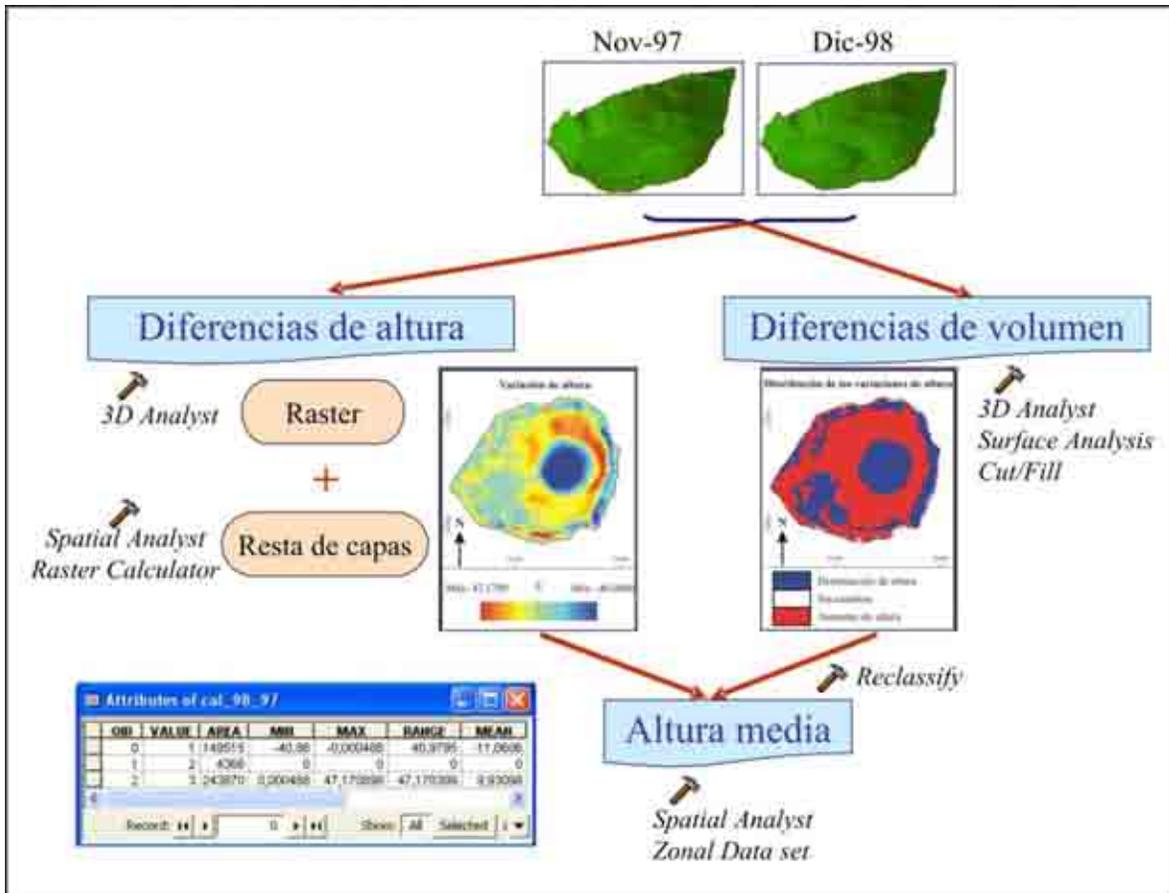


Figura 5. Diagrama de flujos con las herramientas aplicadas en la comparación de MDE.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

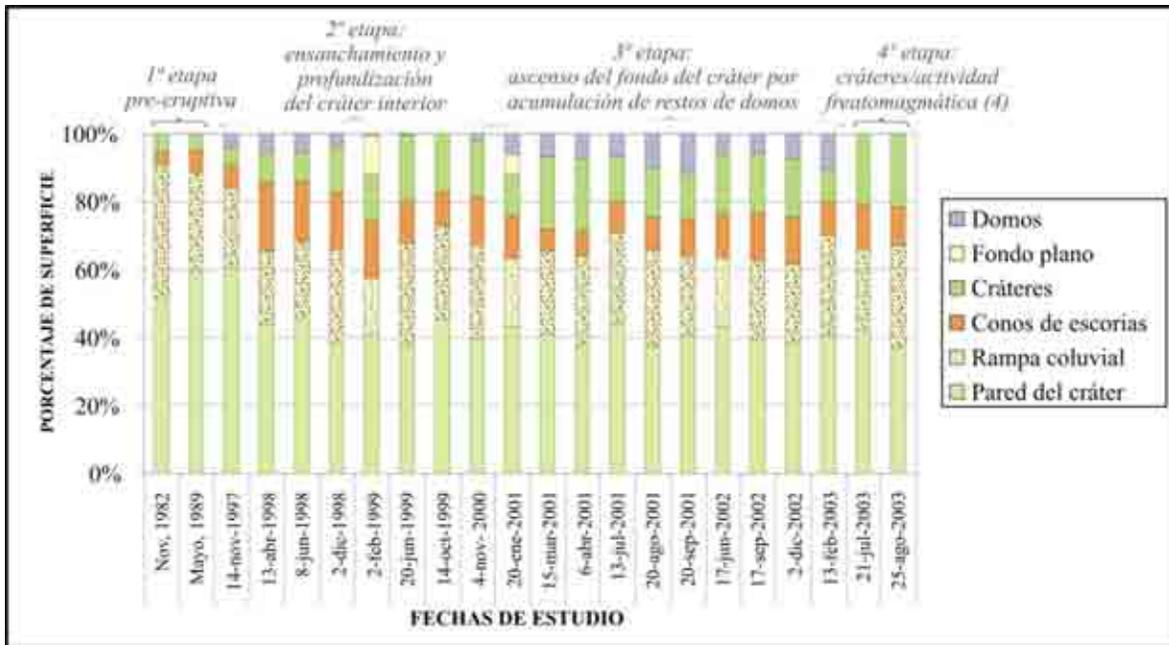


Figura 6. Las barras indican la distribución según el porcentaje de superficie planimétrica cubierta por cada una de las formas principales en el cráter del Popocatepetl en las fechas de estudio. En la parte superior se señalan las fases caracterizadas por distintas modificaciones geomorfológicas en relación con la actividad volcánica.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

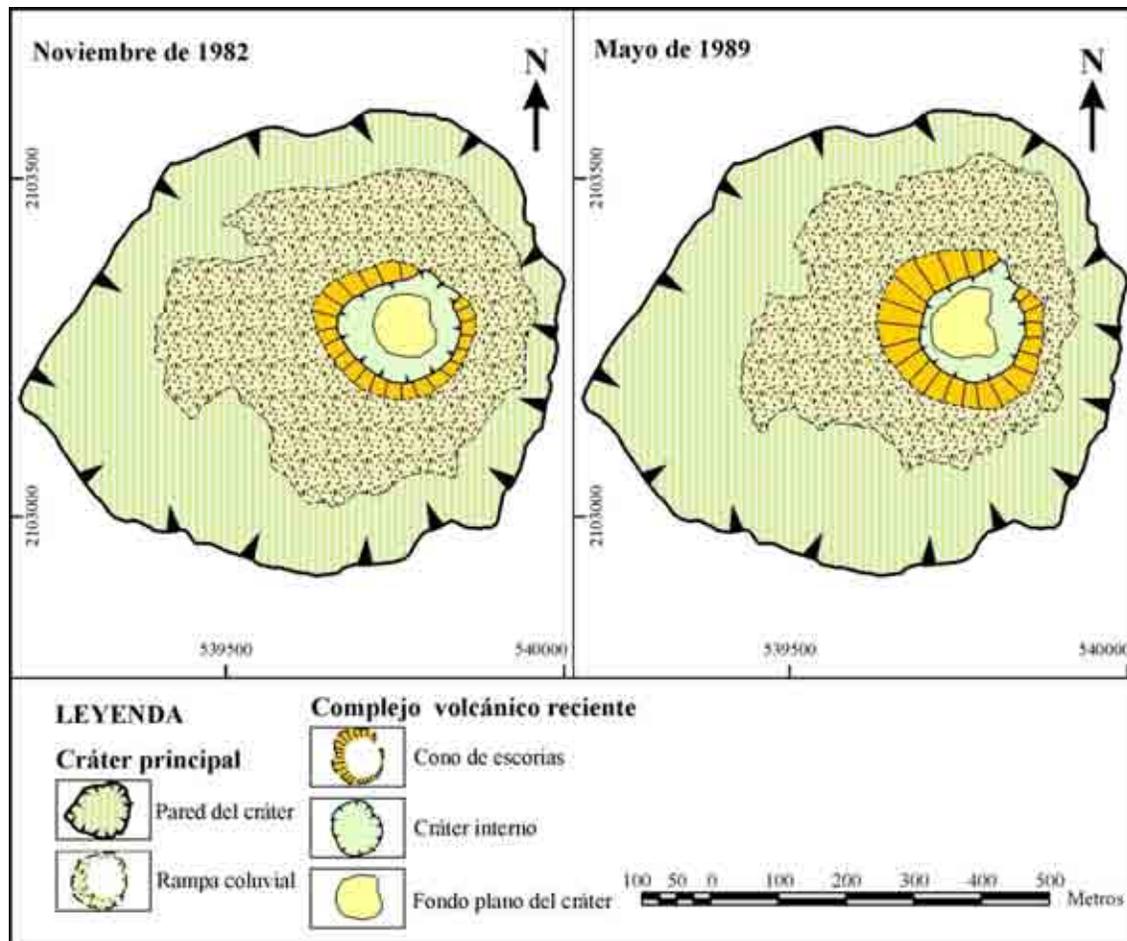


Figura 7. Cartografía geomorfológica del cráter del Popocatepetl correspondiente a las situaciones de noviembre de 1982 y mayo de 1989, anteriores al inicio del actual periodo eruptivo.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

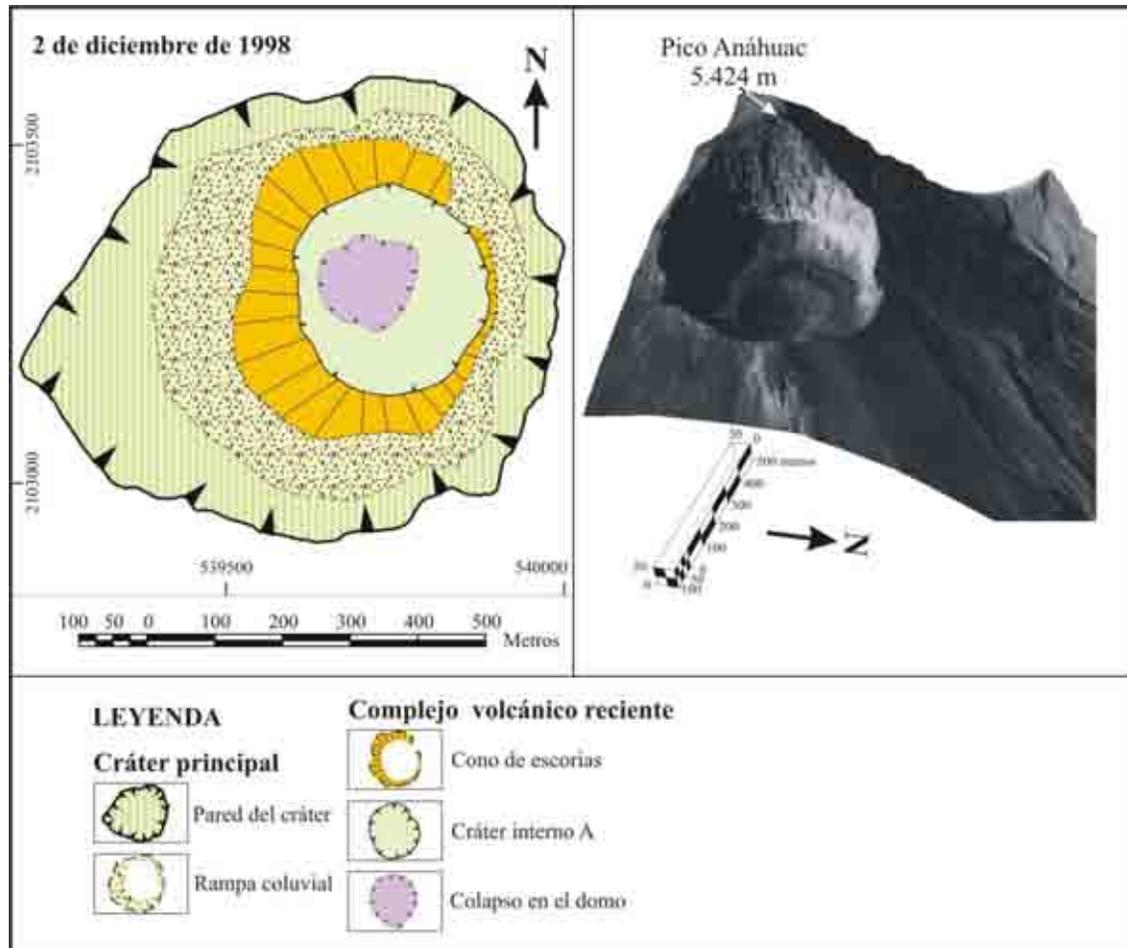


Figura 8. Cartografía geomorfológica del cráter del Popocatepetl correspondiente a la situación del 2 de diciembre de 1998 y vista en 3D de la fotografía aérea de la misma fecha tomada por la SCT.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

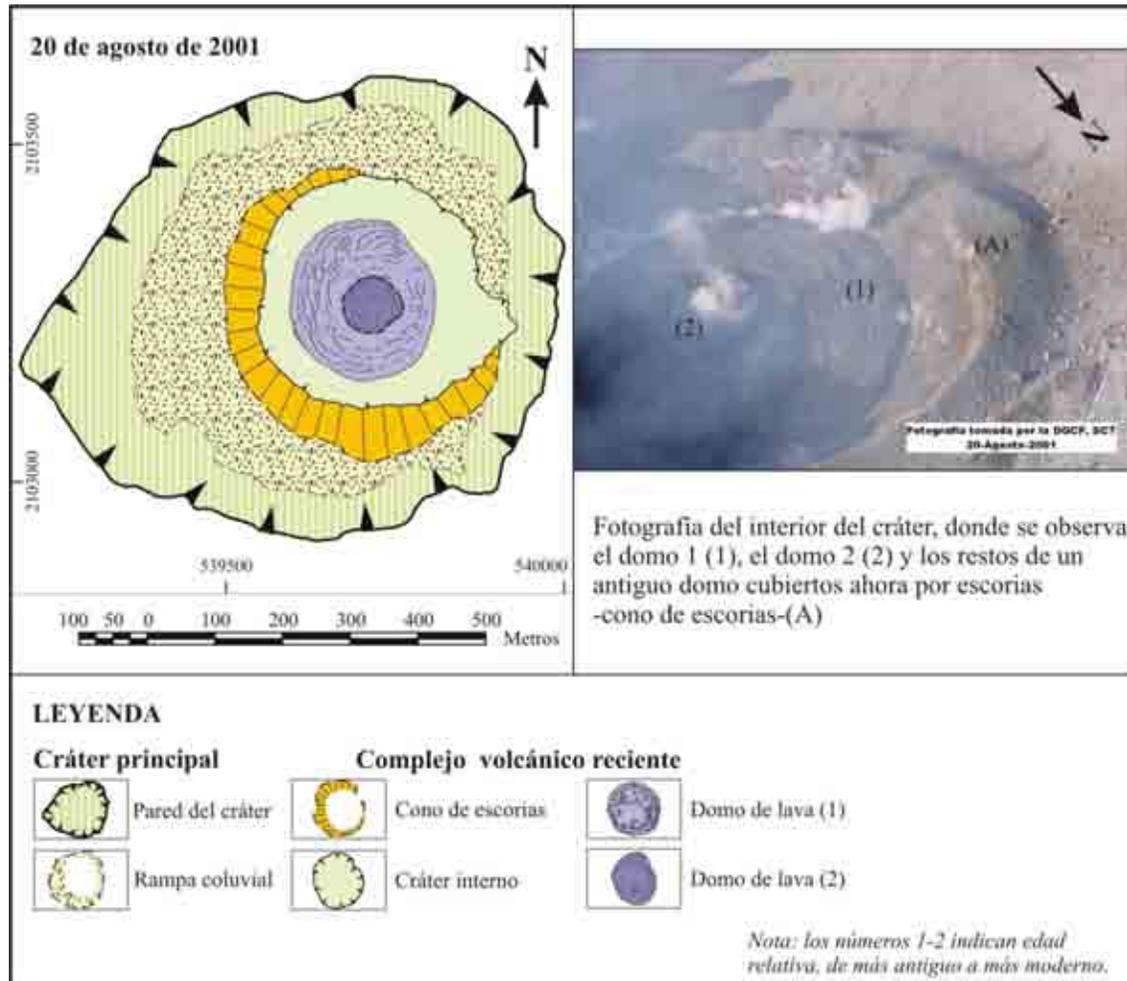


Figura 9. Cartografía geomorfológica del cráter del Popocatepetl correspondiente a la situación del 20 de agosto de 2001 y fotografía oblicua del interior del cráter de la misma fecha tomada por la SCT.

Andrés de Pablo, N. (2001): "Aplicación de una metodología basada en TIG al seguimiento de la evolución geomorfológica del cráter activo del Popocatepetl (México, 1994-2003)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 298-331. ISSN: 1578-5157

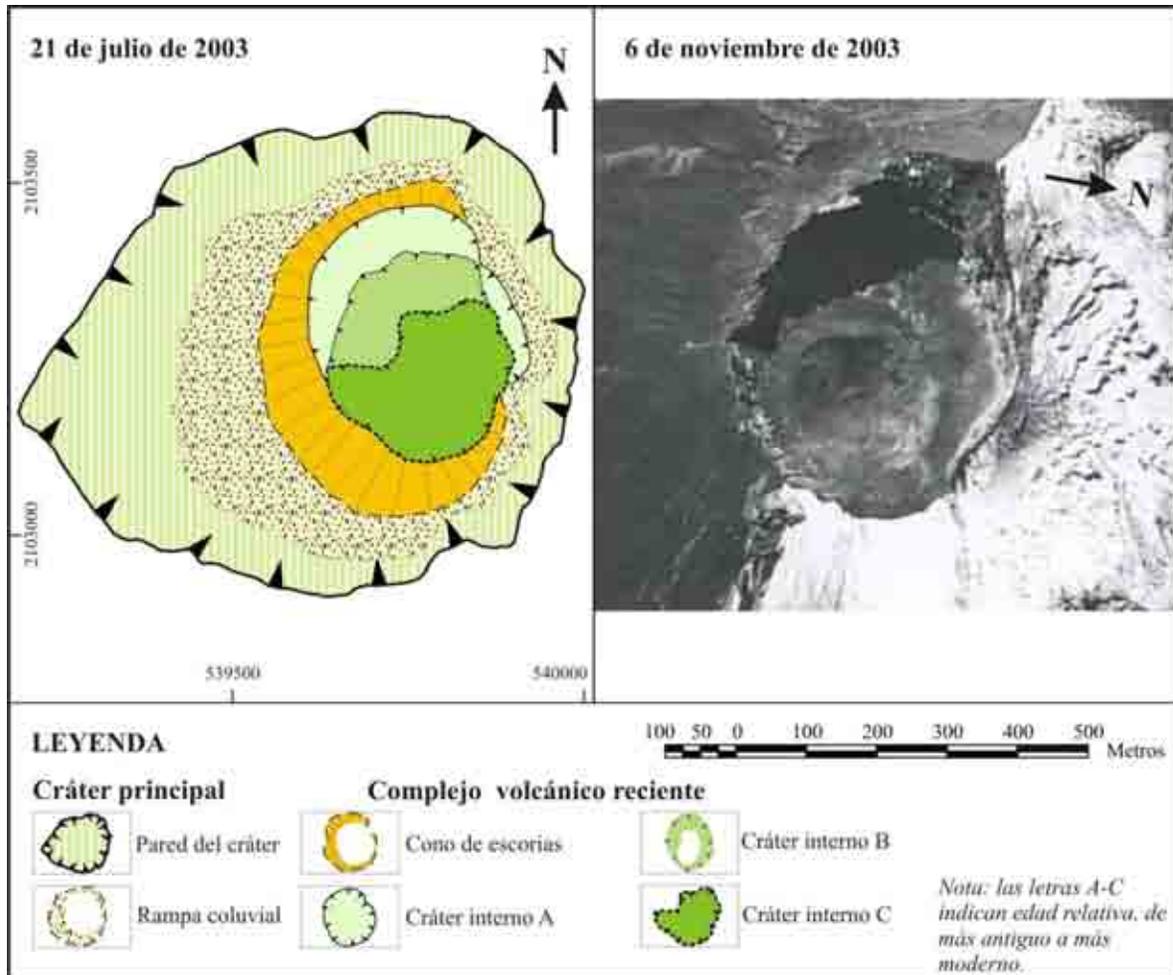


Figura 10. Cartografía geomorfológica del cráter del Popocatepetl correspondiente a la situación del 21 de julio de 2003 y fotografía aérea (sin referenciar y sin escala) del 6 de noviembre de 2003 tomada por la SCT, donde se aprecia la gran oquedad interior y un relleno plano.