

Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México

Fernando Aceves-Quesada^{1,*}, Jorge López-Blanco² y Ana Lillian Martín del Pozzo³

¹Posgrado Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

²Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

³Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

* faceves@geofisica.unam.mx

RESUMEN

Los estudios de peligros volcánicos a corto y largo plazo mediante la utilización de tecnologías geográficas generan un conocimiento útil para el análisis, planeación y manejo de las crisis volcánicas. El Nevado de Toluca es un estratovolcán que a lo largo de su historia geológica ha tenido erupciones violentas acompañadas de flujos piroclásticos, lahares, avalanchas, caída de cenizas y pómez. Durante los últimos 50,000 años, este volcán ha presentado al menos ocho erupciones vesuvianas, cuatro plinianas, una ultrapliniana, y tres erupciones acompañadas de la destrucción de domos. Además, en los últimos 100,000 años han presentado dos avalanchas de escombros. La cuenca de Toluca es uno de los centros industriales y agrícolas más importantes de México, incluyendo a la ciudad de Toluca, capital del Estado de México. Con base en el estudio de los productos eruptivos emitidos se determinó que los flujos piroclásticos representan el peligro volcánico más importante, por su frecuencia y por el área que han cubierto en las erupciones pasadas. Después están los lahares, seguidos por la caída de cenizas y finalmente las avalanchas de escombros. Se aplicó un método para integrar la información y obtener el mapa de peligros volcánicos del Nevado de Toluca, aplicando las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) y SIG. Esta metodología comprende la evaluación y combinación de criterios aplicando reglas de decisión, basadas en el análisis y jerarquización de alternativas con el fin de generar información que determine las áreas más afectables y brinde apoyo en el proceso de toma de decisiones. El mapa total de peligros muestra que las áreas más afectables serían la ciudad de Toluca y los centros industriales de Toluca-Lerma-San Mateo Atenco y Ocoyoacac-Tianguistengo, tanto por su importancia económica como por encontrarse en áreas potencialmente afectables por flujos piroclásticos, lahares y caída de cenizas.

Palabras clave: peligros volcánicos, evaluación multicriterio, sistemas de información geográfica, Nevado de Toluca, México.

ABSTRACT

Studies of short- and long-term volcanic hazards by means of geographic technologies generate useful knowledge for the analysis, planning and handling of the volcanic crises. The Nevado de Toluca is a stratovolcano that throughout its geologic history has had very violent eruptions accompanied by

pyroclastic flows (blocks and ash flows, pumice and ash flows, surges), lahars, debris avalanches and ash fall which have covered and modified in several occasions the relief of the Toluca basin. Eight vesuvian eruptions, four plinian, one ultraplinian eruptions, and at least three events of dome destruction occurred in the last 50,000 years; besides two sector collapses were identified in the last 100,000 years. The Toluca basin is one of the most important industrial and agricultural centers of Mexico, including the city of Toluca, capital of the State of Mexico. On the basis of previous studies about the volcanic products, it was determined that the emission of pyroclastic flows represents the most important hazard in the area because of its frequency and the area covered during the last eruptions. Lahars represent the next hazard in importance, followed by ash fall, and finally debris avalanches. This work presents a methodology to integrate information of the Nevado de Toluca volcanic hazards in order to obtain a map of total hazards by applying Multicriteria Evaluation (MCE) and GIS techniques. This methodology includes the evaluation and combination of criteria applying decision rules, based on the analysis and hierarchization of alternatives, with the purpose of generating reliable information to determine the potential susceptible areas and to support the decision process. The map of total hazards shows that the most susceptible areas would be the Toluca city, and the Toluca-Lerma-San Mateo Atenco and Ocoyoacac-Tianguistengo industrial complexes, all of them economically important and situated on the areas most subject to pyroclastic flows, lahars and ash fall.

Key words: volcanic hazards, multicriteria evaluation, geographic information system, Nevado de Toluca, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la manifestación de los desastres causados por la actividad de volcanes que habían sido considerados extintos o en reposo ha mostrado la necesidad de realizar estudios de peligros volcánicos a largo plazo. Este es el caso de los volcanes de la Faja Volcánica Transmexicana localizados en áreas con alta densidad de población y desarrollo de centros industriales. En este trabajo se presenta la integración de la información geológica, geomorfológica y volcanológica dentro de la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de realizar la evaluación de los niveles de peligros volcánicos en el contexto de un proceso de toma de decisiones dentro de los estudios generales de riesgos volcánicos.

El concepto de peligro volcánico comprende al conjunto de eventos que se producen en un volcán y que pueden provocar daños a personas o bienes expuestos (Ortiz y Araña, 1995), para cuya mitigación se realizan evaluaciones y mapas para predecir las rutas que seguirán los eventos volcánicos. Entre los trabajos de referencia que tratan de la predicción y mitigación de los efectos de una erupción, destaca el de Fournier d'Albe (1979), quien define el peligro volcánico como la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo de tiempo dado.

Durante la década de 1980, la UNESCO junto con geólogos y vulcanólogos promovió la realización de varios trabajos para la reducción de los desastres naturales, dedicando una serie de estudios de los peligros volcánicos (Westercamp 1982; Crandell *et al.*, 1984; Yokoyama *et al.*, 1984; UNDRP/UNESCO, 1985; Tilling, 1993). Blong (1984), publicó un documento sobre peligros volcánicos, sus efectos y recomendaciones para mitigar sus daños. La *International Association of Volcanology and Chemistry*

of the Earth's Interior (IAVCEI) ha publicado algunos escritos sobre monitoreo y mitigación de los peligros volcánicos (Latter, 1989; Rosi, 1996; Scarpa y Tilling, 1996). En 1992, la *National Land Agency, Government of Japan* presentó un manual para la preparación de mapas de peligros volcánicos.

Trabajos de peligros volcánicos en el contexto del análisis con sistemas de información geográfica (SIG) son escasos. Dentro de ellos están los aportes de Van Westen (1993, 1997a, 1997b), Gómez-Fernández (1995, 1998, 2000) y Pareschi *et al.* (2000). En ellos se integra la información dentro de un SIG para combinar varios mapas temáticos relacionados con los peligros volcánicos y obtener un mapa total de peligros de una área de estudio, con base en el análisis espacial y la interpretación de los datos georeferenciados (Van Westen, 1997a), obteniendo además una serie de mapas y bases de datos de atributos para ayudar en la toma de decisiones a las autoridades, responsables de protección y población en general. Con respecto a la aplicación de las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) para valorar áreas de peligro, son pocos los trabajos que estén enfocados a la estimación de los peligros volcánicos (Torrieri *et al.*, 2002). En México, los trabajos más importantes sobre esa problemática han sido aquéllos en los que se obtuvieron los mapas de peligros de los volcanes Popocatepetl (Macías *et al.*, 1995), de Colima (Martin del Pozzo *et al.*, 1995) y Pico de Orizaba (Sheridan *et al.*, 2001).

Los sistemas de información geográfica (SIG), con su desarrollo y uso, han demostrado ser una tecnología útil para almacenar, seleccionar y analizar información espacial para la solución de problemas complejos en planeación (modelación) y para la toma de decisiones (Aronoff, 1989). El manejo y procesamiento de datos comprende desde la sobreposición simple de mapas temáticos para la identificación de áreas con condiciones requeridas y específicas,

erupciones muy explosivas con períodos largos de descanso. La actividad se puede dividir en dos etapas: durante la primera, entre 1.2 y 1.6 Ma AP, se formó el volcán primitivo compuesto de lavas andesíticas sobre un basamento compuesto por secuencias metamórficas y sedimentarias (Cantagrel *et al.*, 1981).

Entre la primera y segunda etapa, la actividad tectónica y la erosión (gravitacional y fluvial) formaron los valles de los ríos San Jerónimo y Chontalcutlán, así como algunos menores como los de los arroyos Merua, Los Tizantes, El Jabalí, Calderón, Santa María, Arroyo Grande, Tlacapa, La Fabrica y La Ciervita. Los lahares transformados por la actividad fluvial se han encontrado río abajo, como depósitos de conglomerados, dentro de la cueva de Cacahuamilpa (Cserna y Fries, 1981; Capra, 2000).

La segunda etapa (100,000 años AP) se inicia con dos colapsos gravitacionales que produjeron las avalanchas DAD1 y DAD (Macías *et al.*, 1997). Una erupción pliniana (VEI=3), que ocurrió hace $43,000 \pm 2,000$ años (este trabajo), produjo el Flujo de Pómez Rosado (Macías *et al.*, 1997). Después de este evento eruptivo se presentan dos eventos de destrucción de domos (VEI=4) que producen el depósito de los flujos de bloques y ceniza Zacango ($37,000 \pm 1,125$ años) y El Capulín ($28,925 +625/-580$ años) (Bloomfield y Valastro, 1977; Macías *et al.*, 1997). Entre estas dos erupciones se emplazó el domo parásito del Cerro Gordo.

Después de estos eventos el volcán tiene una erupción vulcaniana (VEI=3) hace $26,610 \pm 1,208$ años que deposita el Flujo de Pómez Blanco (Macías *et al.*, 1997). A continuación se presenta una erupción pliniana (VEI=3), que deposita la Pómez Toluca fechada por Bloomfield *et al.* (1977) en más de 24,000 años. Posteriormente, el volcán presenta cinco erupciones vulcanianas (VEI=1–2), de las cuales se han fechado el flujo de pómez La Ciervita ($24,000 \pm 500$ años; este trabajo); ceniza Las Huertas ($15,340 \pm 150$ años; Newton y Metcalf, 1999) y el flujo de pómez MF2 ($13,400 \pm 350$ años; este trabajo). Una nueva erupción pliniana (VEI=3), ocurrida hace $12,040 \pm 92$ años, deposita la Pómez Blanca Intermedia (Cervantes de la Cruz, 2001). Después se depositaron extensas capas de pómez de caída, la Pómez Toluca Superior, producto de una erupción ultraplina (VEI=5) ocurrida hace $10,445 \pm 95$ (Arce, 1999), la cual produjo una columna eruptiva alta de 35 km. La actividad volcánica concluye con el emplazamiento del domo El Ombligo. Probablemente la última erupción del Nevado de Toluca esté representada por los depósitos de oleada gris y flujo de ceniza café de hace $3,140 \pm 195$ años (Macías *et al.*, 1997).

METODOLOGÍA

Para la elaboración de los mapas de peligros se realizaron 150 secciones estratigráficas detalladas a partir del trabajo de campo y se obtuvieron tres nuevos fechamientos por C¹⁴. Se generó una base de datos de los diferentes even-

tos volcánicos registrados, y se realizó la transformación e integración en formato digital de la información cartográfica analógica (mapas temáticos y tablas de atributos), aplicando técnicas de fotointerpretación (escalas 1:20,000 y 1:75,000), análisis cartográfico (mapas topográficos, geológicos y de uso de suelo en escalas 1:50,000 y 1:250,000) y la revisión e incorporación de la información publicada en trabajos antecedentes (Aceves-Quesada, 1998; Aceves-Quesada *et al.* 1998). Los SIG que se emplearon para la captura y procesamiento de la información fueron ILWIS (ITC, 1998) e IDRISI (Eastman, 1997). El primero se empleó para la integración de la información vectorial y para la digitalización de los rasgos geográficos, y el segundo principalmente para el proceso de sobreposición cartográfica digital (cruzamiento), interpolación, manejo de los mapas criterio, la construcción de la matriz de comparación o valoración *pareada* y para la obtención del mapa integrado de peligros volcánicos, dentro del proceso de toma de decisiones en el análisis multicriterio (Bosque *et al.*, 1994).

Los mapas de peligros fueron digitalizados en formato vectorial y posteriormente fueron exportados a una base *raster* previamente construida en IDRISI. Dicha base digital quedó constituida por 713 filas y 418 columnas, con un tamaño de *pixel* de 125 m. Esta dimensión fue la apropiada para el proyecto, y se basó en las recomendaciones hechas por Valenzuela y Baumgardner (1990) en cuanto a la relación que se debe mantener entre el nivel de información requerida por el usuario y la resolución de la base de datos espacial utilizada, minimizando los errores de área y de forma de los elementos digitalizados. Así a cada uno de los mapas de peligros se le aplicó un proceso de *rasterización* para representar en cada celda o *pixel* un atributo numérico de acuerdo al dato temático que representa.

Asimismo se identificaron los factores o criterios que en mayor o menor medida inciden en la presencia de los peligros en la cuenca de Toluca. Así, para este estudio fueron definidos y evaluados cinco tipos de peligros: 1) flujos de bloques y ceniza, 2) flujos de pómez, 3) depósitos de caída, 4) lahares, 5) avalanchas de escombros.

La delimitación de los diferentes peligros a largo plazo se basó en la reconstrucción de la historia eruptiva del volcán Nevado de Toluca realizada a partir de las relaciones estratigráficas encontradas en campo y de la reevaluación de los trabajos publicados. Se identificaron los tipos de erupciones y los depósitos que han generado, se determinó el máximo alcance de los productos, así como la magnitud y frecuencia de los eventos (Tabla 1), y también se definieron las características del relieve y su morfodinámica. Además, se determinó la dirección del viento y precipitación durante la temporada de lluvias. Esta información se recopiló en el mapa base 1:100,000, y posteriormente se redujo para su presentación a escala 1:250,000. Para el mapa de depósitos de caída fue necesario utilizar un mapa en escala 1:1,000,000 debido a la amplia distribución de las cenizas emitidas durante la última gran erupción pliniana hace 10,500 años (Arce *et al.*, 2003). Además se reevaluó

Tabla 1. Tipo y frecuencia de las erupciones en el Nevado de Toluca.

Tipo de Evento	Productos	Área (km ²)	Volumen (km ³)	Magnitud VEI ¹	Frecuencia	Ejemplos
Freatomagmático	Ceniza de caída	<50 ⁸	<0.1 ⁸	1	8/42,000 años	MF1, MF2; 13,480 años ⁸
	Flujos de ceniza con pómez	100–200 ⁸	<0.2 ⁸			Flujo Las Huertas; 16,000 años ⁷ MF4, MF5, MF6; entre 10,500 y 24,000 años AP
Pliniana (alt. col. <40 km) ³	Pómez de caída	400 ³	<0.33 ⁴	3	4/42,000 años	PTI ~24,000 ⁴
	Flujos de bloques y ceniza con pómez <i>Surges</i>	63 ⁴	<0.1 ⁵			Flujo de Pómez Blanco; ~26,000 a ⁵ Flujo de Pómez Rosa; 43,000 años ⁸ F. Pómez Intermedia; 12,100 años ²
Destrucción y colapso de domos medianos	Flujos de bloques y cenizas <i>Surges</i> masivos	~200 ⁸	---	3	1/42,000 años	Flujo Rosa (H); 24,500 años ⁸
Destrucción y colapso de domos grandes	Flujos de bloques y ceniza	630 ⁴	3.15 ⁴	4	2/42,000 años	Flujo El Capulín; ~28,000 años ⁴ Flujo de bloques y ceniza Zacango; ~37,000 años ⁵
Ultraplíniana (alt. col. >40 km) ³	Pómez de caída Flujos de pómez y líticos <i>Surges</i> Lahares	2,000 ⁶	2.6 ⁶	5	1/42,000 años	PTS; 11,600 años ⁴
Colapso gravitacional del edificio principal.	Avalancha 2 Avalancha 1	>500 ⁸	---	5	2/100,000 años	AV1 y AV2; >>42,000 años ⁵

Nota: Se utiliza un periodo de 42,000 años como referencia debido a que en ese lapso ocurrió la mayor parte de los eventos volcánicos conocidos durante la segunda etapa de actividad del volcán. A las avalanchas se les ha colocado dentro del intervalo de los últimos 100,000 años, ya que su morfología y grado de intemperización indican que no tienen más de 100,000 años de antigüedad, lo cual coincide con lo reportado por Capra y Macías (2000), quienes proponen que se originaron en el intervalo entre 42,000 a 100,000 años.¹Newhall y Self (1982), ² Cervantes de la Cruz (2001), ³Cas y Wright (1993), ⁴Bloomfield y Valastro (1977), ⁵Macías *et al.* (1997), ⁶Arce (1999), ⁷Newton (1999, comunicación personal). ⁸Obtenidos por los autores de este trabajo.

la información publicada (Bloomfield y Valastro, 1977; Bloomfield *et al.*, 1977; de Cserna y Fries, 1981; Cantagrel *et al.*, 1981; Aceves-Quesada, 1997; Macías *et al.*, 1997; Capra y Macías, 2000; García-Palomo *et al.*, 2000, 2002; Arce *et al.*, 2003) y se integró a la información obtenida por medio del trabajo de campo, la fotointerpretación y el análisis cartográfico.

Los resultados mostraron que durante los últimos 100,000 años el volcán Nevado de Toluca ha tenido varios eventos paroxísmicos de tipo peleano, pliniano y algunas erupciones pequeñas de tipo freatomagmático, así como eventos de destrucción de domos y colapsos gravitacionales (Macías *et al.*, 1997). En estas erupciones se han presentado avalanchas, flujos de bloques y ceniza, flujos de pómez, flujos de ceniza, lahares y depósitos de caída.

Se elaboraron modelos con las características morfológicas actuales del volcán, aplicando el método de la línea de energía (Hsu, 1975; Sheridan, 1979), y obteniendo el coeficiente de Heim para los flujos piroclásticos, avalanchas y lahares (Aceves-Quesada, 1998). Para determinar la distribución de los depósitos de ceniza de caída se consideró la dirección de los vientos (Pérez-Villegas, 1990), y se obtuvieron los espesores de los depósitos de caída mediante el trabajo de campo y la consideración de información

publicada (Bloomfield *et al.*, 1977; Aceves-Quesada *et al.*, 1998; Arce, 1999).

Una vez elaborados los mapas se prosiguió con la evaluación y combinación de las variables mediante un análisis común conocido como evaluación con multicriterios (EMC), la cual se aplica en el caso de que los criterios tengan distinta relevancia frente a la evaluación planteada, y se basa en el análisis, discusión y jerarquización de alternativas con el fin de generar soluciones a los problemas territoriales de decisión y asignación de valor, peligrosidad o vulnerabilidad (Díaz-Salgado y López-Blanco, 2000, 2001; Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003a, 2003b). Basados en un objetivo, que en este caso es el de evaluar los peligros volcánicos, se elige y estructura una regla de decisión para integrar los criterios, los cuales se establecen a partir de dicho objetivo (en este caso cinco), y las alternativas de selección que son representadas por los objetos espaciales (*pixeles*) contenidos en las capas temáticas (mapas digitales). Así cada uno de los criterios constituye un mapa temático de la base de datos del SIG, por lo que en esta etapa se entiende que para toda la evaluación es decisivo definir y realizar la selección de criterios de modo adecuado.

La EMC basa su funcionamiento en integrar todos los criterios y alternativas en una matriz, llamada de decisión o

evaluación, donde la columna principal contiene los criterios, la fila principal, las alternativas, y en el interior de la matriz aparecen las puntuaciones obtenidas de los criterios. Dichas puntuaciones representan el valor, nivel de preferencia, grado de atracción o significancia que ha obtenido cada alternativa para cada criterio (Barredo-Cano, 1996). Así en la matriz se asignaron valores cuantitativos a las categorías o clasificaciones correspondientes de los criterios, ya que generalmente en los mapas impresos o en las fuentes bibliográficas consultadas se encuentran dimensionados en escala nominal o cualitativa, por lo que fueron convertidos a una escala común de intervalo o cociente (Tabla 2).

Tal valoración e interpretación permitió, haciendo uso del SIG, que la información cartográfica y temática de los criterios para cada una de las alternativas (*pixeles*), fuera sometida a una serie de operaciones de clasificación, sobreposición, interpolación, cálculo de distancias o proximidades con el fin de representar las distintas clases o valores de peligros, y que, finalmente, las alternativas fueran reclasificadas en valores de menor a mayor de acuerdo a la escala de puntuación manejada (en este caso de 1 a 4). Una vez establecida la matriz de evaluación y los mapas temáticos de peligros, se procedió a establecer la importancia relativa entre los criterios, debido a que no todos tienen la misma influencia o intensidad de preferencia frente al tipo de evaluación proyectada, y se les asignó un peso específico o ponderación. Dicha asignación estuvo basada en las referencias previas, los puntos de vista y experiencia de los especialistas (investigadores y tomadores de decisiones), la consulta y sondeo de opinión con expertos del tema, en la literatura consultada, para todo lo cual se tomó en cuenta las características propias del área en estudio.

Existen distintas aproximaciones para establecer los pesos de los criterios, entre las cuales una de las más difundidas en estudios del territorio y en el ambiente de los SIG es la conocida como “proceso analítico mediante jerarquías”. Este procedimiento fue desarrollado por Saaty (1980), y en años más recientes fue integrado en el SIG IDRISI por Eastman (1997). Este método, conocido en IDRISI como el de Combinación Lineal Ponderada (Eastman, 1997), se basa en el establecimiento de una matriz cuadrada, en la cual el número de filas y columnas estará definido por el número de criterios a ponderar, por lo que es conocida como matriz de comparación simultánea por pares o matriz de comparación pareada (MCP).

En la MCP, cada columna y fila de la matriz se etiquetó con el nombre de uno de los criterios (en el mismo orden en ambos ejes, de izquierda a derecha en las columnas y de arriba abajo en las filas). Sólo se evaluó el triángulo inferior izquierdo ya que el superior derecho es simétricamente idéntico. A continuación se rellenaron las celdas comparando la importancia relativa del criterio de cada fila con relación al criterio de su columna correspondiente, avanzando de columna a columna, de izquierda a derecha. La comparación permite establecer jerarquías o pesos para los criterios, asignando así a cada uno de ellos un valor relativo

de ponderación frente a los demás, basados en una escala de juicios de valor o niveles de importancia establecidos por el mismo procedimiento.

La escala de medida establecida para la asignación de ponderaciones es una escala numérica de 17 valores o jerarquías, que va desde un valor mínimo de 1/9 (el menos importante) hasta 9 (el más importante). Obviamente en la diagonal de la matriz solamente se asignan valores de 1, que denota igualdad consigo mismo en la comparación de cada criterio. De igual forma, si dos factores tienen la misma importancia se les otorgará un valor de 1 (ver Figura 2 y su nota explicativa). El SIG IDRISI contiene un módulo que permite realizar el procedimiento automatizado de sumatoria matricial (y en consecuencia de los mapas), mediante la sobreposición y multiplicación de cada mapa por una constante (pesos de los criterios), produciendo un nuevo mapa, en este caso de intensidad del peligro, con valores entre 1 a 4 en cada *pixel*, siendo el valor 4 el que representa a las áreas con mayor peligro.

Al mismo tiempo que el sistema calcula la MCP para el establecimiento de los pesos de los criterios, también ofrece una medida cuantitativa de la consistencia entre las relaciones establecidas para cada comparación de criterios. Este factor de consistencia indica la probabilidad de que los valores de la MCP hayan sido asignados aleatoriamente. Valores inferiores a 0.1 indican buena consistencia; cuando los valores exceden esa cantidad es necesario calcular de nuevo la matriz.

RESULTADOS: MAPA FINAL DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Para aplicar este método se definieron las variables geológico-volcanológicas que comprendían los peligros volcánicos. Para el análisis de las variables se asignó un peso obtenido con base en la información sobre la distancia máxima de los productos, frecuencia de los eventos y magnitud (*Volcanic Explosive Index*), información obtenida de los mapas de peligros volcánicos y el trabajo de campo. En la elaboración del mapa de peligros se decidió utilizar cuatro intervalos con valores de 1 a 4, asignándose el valor de 1 al peligro más bajo y de 4 el más alto.

Se compararon las cinco variables relacionadas con la ayuda de una escala o tabla de apreciación continua (Figura 2), la cual indica la importancia relativa de la primera variable con respecto a la segunda, esta con la tercera y así sucesivamente, y permite formar una matriz de comparación simultánea por pares. La escala varía de 1/9, que indica una extremadamente baja importancia de la primera variable con respecto a la segunda, a 9 para el caso en que la primera variable es extremadamente más importante que la otra variable.

La MCP obtenida para los peligros volcánicos del Nevado de Toluca (Tabla 2) se elaboró considerando la capacidad destructiva de los peligros y su frecuencia (Tabla

Tabla 2. Matriz de comparación por pares y pesos relativos de los criterios para estimar la peligrosidad de los eventos volcánicos del Nevado de Toluca.

	Lluvia de ceniza	Avalanchas	Flujos de bloques y ceniza	Flujos de ceniza y pómez	Lahares
Lluvia de ceniza	1				
Avalanchas	6	1			
Flujos de bloques y ceniza	8	2	1		
Flujos de ceniza y pómez	9	3	2	1	
Lahares	5	1/3	1/4	1/5	1

1). Se consideró que la variable más importante son flujos piroclásticos debido a su alta capacidad de destrucción y porque una vez que se han presentado, prácticamente es imposible realizar alguna acción de defensa para disminuir los daños o para escapar de sus efectos. También porque casi todas las erupciones ocurridas en los últimos 42,000 años han presentado algún tipo de flujo piroclástico, sea del tipo de flujo de bloques y ceniza o flujos de pómez y ceniza. Además su ocurrencia puede afectar casi cualquier área del volcán. De acuerdo con el análisis de los mapas, las áreas más afectadas estarían al noreste y al sur (Figuras 3A y 3B).

El siguiente criterio fue el de las avalanchas de escombros, que se considera más importante que los lahares y las lluvias de ceniza, pero menos importante que los flujos piroclásticos. Se consideró así a las avalanchas debido a su alta capacidad de destrucción, ante la cual hay pocas defensas, aunque su recurrencia es de sólo dos eventos en los últimos 100,000 años. Las avalanchas en el Nevado de Toluca se han producidos por colapsos gravitacionales asociados a la actividad tectónica. Tres sistemas de fallas afectan al área NNW-SSE, E-W y NE-SW (García-Palomo *et al.*, 2002). Estos sistemas de falla son activos y aunados a la diferencia topográfica que hay hacia el sur y este-noreste, pueden generar en un futuro un nuevo colapso gravitacional hacia estas zonas y producir el emplazamiento de una

avalancha (Figura 3C).

Después de las avalanchas se consideró a los lahares, ya que estos, a pesar de su alta capacidad destructiva, están controlados por la red fluvial que corre a través del sistema de barrancos. Las áreas que resultarían más afectadas se localizan al este y noreste, sobre planicie de la cuenca de Toluca donde desembocan varios arroyos como el Zaguán y Zacango. También hacia el sur desembocarían importantes lahares por los cauces de los ríos San Jerónimo y Chontalcoatlán (Figura 3D). La variable que se consideró como menos importante con respecto a las demás fue la lluvia de ceniza. A largo de su historia, el Nevado de Toluca ha generado diferentes cantidades de depósitos de caída, dejando desde cantidades muy pequeñas hasta espesores de más de un metro en la cuenca de Toluca (Arce *et al.*, 2003). Su peligrosidad puede ser muy alta, ya que afecta a la infraestructura y a la salud de la población (Blong, 1984), sin embargo comparada con los otros peligros se asignó un valor menor (Figura 3E). El área más afectada correspondería a la cuenca de Toluca donde la acumulación de ceniza presenta espesores superiores a un metro.

Finalmente, el mapa de peligros volcánicos total se elaboró continuando con la aplicación de las técnicas de EMC en IDRISI y aplicando la matriz de comparación pareada, donde fueron comparados y ponderados entre sí los cuatro mapas criterio (Tabla 2). Aplicando juicios de

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extremadamente		Fuertemente		Moderadamente		Ligeramente		Igual	Ligeramente		Moderadamente		Fuertemente		Extremadamente	

MENOS IMPORTANTE
↔
MÁS IMPORTANTE

Figura 2. Escala de 17 jerarquías de importancia relativa para la construcción de la matriz de comparación por pares de factores o variables de decisión. Nota: Esta escala se usa como referencia durante el proceso de “sondeo de opinión” entre los expertos o *rating* para establecer la importancia relativa entre los pares de factores o criterios. Para escoger una de las 17 jerarquías de importancia relativa se debe considerar el criterio que está en la fila de la matriz de comparación pareada (ver Tabla 2), con respecto al criterio de la columna de la misma matriz. Por ejemplo, si se considera que el criterio de lahares es moderadamente menos importante que los flujos de bloques y cenizas, entonces el valor a escoger es de 1/5 (Fila 3, columna 1, de la matriz de la Tabla 2). Fuente: modificado de Eastman (1997).

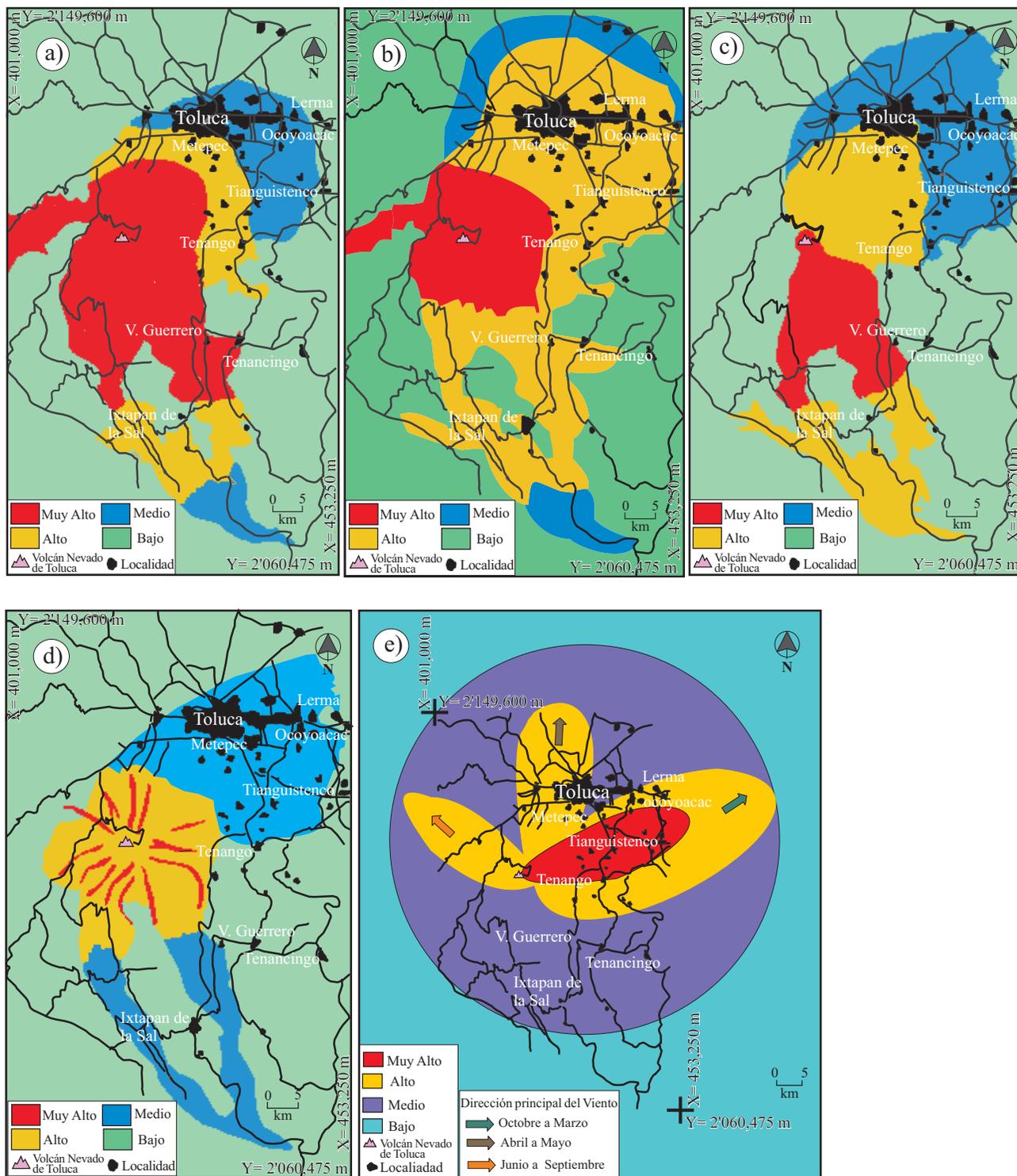


Figura 3. Mapas de peligros volcánicos: a) Mapa de peligros por flujos de bloques y ceniza, b) Mapa de peligros por flujos de pómez y ceniza, c) Mapa de peligros por avalanchas de escombros, d) Mapa de peligros por lahares, e) Mapa de peligros por caída de ceniza.

valor basados en la historia eruptiva del volcán se estableció que los flujos de bloques y ceniza eran ocho veces más importantes que la lluvia de ceniza, dos veces más que las avalanchas de escombros, y 1/2 menos importantes que los flujos de pómez y ceniza (Tabla 2). Los flujos de pómez y ceniza son nueve veces más importantes con respecto a la caída de cenizas, tres veces con respecto a las avalanchas y dos veces con respecto a los flujos de bloques y ceniza. Las avalanchas fueron consideradas seis veces más importantes que las caídas de ceniza. Por su parte, los lahares fueron estimados como cinco veces más importantes que las caídas de ceniza, pero 1/3 ligeramente menos importantes que las avalanchas, 1/4 menos que los flujos de bloques y ceniza, y 1/5 moderadamente menos que los flujos de pómez y ceniza.

Realizada la EMC, se establecieron cuatro intervalos y se obtuvo el mapa final de peligros (Figura 4), en el cual quedan delimitadas las áreas susceptibles de ser afectadas en caso de una nueva erupción en el Nevado de Toluca. Las áreas de peligro bajo son aquellas que se verían afectadas en caso de un evento extraordinario ($VEI > 4$), como en el caso de la erupción pliniana de hace 10,500 años (Macías *et al.*, 1997), cuya frecuencia ha sido de una erupción en los últimos 100,000 años. El área con nivel medio de peligro sería afectada por una erupción grande ($VEI = 3-4$) acompañada de flujos piroclásticos, lahares y lluvias de ceniza. Para ello, se han considerado los eventos asociados a la destrucción de domos de hace 37,000 años AP (Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2002) y 28,000 años (Bloomfield y Valastro, 1977; Macías *et al.*, 1997) y las erupciones plinianas de 24,000 años AP (Bloomfield y Valastro, 1977), 12,100 años AP (Cervantes de la Cruz, 2001; Arce *et al.*, 2005) y 10,500 años AP (Arce *et al.*, 2003). La zona de peligro alto es un área que ha sido afectada por lahares, flujos de bloques y ceniza, flujos de ceniza y pómez, con una probabilidad alta, con fenómenos de magnitud media a alta, y frecuencia de al menos ocho grandes eventos eruptivos en los últimos 60,000 años. El área de mayor peligro corresponde a las áreas que han sido afectadas por todas las erupciones conocidas del volcán y que por lo tanto tienen alta probabilidad de verse afectadas en caso de una nueva erupción. Con esta información se establece que las áreas más afectables serían la ciudad de Toluca, y los centros industriales de Toluca-Lerma-San Mateo Atenco y Ocoyoacac-Tianguistengo, debido a su importancia económica y por encontrarse en las áreas donde los productos eruptivos se han presentado con mayor frecuencia; además, la morfología actual del volcán indica que, en caso de una nueva erupción, esos serían los lugares más favorables para el transporte, depósito y emplazamiento de los productos volcánicos.

CONCLUSIONES

A partir del análisis estratigráfico se observa que el Nevado de Toluca ha tenido al menos 18 erupciones durante

los últimos 60,000 años, siendo las más violentas las de tipo pliniano y ultrapliniano, aproximadamente cada 12,000 años, intercaladas con algunas erupciones vesuvianas y vulcanianas asociadas a la destrucción de los domos. Esta actividad ha estado acompañada de emisiones de flujos piroclásticos (flujos de bloques y ceniza, flujos de ceniza y pómez y *surges*), lahares, avalanchas de escombros y caídas de ceniza con pómez. Su última erupción importante ocurrió aproximadamente hace 10,500 años.

Con base en información de estudios previos se identificaron cinco tipos de peligros volcánicos (flujos de bloques y ceniza, flujos de pómez, lahares, avalanchas de escombros y caída de ceniza) que fueron integrados dentro del SIG y analizados mediante la evaluación por multicriterios. Los eventos más destructivos por su energía y frecuencia fueron los flujos de bloques y ceniza y de pómez, que han alcanzado distancias de más de 35 km desde la cima del volcán.

Las principales áreas afectadas en caso de una nueva erupción serían al noreste y sur del volcán, debido a la diferencia de alturas y al mayor desarrollo de barrancos. Los lahares afectarían principalmente algunas áreas al este y sur del volcán, donde se encuentran los barrancos más profundos y desarrollados, como los de los ríos San Jerónimo, Chontalcuatlán, Arroyo Grande y El Zaguán. Las áreas que podrían verse afectadas por las avalanchas de escombros serían al sur y este del volcán, favorecidas por las fallas activas y la diferencia en altura. Este tipo de peligro volcánico tiene una probabilidad baja de ocurrencia porque en la historia del volcán solamente se han identificado dos avalanchas de escombros situadas al sur del volcán, cuyas edades son mucho mayores que 50,000 años AP.

El peligro por caída de ceniza durante los meses de octubre a marzo se localiza al este y al noreste del volcán, principalmente, de abril a mayo al norte y de junio a septiembre al noroeste. En caso de una erupción de pequeña a media ($VEI = 1-3$), la zona más afectada sería la cuenca de Toluca, pero en caso de presencia de erupciones grandes ($VEI > 4$) la zona afectada incluiría a la Ciudad de México.

La metodología utilizada aquí se propone como una opción para la elaboración de mapas de peligros, que además permite, por su alta capacidad de manejo de información, un análisis rápido y conciso en el corto, mediano y largo plazo que puede ser aplicado en el proceso de toma de decisiones y en la creación de mapas preventivos de riesgos.

Como resultado del análisis se definieron cuatro niveles de peligros. El nivel de bajo peligro corresponde a áreas afectadas principalmente por caída de ceniza y ocasionalmente por flujos piroclásticos. El nivel de peligro medio corresponde con regiones afectadas por erupciones de tipo vesubiano y pliniano, con importantes depósitos de flujos piroclásticos, caídas de ceniza y lahares. El nivel de peligro alto corresponde casi siempre a áreas afectadas por flujos piroclásticos, lahares y caídas de ceniza y con posibilidades de verse afectadas también por avalanchas. Dentro de esta área queda comprendido un alto número de localidades dentro de las que destaca la Ciudad de Toluca.

El nivel de más alto peligro corresponde al área de la cima del volcán, aproximadamente por arriba de los 3,000 m snm que corresponde a regiones cuyos depósitos muestran que todas las erupciones anteriores las han cubierto, sean erupciones mayores o menores.

En cuanto a la aplicación de las técnicas de EMC, es importante mencionar las ventajas que ofrece esa metodología integrada dentro de un SIG como herramienta de uso común para diversos estudios, como el aquí presentado, en donde varios factores y variables influyen en la determinación de algún hecho, fenómeno u objetivo, y varios puntos de vista deben ser considerados en la toma de decisiones. Además, esta metodología facilita el manejo cuantitativo de la evaluación, con lo cual se da mayor validez de aproximación con respecto a las condiciones reales del fenómeno y se evita la subjetividad de análisis y elección.

Una razón importante para el uso de las técnicas de EMC, es que permiten evaluar todos los factores simultáneamente sin necesidad de realizar una serie de operaciones de sobreposición cartográfica digital, modificación de los atributos de los valores por un valor constante, o bien una reclasificación final del mapa resultante del proceso de combinación de todas las capas de información.

Con respecto a la selección y evaluación de los criterios y pesos de los criterios, se debe decir que existe un cierto nivel de subjetividad de los expertos al realizar la ponderación simultánea de dos factores al construir la matriz de comparación pareada, sin embargo la aplicación de este tipo de análisis permite considerar la experiencia de los expertos en las áreas de la vulcanología y del estudio y manejo de los desastres y riesgos volcánicos, ya sea a partir de la consulta de los documentos publicados o bien a partir de un sondeo de opinión, lo cual hace que la asignación de las ponderaciones y los resultados tengan solidez y veracidad.

Este trabajo demuestra la posibilidad de aplicar técnicas alternativas de toma de decisiones con respecto a la determinación de los niveles de peligros volcánicos, lo cual resulta ser un antecedente que puede ser aplicado en evaluaciones de otros volcanes que presentan características semejantes a las del Nevado de Toluca.

REFERENCIAS

- Aceves-Quesada, J.F., 1997, Geología y geomorfología del Volcán Nevado de Toluca: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría, 116 p.
- Aceves-Quesada, J.F., 1998, Evaluación del riesgo volcánico en el Nevado de Toluca (Mapas de riesgo volcánico basados en Sistemas de Información Geográfica), en Primer Simposio del Posgrado en Ciencias de la Tierra: México DF., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 98-101.
- Aceves-Quesada, J.F., Martín del Pozzo, A.L., López-Blanco, J., 1998, Determinación del riesgo volcánico en el Nevado de Toluca (resumen), en Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra: México, D.F, Sociedad Geológica Mexicana, p. 42.
- Arce, J.L., 1999, Reinterpretación de la erupción pliniana que dio origen a la Pómez Toluca Superior, Volcán Nevado de Toluca: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 99 p.
- Arce, J.L., Macías J.L., Vázquez-Selem L., 2003, The 10.5 Ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico; Stratigraphy and hazard implications: Geological Society of America Bulletin, 115(2), 230-248.
- Arce, J.L., Cervantes, K.E., Macías, J.L., Mora, J.C., 2005, The 12.1 ka Middle Toluca Pumice; A dacitic Plinian-subplinian eruption of Nevado de Toluca in Central Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 147(2): 125-143.
- Aronoff, S., 1989, Geographic Information Systems: Ottawa, Canada, WDL Publications, 294 p.
- Barredo-Cano, J.I., 1996, Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio: Madrid, Ed. Ra-Ma, 264 p.
- Blong, R.J., 1984, Volcanic hazards; a sourcebook on the effects of eruptions: Orlando, Florida, Academic Press, 424 p.
- Bloomfield, K., Valastro, S. Jr., 1977, Late Quaternary tephrochronology of Nevado de Toluca Volcano, Central México: Overseas Geology and Mineral Resources, 46, 15 p.
- Bloomfield, K., Sánchez-Rubio, G., Wilson, L., 1977, Plinian eruptions of Nevado de Toluca volcano: Geologische Rundschau, 66, 120-146.
- Bosque, J., Escobar, F.J., García, E., Salado, M.J., 1994, Sistemas de Información Geográfica (prácticas con PC para ARC/INFO e IDRISI): Madrid, Ed. Ra-Ma, 478 p.
- Burrough, P.A., 1986, Principles of Geographical Information Systems for land resources Assessment: Oxford, Clarendon Press, 194 p.
- Cantagrel, J.M., Robin, C., Vincent, P., 1981, Les grandes étapes d'évolution d'un volcan andésitique composite; exemple du Nevado de Toluca (Mexique): Bulletin Volcanologique, 44, 177-188.
- Capra L., 2000, Colapsos de edificios volcánicos; Transformación de avalanchas de escombros en flujos de escombros cohesivos: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 176 p.
- Capra, L., Macías, J.L., 2000. Pleistocene cohesive debris flow at Nevado de Toluca volcano, central Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102, 149-168.
- Ceballos-Silva A., López-Blanco, J., 2003a, Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping; a study in Central Mexico: Agricultural Systems, 77,117-136.
- Ceballos-Silva A., López-Blanco J., 2003b, Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for Oat in Central Mexico: Agriculture, Ecosystems & Environment, 95, 371-377.
- Cervantes de la Cruz, K.E., 2001, La Pómez Blanca Intermedia; depósito producido por una erupción pliniana-subpliniana del Volcán Nevado de Toluca hace 12,100 años: Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 86 p.
- Crandell, D.R., Booth, B., Kuzumadinata, K., Shimozuru, D.D., Walker, G.P.L., Westercamp, D., 1984, Source-book for volcanic zonation: Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Natural Hazards Series, 97 p.
- de Cserna, Z., Fries C, Jr., 1981, Hoja Taxco 14Q-h (7), con resumen de la geología de la hoja Taxco, Estados de Guerrero, México y Morelos: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México Serie 1: 100.000, 1 mapa con texto, 47 p.
- Díaz-Salgado, J., López-Blanco, J., 2000, Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Investigaciones Geográficas, 41, 62-80.
- Díaz-Salgado, J., López-Blanco, J., 2001, Aplicación de técnicas de análisis multicriterio con SIG para la delimitación de áreas con potencial para la acuicultura costera de camarón en la zona Pacífico Sur de México: Universidad Autónoma del Estado de México, Quivera, Revista de Estudios Territoriales, 3(5), 7-27.
- Eastman, J.R., 1997, IDRISI for Windows, Version 2.0, User's Guide: Worcester, MA, Clark University, Clark Laboratories for

- Cartographic Technologies and Geographic Analysis, 201 p.
- Fournier d'Albe, E.M., 1979, Objectives of volcanic monitoring and prediction: *Journal of the Geological Society of London*, 136, 312-326.
- García-Palomo, A., Macías J.L., Garduño, V.H., 2000, Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, central Mexico: *Tectonophysics*, 318, 281-302.
- García-Palomo, A., Macías J.L., Arce J.L., Capra L., Garduño V.H., Espíndola J.M., 2002, Geology of the Nevado de Toluca Volcano region and surrounding areas, central Mexico: *Geological Society of America, Map and Chart Series MCH089*, p.1-48.
- Gómez-Fernández, F., 1995, Los sistemas de información geográfica (GIS) en la evaluación del riesgo volcánico, *en* Ortiz, R. (ed.), *Riesgo Volcánico: Cabildo de Lanzarote, Serie Casa de los Volcanes*, 5, 123-153.
- Gómez-Fernández, F., 1998, Development of a volcanic risk assessment. Information System for the prevention and management of volcanic crisis; stating the fundamentals, *en* Brebbia, C.A., Pascolo, P. (eds.), *GIS Technologies and Their Environmental Applications: Southampton, Computational Mechanics Publications*, 111-120.
- Gómez-Fernández, F., 2000, Contribution of geographical information systems to the management of volcanic crisis: *Natural Hazards*, 21, 347-360.
- Hsu, K.J., 1975, Catastrophic debris stream (Sturzstroms) generated by rockfalls: *Geological Society of America Bulletin*, 86, 129-140.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003, Anuario Estadístico del Estado de México: Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 612 p.
- International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1998, The Integrated Land and Water Information System ILWIS, User's Manual: Enschede, Holanda, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 511 p.
- Latter, J.H. (ed.), 1989, *Volcanic Hazard; Assessment and Monitoring*: Springer Verlag, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), *Proceedings in Volcanology*, 1, , 625 p.
- López-Blanco, J., 2005, *Sistemas de información geográfica en estudios de geomorfología ambiental y recursos naturales*: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Serie Seminarios, 187 p.
- Macías, J.L., Carrasco, G., Delgado, H., Martín del Pozo, A.L., Siebe, C., Hoblitt, R.P., Sheridan, M.F., y Tilling, R.I., 1995, *Mapa de Peligros del Volcán Popocatepetl*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1 mapa.
- Macías, J.L., García, A., Arce, J.L., Siebe C., Espíndola J.M., Komorowski J. C., Scott, K., 1997, Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, central Mexico: *Brigham Young University, Geology Studies*, 42(1), 493-528.
- Martin del Pozzo, A.L., Sheridan, M.F., Barrera, D., Lugo-Hubp J., Vázquez-Selem, L., 1995, *Mapa de Peligros del Volcán de Colima*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1 mapa.
- National Land Agency, Government of Japan, 1992, *Guidelines for preparing Volcanic Hazard Maps*: Tokio, Government of Japan, National Land Agency, Disaster Prevention Bureau, Earthquake Disaster Countermeasures Division, 58 p.
- Newhall, C., Self, S., 1982, The volcanic explosivity index (VEI); an estimate of explosive magnitude for historical volcanism: *Journal Geophysical Research*, 87, 1231-138.
- Newton, A.J., Metcalfe S. E., 1999, Tephrochronology of the Toluca Basin, Central Mexico: *Quaternary Sciences Reviews*, 18, 1039-1059.
- Ortiz, R., Araña, V., 1995, Daños que pueden producir las erupciones, *en* Ortiz, R. (ed.), *Riesgo Volcánico: Cabildo de Lanzarote, Serie Casa de los Volcanes*, 5, 37-67.
- Pareschi, M.T., Cavarra, L., Favalli, M., Giannini, F., Meriggi, A., 2000, GIS and Volcanic Management: *Natural Hazards*, 21, 361-379.
- Pérez-Villegas, G., 1990, *Viento dominante durante el año (IV. 4.2)*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, IV. Naturaleza, 4. Clima, escala: 1:4,000,000, 1 mapa.
- Rosi, M., 1996, Quantitative reconstruction of recent volcanic activity; A contribution to forecasting of future eruptions, *en* Scarpa, R., Tilling, R.I. (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*: Berlín, Springer-Verlag, 631-674.
- Saaty, T.L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process; Planning, Priority Setting Resource Allocation*: New York, McGraw-Hill, 287 p.
- Scarpa, R., Tilling, R.I., (eds.), 1996, *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*: Berlín, Springer, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)/International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), 839 p.
- Sheridan, M.F. 1979, *Emplacement of Pyroclastic Flows; A review*: Geological Society of America, Special Paper, 180, 125-136.
- Sheridan M.F., Carrasco-Núñez G., Hubbard B.E., Siebe, C., Rodríguez-Elizarráz, S., 2001, *Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*, escala 1:250,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Puebla, Gobierno del Estado de Veracruz, 1 mapa.
- Tilling, R.I. (ed.), 1993, *Apuntes para un Curso Breve sobre Los Peligros Volcanicos*: Santa Fé, NM, Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos (WOVO)/International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), traducido al español por B. Beate, 125 p.
- Torrieri, F., Concilio, G., Nijkamp, P., 2002, Decision support tools for urban contingency policy; A scenario approach to risk management of the Vesuvio area in Naples, Italy: *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 10(2), 95-112.
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO)/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1985, *Volcanic Emergency Management*: New York, United Nations, 86 pp.
- Valenzuela, R.C., Baumgardner, M., 1990, Selection of appropriate cell sizes for thematic maps: *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC Journal*, 3, 219-224.
- Van Westen C.J., 1993, Remote sensing and geographic information system for geological hazard mitigation: *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC Journal*, 4, 393-399.
- Van Westen, C.J., 1997a, Hazard, vulnerability and risk analysis, *en* ILWIS for Windows, Applications Guide: Amsterdam, Holanda, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1-18.
- Van Westen, C.J., 1997b, Modeling erosion from pyroclastic flow deposits in Mount Pinatubo, *en* ILWIS for Windows, Applications Guide: Amsterdam, Holanda, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 53-71.
- Westercamp D., 1982, The five components of volcanic risk: *Impact of Science in Society*, 32(1), 43-57.
- Yokoyama I., Tilling, R.I., Scarpa, R., 1984, *International mobile Early-Warning Systems(s) for volcanic eruptions and Related Seismic Activities*: Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), FP/2106-82-01(2286), 102p.

Manuscrito recibido: Septiembre 20, 2005

Manuscrito corregido recibido: Noviembre 26, 2005

Manuscrito aceptado: Diciembre 15, 2005