



La Integración regional de la Amenaza volcánica para el Parque Nacional de Los Nevados en ambiente SIG

HENRY VILLEGAS

INGEOMINAS. Área de Reconocimientos Geo-científicos. Diagonal 53 No. 34-53, Bogotá, D.E., Colombia. E-mail: henville@ingeomin.gov.co; villegashenry@hotmail.com

VILLEGAS, H. (2003): La Integración regional de la Amenaza volcánica para el Parque Nacional de Los Nevados en ambiente SIG.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 28, pp. 13-23, 14 Figs., 1 Tabla, Bogotá.

RESUMEN

Los volcanes tienden a distribuirse como cinturones lineales largos, cercanos a los límites donde convergen las placas corticales. Tal es el caso del Parque Nacional de los Nevados, situado en los Andes Colombianos, donde la Cordillera Central alcanza sus mayores alturas; está conformado por los volcanes activos de Cerro Bravo, Ruiz, Santa Isabel, Tolima y Machín.

Los mapas de amenaza de estos volcanes fueron incorporados en un SIG; al desplegarlos, fue posible observar que las áreas de amenaza definidas para cada uno, se superponen con las establecidas para volcanes vecinos. Los dos criterios preponderantes para la representación de la amenaza volcánica en un mapa son el probabilístico, que enfatiza en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de todos los fenómenos volcánicos, y el vulcanológico, que delimita áreas que podrían ser afectadas por una fenomenología volcánica específica.

Se normalizaron e integraron los cinco mapas de amenaza probabilística de los volcanes activos del Parque Nacional de los Nevados. El mapa resultante muestra que hay áreas amenazadas por la actividad de más de un volcán. De acuerdo con la concepción vulcanológica, se realizó la integración regional de la amenaza volcánica para la fenomenología de lahares. El criterio probabilístico es adecuado para manejar emergencias volcánicas a corto plazo, mientras el vulcanológico es útil para realizar programas de educación sobre los volcanes y sus amenazas, en tiempos sin crisis volcánica, dirigidos a ciudadanos comunes y funcionarios públicos.

Se realizó la visualización de las bases de datos que constituyen los mapas de Amenaza Volcánica del Parque Nacional de los Nevados (por lahares y probabilístico). Los polígonos de amenaza se superpusieron sobre imágenes Landsat TM y modelos digitales de elevación, para generar vistas en perspectiva. Estos productos mejoran la comunicación de las amenazas entre los vulcanólogos y personas no familiarizadas con los volcanes.

Palabras clave: *Amenaza volcánica, Landsat TM, Lahar, Mapa de amenaza volcánica, Parque Nacional de los Nevados, Percepción remota, Riesgo volcánico, SIG, visualización de bases de datos, Volcán Cerro Bravo, Volcán Machín, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Nevado del Tolima.*

ABSTRACT

Volcanoes tend to be arranged in long, linear belts near boundaries where crustal plates are converging. Such is the case of Los Nevados National Park located in the Colombian Andes, where the Central Cordillera reaches its biggest heights. This park is composed by Cerro Bravo, Ruiz, Santa Isabel, Tolima and Machín active volcanoes.

Volcanic hazard maps of these volcanoes were incorporated into a GIS. It was possible to observe that volcanic hazard zones overlap among themselves when displayed. The two main criteria for delineating volcanic hazard zones on a map are probabilistic, which place emphasis on estimating the probability of occurrence of all volcanic processes, and volcanologic, which delineates areas likely to be affected by a given kind of volcanic event.

The five probabilistic hazard maps of Los Nevados National Park active volcanoes were normalized and integrated. The output map shows areas threatened by volcanic activity from more than one volcano. Volcanic hazard regional integration for lahars was carried out in Los Nevados National Park, according to volcanologic criterion for delineating volcanic hazard zones. Probabilistic criterion is suitable for short term volcanic hazard assessment, while the volcanologic one is useful for carrying out education programs about volcanoes and its hazards, to be conducted in a non-crisis atmosphere, and addressed to citizens and public officials exposed to volcanic hazard.

Database visualization was carried out for Los Nevados National Park integrating Volcanic Hazard maps (for lahars and probabilistic). Volcanic hazard polygons were superimposed on Landsat TM images and digital terrain models, in order to generate perspective views. These products help to improve the communication between volcanologists and people not familiar with volcanoes.

Keywords: *Cerro Bravo Volcano, Database visualization, GIS, Lahar, Landsat TM, Los Nevados National Park, Machín Volcano. Nevado del Ruiz Volcano. Nevado de Santa Isabel Volcano, Nevado del Tolima Volcano, Remote sensing, Volcanic hazard, Volcanic hazard map. Volcanic risk.*

INTRODUCCION

Los volcanes tienden a distribuirse como cinturones lineales largos, cercanos a los límites donde están convergiendo las placas corticales. Dichos cinturones cubren menos del 1% de la superficie de la tierra y marcan los límites entre las placas tectónicas mayores; la mayoría se localizan cerca de fosas oceánicas, donde delgadas placas oceánicas descienden bajo placas continentales. Los volcanes suelen ubicarse 100 a 200 Km encima de una zona sísmica inclinada, que traza la ruta descendente de la placa oceánica (SIMKIN 1994).

Se tiene conocimiento de que más de 1.300 volcanes han entrado en erupción durante los últimos 10.000 años; aproximadamente la mitad de estos han registrado erupciones en tiempos históricos. Dos tercios de los volcanes activos se ubican en o cerca de los límites de las placas tectónicas en la Región Circumpacífica (TILLING 1993). A esta mayoría pertenece el Parque Nacional de los Nevados, con 38.000 hectáreas de extensión, situado en la región meridional del país, donde la Cordillera Central de los Andes colombianos alcanza sus mayores alturas (GARCÉS & DE LA ZERDA 1994) (Fig. 1).

Este parque comprende siete (7) volcanes, los cuales de norte a sur se denominan como Cerro Bravo, Ruiz, El Cisne, Santa Isabel, Quindío, Tolima y Machín (Fig. 2). El arreglo geo-tectónico que conduce al desarrollo de este complejo volcánico, es generado por la interacción de las placas litosféricas de Nazca y Sur América, que facilita la creación de la micro-placa del Bloque Andino en medio de las mismas. La actividad volcánica es común a lo largo de dicha micro-placa, que es un típico margen continental activo (PARRA & CEPEDA 1990).

Si se mantiene la frecuencia- eruptiva actual, con la rápida expansión de la población humana, especialmente en países en vía de desarrollo ya densamente poblados como Colombia, millones de personas estarán bajo la

amenaza de alguna actividad volcánica futura. Dado que el "abandono total de todas las áreas volcánicas...no es una alternativa realista" (WALTER 1982 en TILLING 1993), la comunidad científica y las autoridades civiles encaran un problema, al tenor que enfrentar los peligros potenciales de las erupciones futuras (TILLING *op. cit.*).

Los mapas de zonas de amenaza volcánica, son tal vez la información más comprensible para que el público en general, las autoridades del gobierno y los ciudadanos comunes, puedan realizar planes para las posibles situaciones de emergencia. Desafortunadamente hasta el mapa de amenaza volcánica más confiable, será de poca utilidad si no es presentado de manera que sea comprensible para políticos, comités de emergencia y ciudadanos comunes (WRIGHT & PIERSON 1992).

Este trabajo discute los diferentes criterios que se utilizan para delimitar zonas de amenaza volcánica sobre un mapa, y muestra aplicaciones de los sistemas de información georreferenciada (SIG), en la integración de los mapas de amenaza volcánica que se han realizado para los volcanes que constituyen el Parque Nacional de los Nevados, al igual que su combinación con datos topográficos y de percepción remota, para generar productos didácticos que ayuden a los vulcanólogos, en el difícil proceso de comunicar las incertidumbres de los volcanes y sus procesos, a personas no familiarizadas con los mismos.

HISTORIA DE LOS ESTUDIOS DE AMENAZA VOLCANICA EN EL PARQUE NACIONAL DE LOS NEVADOS

La erupción catastrófica del Volcán Nevado del Ruiz de 13 de Noviembre de 1985, obligo al estado colombiano a asignar el estudio de los riesgos geológicos a Servicio



Fig. 1. Modelo digital de elevación del terreno de Colombia, donde se muestra la ubicación del Parque Nacional de los Nevados (área de estudio), y los volcanes activos que le constituyen. Los tonos más claros corresponden con las alturas mayores, mientras que los oscuros expresan las menores (VILLEGAS 2002).

Geológico Colombiano (INGEOMINAS). Dicha erupción fue la peor registrada en el mundo durante la década de los ochenta.

Una secuencia compleja de oleadas piroclásticas y flujos piroclásticos, eruptados por el Volcán Nevado del Ruiz en la Cordillera Central de Colombia, interactuaron con el hielo y la nieve del casquete glaciar de su cima, desencadenando lahares catastróficos (flujos de escombros de origen volcánico), que descendieron por los ríos Gualí, Azufrado, Lagunilla y Nereidas, causando la muerte a 23.080 personas que habitaban en las proximidades del volcán (Anónimo 1986). Con estos lahares, considerados los más mortíferos de la historia registrada (PIERSON *et al.* 1990), la erupción del Ruiz

representa el peor desastre volcánico desde la erupción de Monte Pelée, siendo el segundo del Siglo XX y el cuarto de la historia de la humanidad (VOIGHT 1990) (Tabla 1).

El Municipio de Armero, localizado en las inmediaciones del cañón de desembocadura del Río Lagunilla, aproximadamente a 74 Km aguas abajo de la cima del cráter del Ruiz, fue virtualmente borrado del mapa (Fig. 3) y el 75% de sus habitantes perecieron (Anónimo *op. cit.*). Este evento de naturaleza catastrófica, al igual que el terremoto de 1985 en la Costa de Méjico, que causó la muerte de 30.000 personas en Ciudad de Méjico, hizo declarar la década de los noventas como "Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales" (STIX *et al.* 1997).

El 20 de septiembre de 1985, casi dos meses antes de que ocurriera la tragedia del Ruiz, seis geólogos de INGEOMINAS visitaron el volcán para realizar el mapa preliminar de la zonificación de sus amenazas volcánicas, e incrementar la vigilancia visual y sismológica. Se esperaba que este mapa estuviera terminado para comienzos de Noviembre de 1985, y que fuera preparado de acuerdo con las recomendaciones de UNDRO (United Nations Relief Organization), bajo los auspicios de UNDRO y UNESCO.

La primera aproximación cartográfica a las amenazas volcánicas del Ruiz, fue presentada el 7 de Octubre de 1985 a autoridades del Gobierno Nacional. Se realizó a escala 1:50.000, contenía explicaciones sobre las diversas zonas de amenaza y la manera como fueron determinadas, siendo el primer mapa de este tipo realizado en Colombia (PARRA & CEPEDA 1990). Así el inminente peligro que conlleva la actividad del Nevado del Ruiz a finales de 1984, es lo que inicia el estudio de la amenaza volcánica en Colombia, siendo esto apenas el comienzo del camino en la investigación de los riesgos geológicos en general, y de los volcánicos en particular (CEPEDA *et al.* 1987).

El Parque Nacional de los Nevados ha sido escenario para la elaboración de cuatro (4) mapas adicionales de

TABLA 1
Los peores desastres volcánicos de la historia registrada

LOCALIZACION	FECHA	TASA DE MORTANDAD
Tambora (Indonesia)	1815	92.000 personas
Krakatoa (Indonesia)	1883	36.000 personas
Mount Pelée (Martinica)	1902	28.000 personas
Armero (Colombia)	1985	23.000 personas

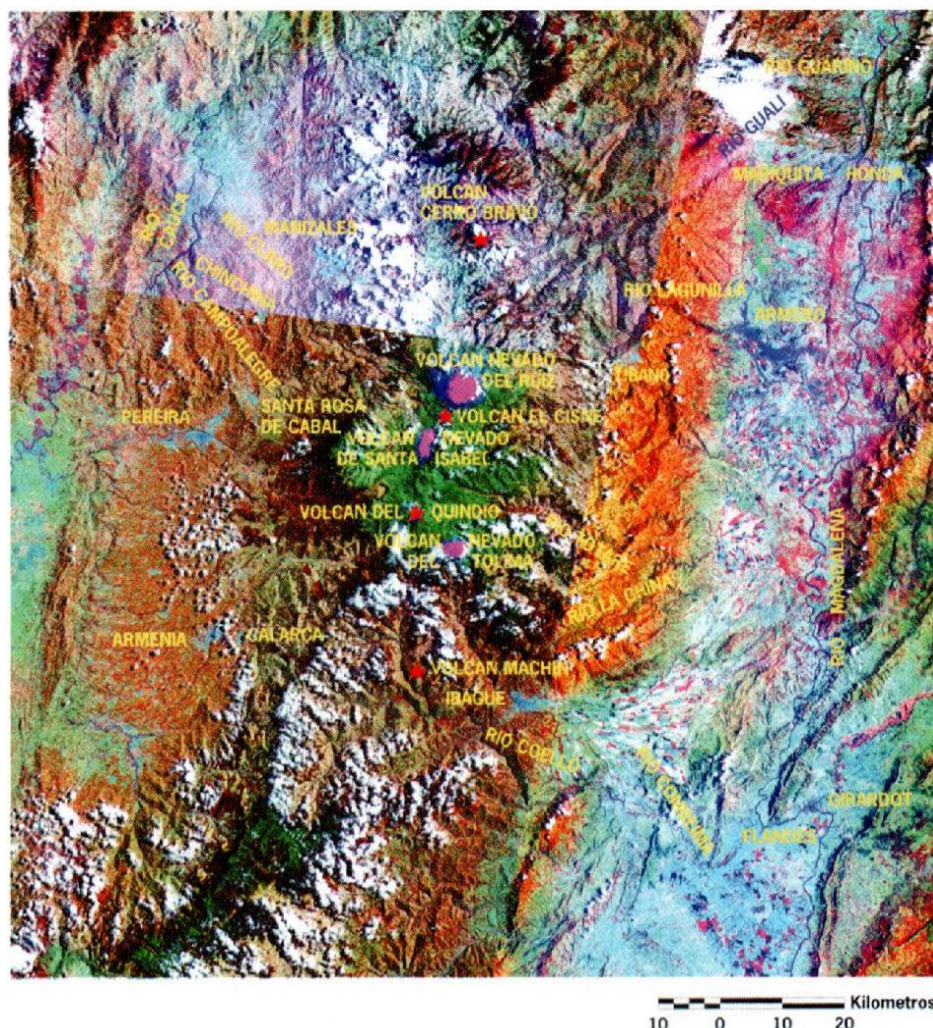


Fig. 2. Mosaico de cuatro escenas Landsat TM 5, en composición de falso color 4 en rojo, 5 en verde, 2 en azul, correspondiente con el área del Parque Nacional de los Nevados. Los casquetes glaciares de los volcanes del Ruiz, Santa Isabel y el Tolima se observan en color violeta, mientras las cimas de los volcanes Cerro Bravo, El Cisne, Quindío y Machín se resaltan con estrellas rojas. El lahar que sepultó Armero aparece como una mancha azul hacia el noreste (Villegas 2002).

amenaza volcánica: el del Nevado del Tolima (CEPEDA & MURCIA 1988); el de Cerro Bravo (MONSALVE & NUÑEZ 1992); el del Complejo de Domos de Santa Isabel, realizado en convenio de cooperación entre la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) e INGEOMINAS (INGEOMINAS-CARDER 1994); y el del Machín (CEPEDA *et al.* 1996), elaborado como parte del Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales de las Naciones Unidas, y dentro de los planes estratégicos institucionales de INGEOMINAS (CEPEDA *et al.* 1996).

LOS VOLCANES DE EL PARQUE NACIONAL DE LOS NEVADOS

El Parque Nacional de los Nevados, abarca uno de los mosaicos naturales más complejos de Colombia. En sus páramos, un gran número de lagunas llena las depresiones que labraron las lenguas de antiguos glaciares y algunos cráteres extintos; las selvas andinas dominan las laderas más bajas, mientras que desde las alturas mayores, gran cantidad de riachuelos descienden de los glaciares y alimentan los ríos

Lagunilla, Combeima y Gualí (GARCÉS & DE LA ZERDA 1994). Siete nevados coronan sus macizos de rocas volcánicas, siendo de norte a sur: Cerro Bravo, Ruiz, El Cisne, Santa Isabel, Quindío, Tolima y Machín (Fig. 2).

A continuación se describen dichos volcanes. En algunos se anotan sus índices de explosividad volcánica (Volcanic Explosivity Index — VEI de Newhall & Self 1982 en SIMKIN 1994), que son una medida de la magnitud de las erupciones de los volcanes. Tales índices constituyen para la vulcanología su escala de medida determinada por métodos instrumentales, análoga a lo que es la escala de Richter para los estudios de sismología. El VEI está basado principalmente en el volumen de productos explosivos eruptados, la altura de la columna de erupción y los indicadores cualitativos adicionales que se consideren necesarios (SIMKIN 1994)

En promedio, erupciones con VEI ≥ 2 producen al menos 10^6 m^3 de tephra; aquellas con VEI ≥ 3 generan 10^7 m^3 de tephra, tal como lo hizo la erupción del Ruiz del 13 de Noviembre de 1985; erupciones con VEI ≥ 5 , como la del Monte St. Helena (Estados Unidos) en 1980, expelen más de 10^9 m^3 o 1 Km^3 de tephra; aquellas como la de Krakatoa (Indonesia) en 1883, que generó el peor desastre volcánica de la historia registrada, tienen un VEI de 6 y emiten más de 10 Km^3 de tephra (SIMKIN *op cit.*).

Volcán Cerro Bravo

Es un estrato-volcán andesítico-dacítico, de 4.050 m de elevación, localizado en la Cordillera Central de Colombia, 65 Km al Noroccidente de Ibagué (Fig. 2), capital del Departamento del Tolima. Su actividad eruptiva en la etapa reciente (Últimos 14.000 años), se ha caracterizado por ser de tipo explosivo, con generación de

piroclastos de caída, flujos piroclásticos y de lodo, emplazamiento de domos y ocasional extrusión de lavas (MONSALVE & NUÑEZ 1992).

Volcán Nevado del Ruiz

Es un estrato-volcán andesítico-dacítico activo, de 5.370 m de altura, que se localiza en la Cordillera Central de Colombia, 28 Km al sureste de la ciudad de Manizales (Fig. 2); sus laderas están cubiertas por un casquete glaciar de 21 Km², que desciende hasta los 4.800 m de altura (PARRA & CEPEDA 1990). Tiene una historia eruptiva de 1,8 millones de años, predominantemente explosiva, con VEI iguales a 4 (12 de marzo de 1595), 2 (19 de febrero de 1845) y 3 (13 de noviembre de 1985), que han generado lavas, depósitos de flujos piroclásticos, de oleadas piroclásticas, de avalanchas de escombros, de piroclastos de caída, y de lahares y domos. Está en crisis desde diciembre de 1984 (INGEOMINAS 2000).

Volcán El Cisne

Es un volcán lávico o efusivo de 5.100 m de altura (Fig. 2), que muestra dentro de una estructura destruida, volcanismo efusivo resurgente, con lavas en bloques no afectados por glaciación (CEPEDA *et al.* 1987).

Volcán Nevado de Santa Isabel

El Volcán Nevado de Santa Isabel se localiza aproximadamente 35 Km al suroeste de la ciudad de Manizales (Fig. 2). Presenta una forma elongada en dirección NNE, alcanzando la cota de 4.965 m, que permite la presencia de un casquete glaciar de 7 Km² (INGEOMINAS 2000). No es un volcán típico, con cráter visible, sino un conjunto de domos y domos-colada, que crecieron en la intersección de fallas geológicas de dirección noroeste-sureste; su actividad volcánica ha sido predominantemente de tipo efusivo y no se conocen erupciones históricas en el área. Del análisis de su actividad volcánica pasada, se considera que erupciones futuras pueden generar principalmente flujos de lava de composición intermedia, que al entrar en contacto con zonas glaciares pueden ocasionar explosiones freato-magmáticas, con producción de piroclastos y formación de lahares (INGEOMINAS-CARDER 1994).

Volcán del Quindío

Es un volcán inactivo de 4.600 m de altura (Fig. 2). Está conformado por una serie de picos esbeltos, que rodean un cráter central roto hacia el suroccidente de su cono de deyección. (GARCES & DE LA ZERDA 1994).

Volcán Nevado del Tolima

Está ubicado en el departamento que lleva su mismo nombre, 28 Km al noroeste de la ciudad de Ibagué (Fig. 2). Es un estrato-volcán andesítico activo, coronado por un casquete glaciar de aproximadamente 1,9 Km² de superficie, con un volumen mínimo de 0,095 Km³ de hielo, que alcanza una altura máxima de 5.200 m. Su actividad histórica consta de eventos con VEI de 2, correspondientes a explosiones pequeñas, tal vez de tipo freático (CEPEDA & MURCIA 1988). Los productos típicos del volcán son lavas masivas y en bloques, depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y bloques, escoria y caída de piroclastos. El hecho de ser un volcán nevado, ha incrementado las condiciones favorables para la generación de lahares (INGEOMINAS 2000).

Volcán Machín

Es un volcán tipo anillo piroclástico (tuff-ring), activo, altamente explosivo, con VEI = 5, cuya cima alcanza la cota de 2.750 m. Esta localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia, 17 Km al noroeste de la ciudad de Ibagué (Fig. 2). Sus erupciones han sido predominantemente magmáticas, con mecanismos eruptivos constituidos por columnas plinianas y extrusión de domos. Asociados al colapso de las columnas y los domos, se han generado flujos y oleadas piroclásticas (CEPEDA *et al.* 1996).

Teniendo en cuenta su historia geológica, mecanismos eruptivos y el tipo y volumen de los depósitos volcánicos generados por su actividad, para erupciones futuras se espera la formación de flujos piroclásticos, caída de piroclastos, lahares, emisión de gases y ocurrencia de sismos asociados. Las dataciones radiométricas indican periodos de recurrencia del orden de 1.000 años, sugiriendo la probabilidad de que estemos cerca al vencimiento de un periodo nuevo (CEPEDA *et al.*, *op cit.*).

LOS MAPAS DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL PARQUE NACIONAL DE LOS NEVADOS

Las erupciones volcánicas no son muy frecuentes, pocas se espera que ocurran durante la vida de una persona. Pueden acontecer de forma súbita, sin señales previas; sus efectos más destructivos suelen estar limitados a áreas de algunas decenas de kilómetros desde la cima de un volcán, hacia sus relieves más bajos, o definidas por las direcciones preponderantes de los vientos, en los alrededores de cualquier cono volcánico (MULLINEAUX 1981). El crecimiento de la población obliga a que la gente continúe habitando y propagándose en áreas de amenaza

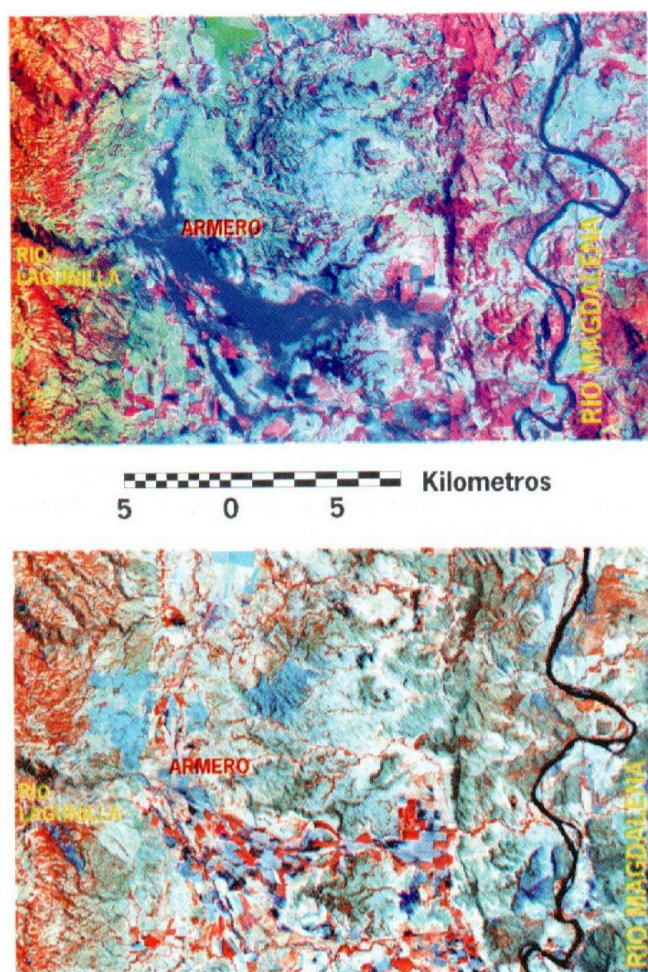


Fig. 3. Subescenas Landsat TM 5 de los alrededores de Armero, posteriores a la deposición del lahar (13 de noviembre de 1985). La de arriba, tomada 28 meses después (22 de marzo de 1988), muestra el lahar como una mancha azul, en composición de falso color 4 en rojo, 5 en verde, 2 en azul. En la de abajo, tomada casi 12 años después del desastre (30 de agosto de 1997), se observan patrones de cultivo desarrollados sobre el lahar, en composición de falso color 4 en rojo, 5 en verde, 7 en azul (VILLEGAS 2002).

alta, algunas de las cuales son de considerable valor agrícola y económico (Fig. 3). Como resultado, se espera que sigan aumentando los daños causados por las catástrofes naturales (VOIGHT 1990).

Los geólogos pueden determinar la historia eruptiva y de catástrofes de un volcán, a partir de la cartografía y datación del material que ha expelido, del cual es posible deducir la naturaleza, tamaño y frecuencia de sus eventos antiguos. La forma más común de presentar la historia de un volcán y su actividad futura potencial, es mediante un mapa donde se delimiten zonas de amenaza para tipos específicos de procesos volcánicos o hidrológicos. Estas

zonas definen porciones del terreno susceptibles de ser afectadas por un evento dado (WRIGHT & PIERSON *op cit.*). Estos mapas deben actualizarse de manera permanente, para incorporarles el comportamiento actual del volcán, al igual que técnicas mejoradas para el manejo de la amenaza (PARRA & CEPEDA 1990).

A continuación se describen los cinco mapas de amenaza volcánica, que se han realizado para igual número de volcanes activos del Parque Nacional de los Nevados.

Volcán Cerro Bravo

Tiene un mapa de amenaza volcánica de carácter preliminar, dado que sus autores recomiendan que simultáneamente con el programa de vigilancia, se continúe con la evaluación de la amenaza (MONSALVE & NUÑEZ 1992). En él se definen zonas con grados de amenaza alta (color rojo), media (anaranjado) y baja (amarillo), cuyos límites no deben asumirse como líneas, sino como zonas de transición, donde el cambio de un grado de amenaza a otro es gradual (Fig. 4).

La amenaza alta está asociada a productos volcánicos como caídas piroclásticas con acumulaciones entre 0,20 m y 4,0 m de espesor, piroclastos proyectados balísticamente, flujos de lodo secundarios, flujos piroclásticos, ondas de choque y flujos de lava; la amenaza media corresponde con caídas piroclásticas de acumulaciones entre 10 m y 20 cm de espesor, y piroclastos proyectados balísticamente de hasta 7 cm de diámetro; la zona de amenaza baja se asocia con caídas piroclásticas de acumulaciones menores de 10 cm de espesor.

Volcán Nevado del Ruiz

Diferentes versiones del mapa de amenaza volcánica de este volcán (PARRA *et al.* 1986; PARRA & CEPEDA 1990), muestran distintas zonas expuestas a fenomenologías volcánicas características del mismo (Fig. 5), donde los colores representan el grado de amenaza en cada área, que varía desde alto (color rojo), hasta medio (anaranjado) y bajo (amarillo). En una de las primeras versiones de este mapa (PARRA *et al.* 1986), las zonas anteriormente mencionadas se definieron como zonas de riesgo, entendiendo este último como las consecuencias que se pueden esperar sobre vidas y bienes, en el caso de una erupción potencialmente destructiva. El límite entre estas zonas son las líneas que delimitan áreas sujetas a un determinado riesgo; por la naturaleza del mapa, no implica que inmediatamente por fuera de ellas se esté absolutamente exento del mismo, ni que al interior de las

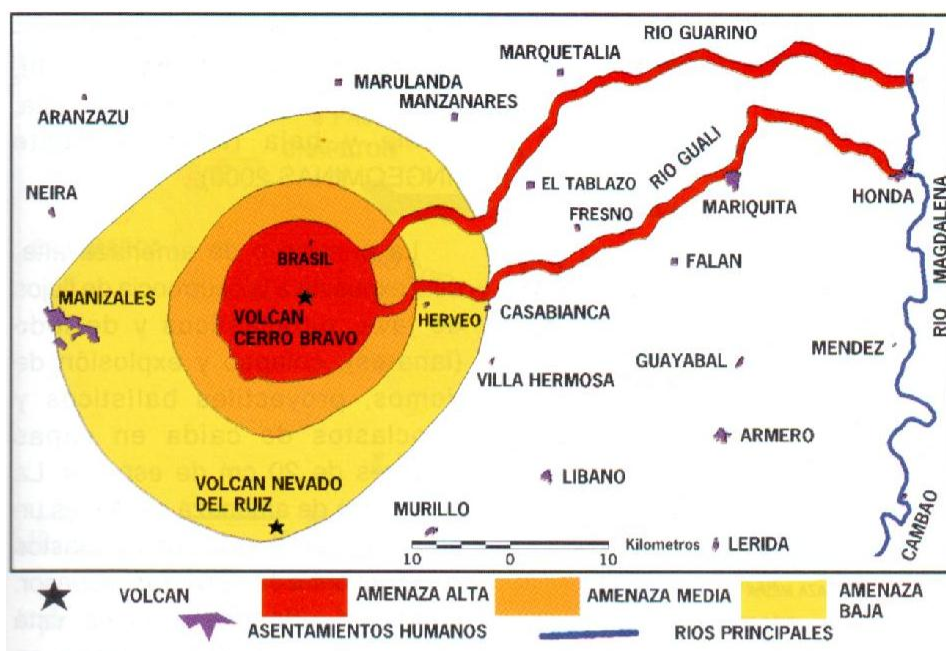


Fig. 4. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Cerro Bravo (modificado de MONSALVE & NUÑEZ 1992).

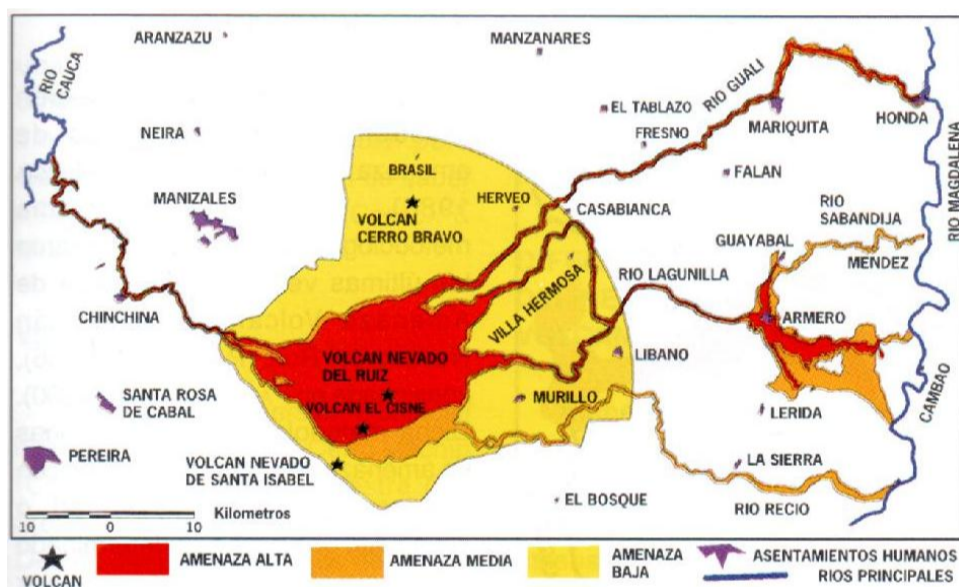


Fig. 5. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Nevado del Ruiz (modificado de PARRA *et al.* 1986 y PARRA & CEPEDA 1990).

mismas necesariamente se tenga que ser afectado.

En la última versión del este mapa (PARRA & CEPEDA 1990), las mismas áreas que anteriormente se representaron como zonas de riesgo (PARRA *et al.* 1986), ahora se muestran como áreas de amenaza, entendiendo esta como el potencial de un evento volcánica para causar danos y destrucción, independiente de la existencia de habitantes o propiedad en la zona considerada. Este mapa combina información sobre diversos

fenómenos de amenaza, con sus probabilidades de ocurrencia relativa, para establecer "niveles de amenaza" de carácter numérico, que sean fácilmente comprensibles para no especialistas, y por lo tanto menos susceptibles a interpretaciones erradas (PARRA & CEPEDA 1990). Aunque esta nueva versión del mapa contiene algunos detalles numéricos de severidad ponderada para las áreas de amenaza de acuerdo con escalas arbitrarias, en términos generales es igual a la versión anterior (PARRA *et al.* 1986).

Sus autores anotan que la elaboración de esta última versión no implica análisis de vulnerabilidad, razón por la cual no puede considerarse como un mapa de riesgo. Las zonas de amenaza baja se definen como aquellas sujetas solamente a eventos volcánicos poco probables, tales como las erupciones cataclísmicas que han sucedido una o dos veces durante la totalidad de la historia del volcán, o a otros eventos que aunque son de ocurrencia más probable, presentan severidades relativamente bajas (por ejemplo, caída leve de cenizas volcánicas). Donde áreas de amenaza alta resultaron adyacentes con zonas de amenaza baja, se establecía la separación arbitraria de una zona de amenaza media con 500 m de ancho (PARRA & CEPEDA 1990).

Para el tiempo de la preparación de las diferentes versiones del mapa de amenaza volcánica del Ruiz, aún no existía un glosario de términos para emergencias, razón por la cual la traducción de la palabra "hazard" se hizo de manera textual, generando sinonimia entre los términos riesgo y amenaza (E. Parra, com. pers.). La publicación de las Naciones Unidas sobre terminología para desastres (UNITED NATIONS 1992), es posterior a las fechas de elaboración de dichos mapas. En los mapas y publicaciones sobre amenaza volcánica elaborados antes de 1992, no es clara la diferenciación entre los conceptos amenaza ("hazard") y riesgo ("risk"), razón por la cual en la mayoría de las ocasiones fueron utilizados como sinónimos.

Volcan Nevado de Santa Isabel

Del análisis de la información existente y colectada durante las etapas de la investigación sobre este nevado (INGEOMINAS —

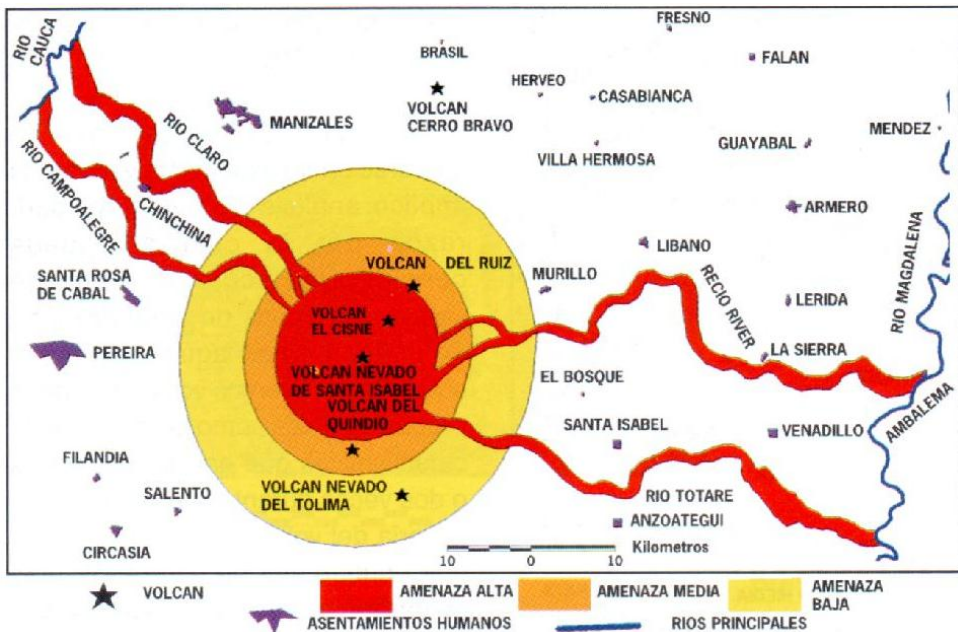


Fig. 6. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Nevado de Santa Isabel (modificado de INGEOMINAS — CARDER 1994).

Nevado de Santa Isabel. Dichas zonas se denominan como I, II y III, correspondiendo con amenaza alta, media y baja respectivamente (INGEOMINAS 2000).

La primera o de amenaza alta, está expuesta a la ocurrencia de flujos de lava, piroclásticos y de lodo (lahares); colapso y explosión de domos, proyectiles balísticos y piroclastos de caída en capas mayores de 20 cm de espesor. La segunda o de amenaza media, es un área expuesta a caída de piroclastos en capas entre 10 y 20 cm de espesor. La tercera o de amenaza baja, está expuesta a caída de piroclastos en capas menores de 10 cm de espesor.

Volcán Nevado del Tolima

Se efectuó una zonación probabilística de las áreas de amenaza volcánica (CEPEDA & MURCIA 1988), utilizando la misma metodología con la cual se elaboraron las últimas versiones del Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Nevada del Ruiz (PARRA *et al.* 1986), consignada en PARRA & CEPEDA (1990). Dicha metodología establece zonas de amenaza volcánica de acuerdo con ponderaciones de la severidad, o capacidad que posee un determinado tipo de evento volcánico para causar daño, y la probabilidad de ocurrencia del mismo, para establecer valores de severidad ponderada que se llevan a los mapas de amenaza volcánica. Mediante este cálculo probabilístico se establecen zonas de amenaza alta (color rojo), intermedia (anaranjado) y baja (amarillo) (Fig. 7).

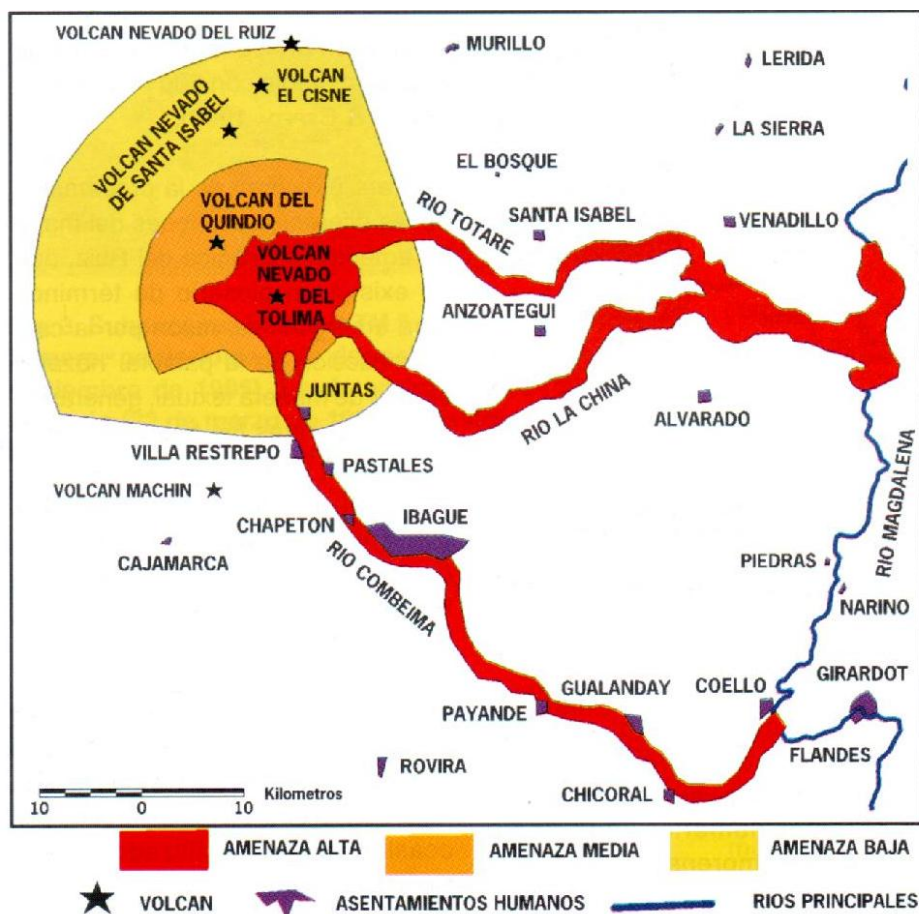


Fig. 7. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Nevado del Tolima (modificado de CEPEDA & MURCIA 1988).

CARDER 1994), se identifican tres zonas (Fig. 6), cada una de ellas expuestas a uno o varios

Productos volcánicos, que podrían ser generados durante fases eruptivas del Complejo de Domos

Este modelo de presentación del mapa, es el resultado de un mecanismo de traducción de información científica dirigida a las autoridades gubernamentales, a los planificadores y a toda la comunidad; se busca que cualquier persona que consulte el mapa y esté interesada en

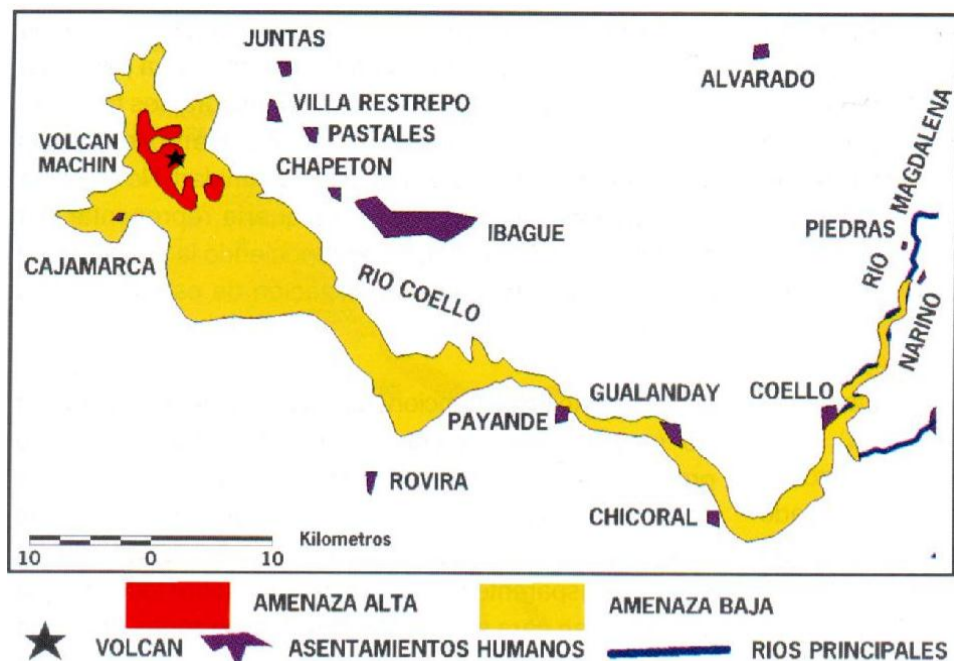


Fig. 8. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Machín (modificado de CEPEDA *et al.* 1995).

una región o sitios determinados, obtenga una idea clara del grado de amenaza volcánica potencial para dicha región, sin necesidad de saber mucho de vulcanología (CEPEDA & MURCIA 1988).

Volcán Machín

El Mapa de Dispersión Potencial de Productos del Volcán Cerro Machín (CEPEDA *et al.* 1995), muestra dos áreas de tránsito y depósito (Fig. 8). Una de dispersión de flujos de ceniza y bloques, producto del colapso gravitacional de domos, que se representa en color rojo (CEPEDA *et al.* 1995; INGEOMINAS 2000), pero jamás se ha cualificado formalmente como de amenaza alta; otra de dispersión de flujos de ceniza y pómez, oleadas piroclásticas y lahares, que se representa en amarillo (CEPEDA *et al.* 1995; INGEOMINAS 2000), pero no se denomina de manera específica como de amenaza baja.

A pesar de la falta de categorización en las zonas de amenaza definidas para este volcán,

dada su representación en colores rojo y amarillo, se asumen como alta y baja para los propósitos de este trabajo.

DIFERENTES CRITERIOS PARA DELINEAR ZONAS DE AMENAZA VOLCÁNICA SOBRE UN MAPA

El medio más común para representar la historia de un volcán al igual que su potencial actividad futura, es un mapa que delimite áreas susceptibles a tipos específicos de amenazas volcánicas o hidrológicas. Durante las últimas tres décadas ha habido concepciones diversas sobre los mapas de amenaza volcánica para diferentes volcanes del mundo.

En el Volcán Monte St. Helena (Washington, Estados Unidos), era obvio que gran parte del área próxima al volcán, al igual que ciertas porciones de una región mucho más amplia, podrían ser afectadas por erupciones futuras. Las zonas de amenaza se basaron en dos tipos de fenómenos potencialmente peligrosos: (1) aquellos que se mueven a lo largo de la superficie del terreno,

tales como flujos de lava a flujos de lodo, que se denominaron amenazas por flujo; y (2) aquellos que son transportados por el aire, como la tefra y los gases, que fueron llamados amenazas por tefra (CRANDELL & MULLINEAUX 1978). Un mapa de amenaza volcánica preparado más recientemente para este mismo volcán, delineó amenazas para flujos piroclásticos, flujos de lodo y caída de cenizas, al igual que sus posibles extensiones para tres magnitudes diferentes: grande, mediana y pequeña (MILLER *et al.* 1981). Una nueva gestión de las amenazas potenciales del Volcán Monte St. Helena, que implicó la preparación de otro mapa de amenaza volcánica, muestra zonas de amenaza para las extensiones máximas esperables de flujos piroclásticos, rutas de flujos de lodo, espesores potenciales de la ceniza a diferentes distancias del volcán, y una zona de riesgo alto por explosión lateral dirigida y flujos piroclásticos. Las áreas de riesgo para estos últimos fueron clasificadas entre alto y moderado (MILLER *et al.* 1981).

En el Volcán Furnas (São Miguel, Islas Azores), se eligieron dos eventos volcánicos de sus últimos 5000 años de actividad, como miembros extremos del rango más probable de magnitudes para su actividad futura. Tales eventos fueron la erupción más grande ocurrida en el volcán y una de las más pequeñas. El mapa de amenaza muestra los posibles espesores máximos de tefra en los asentamientos humanos alrededor del Volcán Furnas, para los dos escenarios de erupción seleccionados, al igual que los valles por los cuales se podrían canalizar lahares, las pendientes susceptibles a re movilizar tefra, y el área que podría ser afectada por inundaciones no desencadenadas por erupciones volcánicas (COLE *et al.* 1999).

En el Volcán Merapi (Indonesia Central), una revisión del mapa de amenaza disponible realizada por THOURET *et al.* (2000), delimita áreas que podrían ser afectadas por fenómenos volcánicos específicos, correspondientes con cuatro escenarios seleccionados, de acuerdo con el rango de los procesos volcánicos y las áreas amenazadas, las descripciones de las erupciones recientes, y las magnitudes de las erupciones registradas durante los siglos pasados.

Solamente dos amenazas volcánicas fueron tomadas en cuenta en Tenerife (Islas Canarias, España), para modelar los efectos de las erupciones en un futuro cercano (ARANA *et al.* 2000): caída de cenizas y flujos de lava, dado que pueden asumirse como las amenazas volcánicas más posibles, tanto a corto (años) como a mediano (décadas) plazo, de acuerdo con los ciclos magmáticos y los periodos de recurrencia previamente analizados. Se prepararon mapas de probabilidad para flujos de lava y caída de ceniza volcánica, con el objetivo de realizar un mapa de zonación cualitativa de la amenaza en Tenerife. Este mapa delimita diferentes áreas con cinco grados de amenaza: máxima, alta, media, baja y muy baja.

De acuerdo con lo que puede observarse en todos estos mapas, el criterio prevaleciente para su preparación es probabilístico, porque se ha dado énfasis a la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos volcánicos. La amenaza se expresa en términos numéricos (por ejemplo, posibles espesores máximos de tefra en el Volcán Furnas) o cualitativos (por ejemplo, máxima, alta, media, baja y muy baja en las Islas Canarias; grande, mediana y pequeña en Monte St. Helena). Los únicos mapas que delimitan áreas afectables por fenomenologías volcánicas específicas, sin tener en cuenta criterios probabilísticos, son la primera versión del Mapa de Amenaza de Monte St. Helena (CRANDELL & MULLINEAUX 1978) y la revisión del Mapa de Amenazas del Volcán Merapi (THOURET *et al.* 2000).

NORMALIZACIÓN DE LOS MAPAS DE AMENAZA VOLCÁNICA PROBABILÍSTICA DEL PARQUE NACIONAL DE LOS NEVADOS

Los primeros estudios de los volcanes activos en Colombia, dieron lugar a lo que erróneamente se denominó como mapas de riesgo volcánico. Si bien estos eran mapas que relacionaban algunos impactos esperados, no consideraban otros aspectos propios del contexto como eran, por ejemplo, las condiciones socioeconómicas de las comunidades afectadas. Posteriormente, tras un periodo de investigación y aprendizaje, se optó por denominarlos mapas de amenaza volcánica, haciendo énfasis en los fenómenos geológicos propiamente dichos. Sin embargo, a pesar del empeño por parte de los

técnicos por mejorar los trabajos, los resultados de los mismos no siempre fueron presentados de manera clara a la comunidad. No se hacía una revisión crítica de lo que se quería representar por amenaza, peligro o riesgo, desconociendo la ambigüedad que existe alrededor de la utilización de estos términos (MUÑOZ-CARMONA 2001).

Un reflejo de la mencionada situación fue la elaboración de mapas de amenaza volcánica, los cuales no presentaban con claridad la información que se quería hacer llegar al público. En ellos se delimitaban zonas categorizadas (por ejemplo: alta, media, baja), sin un criterio transparente para los usuarios y sobre todo, porque se prestaban para ser interpretados como zonas de riesgo en donde el experto de turno "imponía" una decisión y una condición a los usuarios (MUNOZ-CARMONA *op cit.*). Los cinco mapas de amenaza volcánica elaborados para igual número de volcanes del Parque Nacional Natural de los Nevados, ilustran bastante bien esta situación.

Tales mapas corresponden con diversos niveles del conocimiento, al igual que con diversas concepciones de la amenaza. El Volcán Nevado del Ruiz cuenta con cuatro (4) versiones de su mapa de amenaza volcánico (PARRA & CEPEDA 1990) publicadas hasta la fecha, mientras que los volcanes restantes solo cuentan con una versión del mismo, siendo de carácter preliminar las de los volcanes Cerro Bravo (MONSALVE & NUÑEZ 1992), Santa Isabel (INGEOMINAS-CARDER 1994) y Tolima (CEPEDA & MURCIA 1988).

La fusión entre estos mapas es posible, porque todos en mayor o menor medida se han elaborado con criterios predominantemente probabilísticos, donde a las zonas estudiadas se les asigna mayor o menor grado de amenaza, si se considera que tienen mayor o menor probabilidad de ser afectadas por un evento volcánico dado; así las áreas donde una mayor cantidad de fenomenologías volcánicas pueden actuar, suelen considerarse como las más amenazadas. Para el Mapa de Amenazas del Volcán Nevado de Santa Isabel, el elemento predominante es el impacto que puedan tener los productos volcánicos sobre las áreas de influencia, de acuerdo con la severidad de cada uno de ellos (MUÑOZ-CARMONA & MONSALVE 2001); en el caso de los Volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima, se diseñan zonas de amenaza combinando factores como la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos volcánicos, y la severidad con que cada uno de ellos puede afectar un área dada.

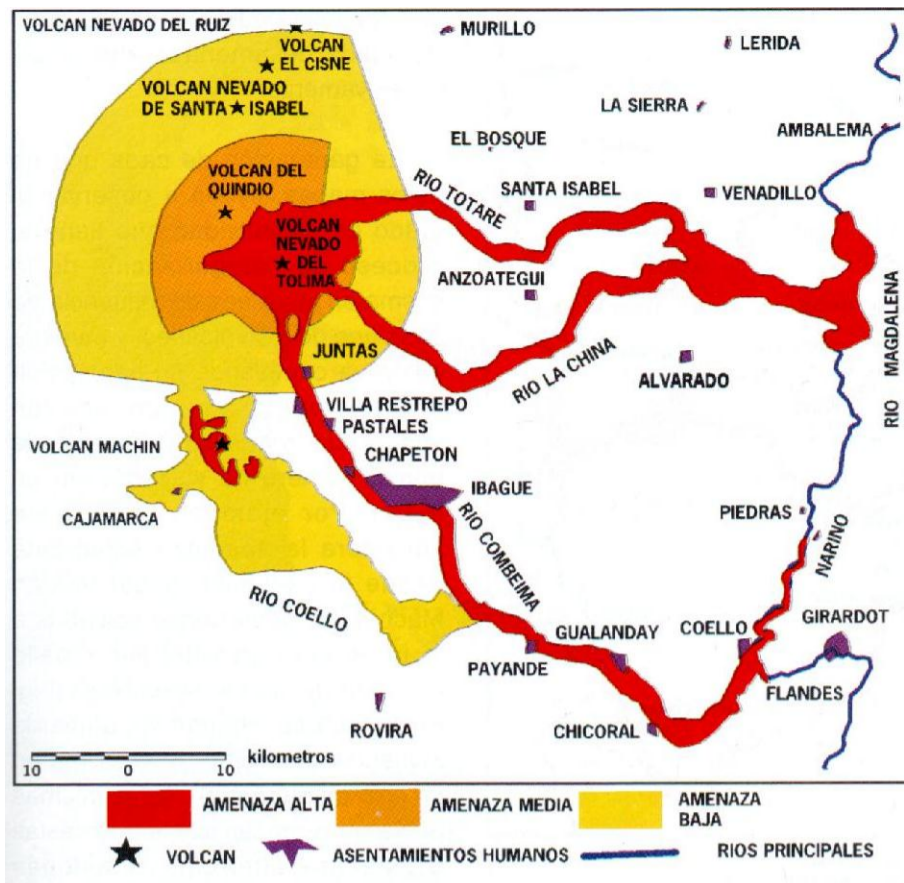


Fig. 9. Mapa de amenaza volcánica integrada para los volcanes Machín y Nevado del Tolima (VILLEGAS 2002).

MAPAS DE AMENAZA VOLCANICA EN AMBIENTE SIG

Los sistemas de información georeferenciada (SIG), están siendo utilizados por miles de compañías, agencias del gobierno y muchas otras entidades en el mundo entero, para el almacenamiento, consulta y manipulación de datos referenciados espacialmente. Dichos sistemas permiten el despliegue de la información de manera independiente de su escala; además de esto, los programas de SIG incluyen módulos para ubicar los datos en un sistema de proyección geográfica común. Esto no solamente permite que diferentes juegos de datos puedan superponerse entre sí, sino que además les da contenido geográfico.

Los mapas de amenaza volcánica de los volcanes Cerro Bravo, Ruiz,

Santa Isabel, Tolima y Machín fueron incorporados en un SIG, para hacerlos accesibles tanto a usuarios casuales como expertos. Durante el despliegue de dichos mapas, fue posible observar que las áreas de amenaza definidas para cada uno se superponen con las establecidas para los volcanes vecinos, dada la contigüidad entre los cinco conos volcánicos.

El Volcán Nevado del Ruiz aparece al sur del Volcán Cerro Bravo, dentro de la zona de amenaza baja definida para el área de influencia del mismo (Fig. 4). Los volcanes Cerro Bravo y Santa Isabel están dentro de la zona de amenaza baja definida para el área de influencia del Volcán Nevado del Ruiz (Fig. 5), mientras que el aparato volcánico extinto del Cisne aparece en la de amenaza alta. El Volcán del Ruiz se localiza en el límite entre las

zonas de amenaza alta e intermedia al noreste del área de influencia del Volcán Nevado de Santa Isabel (Fig. 6), mientras el Volcán del Tolima se ubica en el área de amenaza baja al sureste del mismo, y los aparatos extintos del Cisne y el Quindío se encuentran en zonas de amenaza alta e intermedia respectivamente (Fig. 6). El Volcán Nevado de Santa Isabel se ubica al noreste del Volcán Nevado del Tolima, dentro del área de amenaza baja definida para su zona de influencia (Fig. 7); el Volcán del Ruiz se localiza al norte del mismo, sobre el límite del área de amenaza baja (Fig. 7); mientras los aparatos extintos del Quindío y el Cisne aparecen en zonas de amenaza intermedia y baja respectivamente (Fig. 7).

La superposición entre las áreas de amenaza para los edificios volcánicos genera la necesidad de estudiarla a nivel regional, sin considerar la zona de influencia de cada volcán individualmente, tal como se ha hecho hasta la fecha, sino fusionándolas todas en un solo mapa. La integración regional se realizó de sur a norte, fusionando inicialmente las áreas de amenaza de los volcanes Machín y Tolima (Fig. 9), para generar un mapa que considerara las zonas de influencia de los dos; este mapa a su vez se integró con el de Santa Isabel (Fig. 10), continuando con el proceso hasta lograr involucrar los cinco volcanes (Fig. 12).

Bajo la hipótesis de equivalencia metodológica entre los diferentes mapas, el criterio para definir la cualificación de la amenaza en los mapas de salida, consistió en dar preponderancia al mayor orden de la misma: así donde se identificaron áreas de superposición entre zonas de amenaza baja e intermedia, se asignó grado de amenaza intermedia al polígono de salida; de forma análoga la coincidencia de amenaza

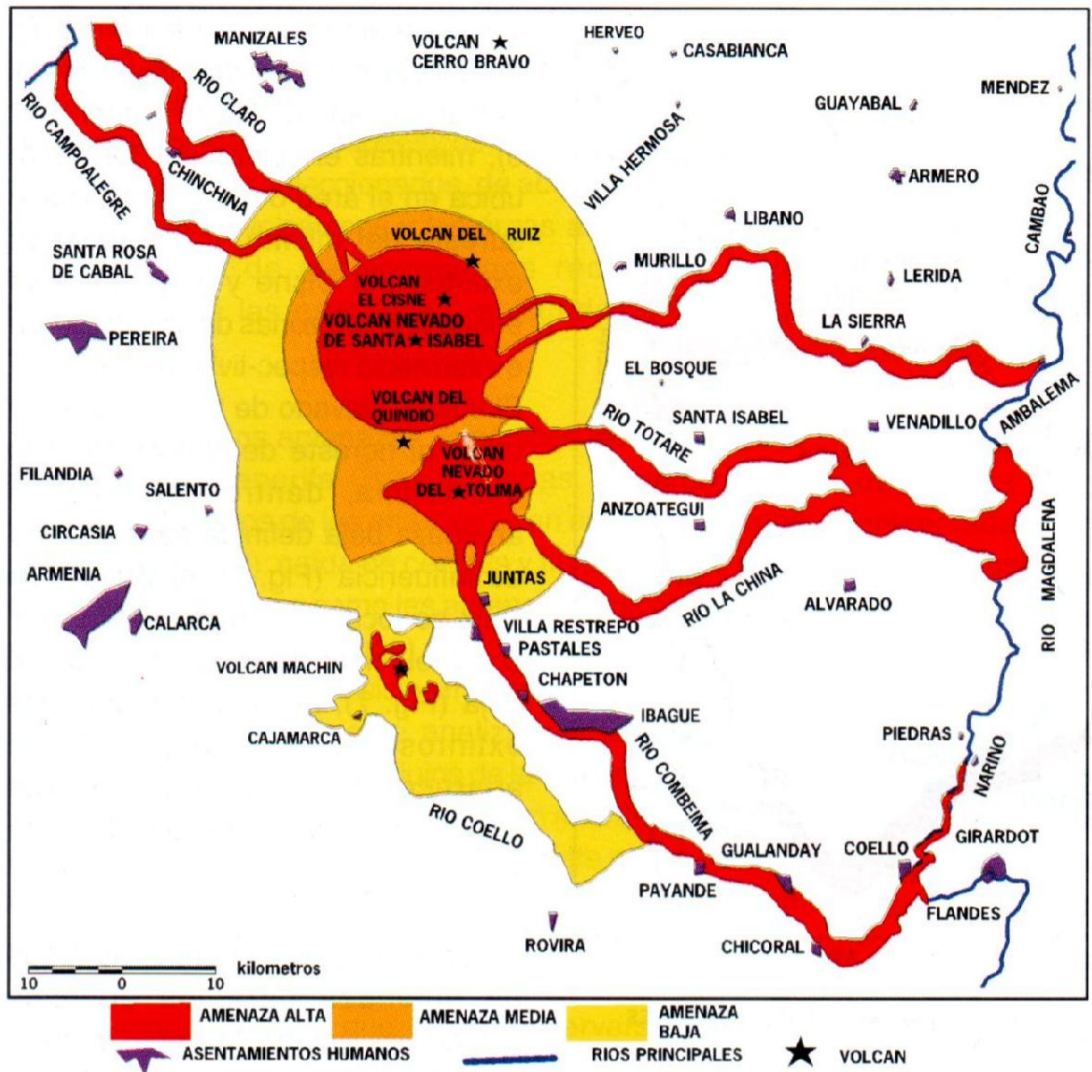
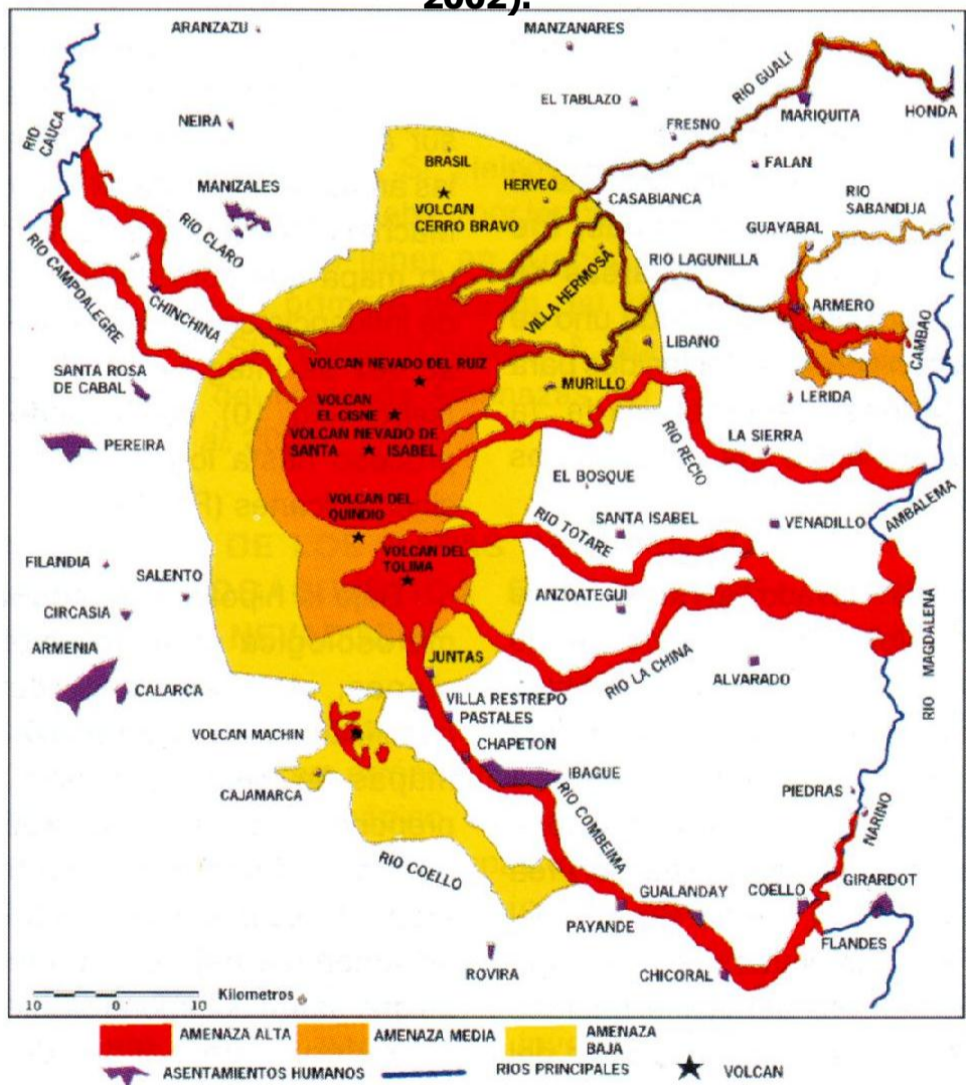


Fig. 10. Mapa de amenaza volcánica integrada para los volcanes Machín, Nevado del Tolima y Nevado de Santa Isabel (VILLEGAS 2002).



alta con intermedia, generó polígono de salida de amenaza alta, y así sucesivamente.

La generación de cada uno de estos mapas, ayuda a observar el grado de subjetividad que tiene el proceso de categorización de la misma en las áreas de influencia de cada uno de los volcanes, y muestra cómo va cambiando su percepción en la medida en que se van integrando zonas de influencia de mayor numero de volcanes en un mapa. Por ejemplo, cuando se considera la amenaza solamente desde la perspectiva del Volcán Machín, las poblaciones ubicadas a lo largo del curso del Río Coello estarían sujetas a amenaza baja (Fig. 8); cuando se integran las áreas de influencia del Machín y el Tolima en un solo mapa (Fig. 9), estas mismas poblaciones pasan a estar expuestas a amenaza alta. Las variaciones siguen dándose cuando se fusionan Machín, Tolima y Santa Isabel (Fig. 10); Machín, Tolima, Santa Isabel y Ruiz (Fig. 11), y la totalidad de los volcanes activos que constituyen el Parque Nacional de los Nevados (Fig. 12). Estudios más detallados orientados a la integración regional de la amenaza volcánica en el Parque Nacional de los Nevados, deberán establecer la contribución probabilística de cada volcán a la misma. La fusión de los datos de amenaza volcánica de una región dada en ambiente SIG, nos ayuda a entender que muchas áreas pueden estar siendo amenazadas por la actividad de más de un volcán.

Fig. 11. Mapa de amenaza volcánica integrada para los volcanes Machín, Nevado del Tolima, Nevado de Santa Isabel y Nevado del Ruiz (VILLEGAS 2002).

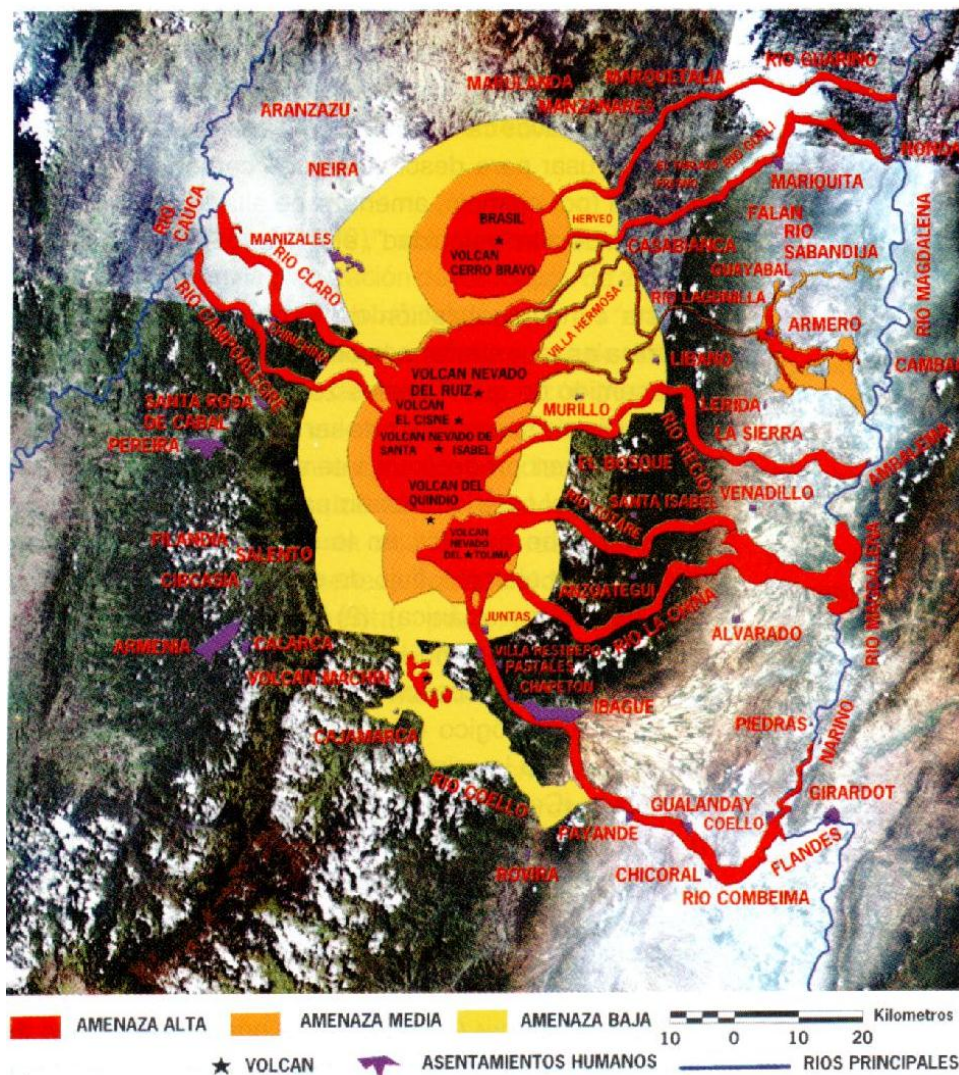


Fig. 12. Mapa de amenaza volcánica integrada del Parque Nacional de los Nevados, desplegado sobre mosaico Landsat TM 5 en composición de falso color 3 en rojo, 2 en verde, 1 en azul (VILLEGAS 2002).

CONCEPCIONES DE AMENAZA VOLCANICA Y RIESGO VOLCANICO

En la literatura sobre riesgo, particularmente en lo relacionado con volcanes, se han utilizado de manera ambigua los términos "amenaza" y "riesgo". Una situación que contribuye a tal ambigüedad, es el énfasis que se hace en proveer algún tipo de información probabilística para explicarlos. Ciertamente la definición de ambos términos ha estado marcada por un énfasis extremo en la identificación de la probabilidad de ocurrencia. Aun así, esta situación es en parte consecuencia de la presión social impuesta sobre un científico

para que provea información inmediata y "exacta" sobre fenómenos naturales. La gente, al igual que los expertos, suele no reconocer que la amenaza y el riesgo no solamente están relacionados con las estadísticas, sino con la comprensión del proceso que da lugar a su construcción (MUÑOZ-CARMONA 1999).

Una situación generada por la práctica común de dar información probabilística, es la del uso común de términos como "amenaza alta, media o baja", en la elaboración de mapas de amenaza volcánica. Muy a menudo no es claro cuando esta categorización corresponde con la probabilidad de ocurrencia de una

amenaza específica (por ejemplo, flujo de escombros), o a su impacto (MUÑOZ-CARMONA *op cit.*). Otro problema relacionado con esta cualificación, está ligado con la percepción pública de la amenaza y la comprensión del concepto de amenaza gradacional, al igual que del significado de las líneas que limitan las zonas de amenaza volcánica en un mapa. En condiciones ideales, la amenaza debería ser igual en todo lugar dentro de cualquier zona considerada. En realidad, la amenaza suele incrementarse progresivamente en dirección hacia el volcán, dentro de cualquier área dada y desde una zona hacia la otra. Los límites entre áreas de amenaza intentan mostrar puntos de igual amenaza. Sin embargo, teóricamente la manera más correcta para representar diferentes grados de amenaza, sería mediante un número infinito de líneas, que deberían dibujarse de manera que muestren aumentos sucesivos y pequeños de la misma, a medida que nos aproximamos al volcán. En la práctica, los límites entre las zonas de amenaza no son más que burdas aproximaciones (MILLER *et al.* 1981).

Para evitar toda esta confusión, MUÑOZ-CARMONA (1999) propone redefinir el término amenaza volcánica como el conjunto de eventos o condiciones volcánicas que tienen el potencial para causar impacto negativo (o positivo) en cierta área o contexto. La sismicidad volcánica, los flujos piroclásticos, los flujos de lodo, los gases volcánicos, los flujos de lava y los flujos de escombros son algunos ejemplos de amenaza volcánica. El concepto de amenaza se refiere a la comprensión de las características (por ejemplo génesis, tamaño, frecuencia, etc) de un evento natural que puede causar daño en un contexto dado. El término riesgo volcánico se refiere a una condición derivada de la consideración del impacto de una "amenaza" volcánica

particular (por ejemplo, caída de cenizas), en un "contexto" determinado (por ejemplo, la comunidad afectada por la amenaza).

DIFERENTES CONCEPCIONES DE LOS MAPAS DE AMENAZA VOLCÁNICA

La concepción de la gestión de las amenazas volcánicas se basa en registros históricos y geológicos recientes de las erupciones, sustentados en la premisa de que el registro de la actividad volcánica del pasado aporta los mejores criterios para anticipar el comportamiento eruptivo probable para el futuro. No se toman en cuenta eventos que aunque sean posibles, no han sucedido antes en el volcán que se está estudiando, o eventos de mayor magnitud que aquellos que han acontecido en el pasado (MILLER *et al.* 1981).

Durante las erupciones, diferentes áreas serán afectadas por diversas combinaciones de amenazas; gente que habita en distintas localidades también enfrentará gran variedad de amenazas volcánicas, razón por la cual es de gran importancia la clara identificación de áreas afectadas por eventos volcánicos específicos, porque las consecuencias de las erupciones pueden variar mucho, estando muy concentradas en algunas zonas, mientras otras pueden prácticamente resultar no afectadas (DIBBEN & CHESTER 1999).

MUÑOZ-CARMONA (1999) propone que un mapa de amenaza volcánica sea, desde el punto de vista del experto en amenaza volcánica, la representación de la distribución de los productos volcánicos que resulten de la suposición hipotética de un proceso eruptivo particular. En los mapas de amenaza volcánica los técnicos deben presentar, de la manera más rigurosa, todo el conocimiento que tengan sobre el fenómeno volcánico. Se debe partir de la modelación del proceso eruptivo con base en la información geológica, historia e instrumental disponible. Una vez se ha determinado un modelo eruptivo, se tienen en cuenta aspectos como la topografía, estabilidad geo-mecánica del edificio volcánico, aspectos hidro-meteorológicos, condiciones de esfuerzo locales, para modelar la distribución especial de los diferentes productos volcánicos (MUÑOZ-CARMONA & MONSALVE 2001).

Finalmente, esta descripción debe ir acompañada con información sobre las características físicas, químicas y mecánicas asociadas con los productos volcánicos, y sus respectivos procesos de deposición y emplazamiento en la superficie. La información obtenida se puede agrupar en zonas de características y comportamiento similares. Colores y achurados para la identificación de dichas áreas

deben asignarse de manera clara y precisa. Igualmente para identificar zonas de amenaza, se recomienda la no utilización de categorías que se puedan asociar con impacto. Adjetivos calificativos como alta, media, baja, etc, se deben usar para describir alguna característica de la amenaza (por ejemplo, amenaza de alta "temperatura", o amenaza de alta "velocidad", etc) (MUÑOZ-CARMONA 1999).

Esta conceptualización de los mapas de amenaza volcánica es muy similar a la de WRIGHT & PIERSON (1992), en el sentido de que "...estas zonas de amenaza deben delimitar áreas susceptibles de ser afectadas por un evento dado, y deben predecir un intervalo de recurrencia del mismo. Así, el criterio utilizado para especificar zonas de amenaza debe basarse en lo siguiente: (1) el tipo de actividad (por ejemplo, flujo de escombros, flujo de lava, caída de ceniza volcánica); (2) la magnitud de un evento típico, expresada como la distancia recorrida o el área cubierta, y (3) la frecuencia de ocurrencia, que se deduce del registro geológico e histórico". Mapas de amenaza volcánica como la primera versión para el Volcán Mounte St. Helena (CRANDELL & MULLINEAUX 1978), la revisión del Volcán Merapi (THOURET *et al.* 2000), y hasta el Mapa Actualizado de Amenaza Volcánica Potencial del Nevado del Ruiz (PARRA *et al.* 1986), delimitan áreas afectables por procesos volcánicos específicos.

MUNOZ-CARMONA (1999) propone que las categorías de amenaza que impliquen el impacto del evento volcánico, sean el resultado de un ejercicio interdisciplinario donde los individuos expuestos al riesgo, tengan la posibilidad de participar (por ejemplo, ejerciendo su potencial político) en su denominación. Lo mismo debe suceder si las categorías baja, media, alta (o cualquier otra) implican una medida probabilística. El autor(es) de los mapas de amenaza volcánica, debería(n) saber que un valor probabilístico que indique la probabilidad de ocurrencia de un evento, es un "artefacto" especulativo, porque la información que se utilizó para determinarlo es incompleta. Además, cualquier tipo de cuantificación o cualificación tendrá implicaciones políticas para quienes utilicen la información. Por esto, también para este caso, antes de asignar categorías (como las anteriormente mencionadas) para indicar la probabilidad de ocurrencia de un evento particular, debe haber una discusión que involucre diferentes sectores de la comunidad expuesta al riesgo.

DISCUSION SOBRE LOS DIFERENTES CRITERIOS PARA LA REPRESENTACION DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

Como ya se anotó los dos criterios preponderantes para la representación de la amenaza volcánica son el

probabilístico, que enfatiza en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de todos los fenómenos volcánicos, y el vulcanológico, que delimita áreas que podrían ser afectadas por una fenomenología volcánica específica.

MUÑOZ-CARMONA (1999) recomienda no utilizar las probabilidades en la elaboración de los mapas de amenaza volcánica, calificando la probabilidad como un "artefacto especulativo". Desafortunadamente el proceso de entender los procesos volcánicos también lo es, razón por la cual todo lo que se hace en vulcanología tiene cierto grado de incertidumbre. Con más tiempo para estudiar los procesos volcánicos, las probabilidades se tornan menos especulativas, siendo esta una de las razones por las cuales los mapas de amenaza volcánica deben volver a realizarse periódicamente, para que involucren conocimientos nuevos acerca de los procesos y su recurrencia en el tiempo (D. SWANSON, com. pers.).

La experiencia con las autoridades civiles demuestra que estas siempre quieren saber de probabilidades, porque es el lenguaje que sus ingenieros entienden. La aproximación vulcanológica a la amenaza volcánica implica la preparación de varios mapas para fenomenologías volcánicas específicas. Esto genera confusión, porque los funcionarios públicos a cargo de la emergencia no sabrían cual mapa usar, cuando en realidad tendrían que utilizarlos todos, razón por la cual es mejor presentar la totalidad de las amenazas en un mismo mapa (D. SWANSON, com. pers.).

Para la elaboración de la primera versión del mapa de amenazas volcánicas del Volcán Nevado del Ruiz, se intentó dar preponderancia al criterio vulcanológico, pero se notó que esto generaba confusión por superposición de zonas, al igual que una leyenda muy complicada de entender para los ciudadanos comunes. Después de amplias discusiones, se concluyó que el temor de la población expuesta a la amenaza era tanto, que no importaba la naturaleza de la fenomenología volcánica que pudiera generar muertes o daños a propiedad, razón, por la cual se incorporó en el mapa el concepto de severidad (E. PARRA, com. pers.).

De todas maneras, las dos aproximaciones a la amenaza volcánica son válidas. La probabilística es la mejor manera de integrar la amenaza en un solo mapa, para el manejo de emergencias a corto plazo. Durante los periodos donde no se presentan crisis volcánicas, deben realizarse actividades diversas como conferencias sobre los procesos volcánicos y sus amenazas asociadas, foros locales para discutir las amenazas de áreas específicas,

o reuniones con funcionarios del gobierno a cargo de la planeación del área de influencia de un volcán dado (WRIGHT & PIERSON 1992). En estos programas educativos a efectuarse en tiempos de calma, es necesario involucrar la aproximación vulcanológica a la amenaza volcánica.

INTEGRACIÓN REGIONAL DE LA AMENAZA PARA UNA FENOMENOLOGIA VOLCÁNICA ESPECÍFICA: LOS LAHARES

El termino lahar es de origen indonesio y fue presentado inicialmente por SCRIVENOR (1929 en LAVIGNE *et al.* 2000), quien lo definió como una corriente de lodo ("mudstream"). Posteriormente VAN BEMMELEN (1949 en LAVIGNE *et al.*, *op cit.*) expandió su definición a "un flujo de lodo, que contiene escombros y bloques angulares de origen volcánico predominante", pero también añadió "...brechas volcánicas transportadas por el agua". Algunos autores en la actualidad prefieren restringir el uso del término más al flujo, que a su depósito. Tal aplicación de la palabra lahar es consistente con la definición de consenso, a la cual se llegó en una conferencia internacional de sedimentólogos volcano-clásticos, que lo definió como "...una mezcla fluida y rápida de escombros de roca y agua (diferente del flujo de corriente normal), que proviene de un volcán" (SMITH & FRITZ 1989 en LAVIGNE *et al.*, *op cit.*).

Dicha definición es la más aceptada en la actualidad, pero no implica que el comportamiento de los flujos que exhibe un lahar sea simple. Así, los lahares pueden involucrar una fase de flujo de escombros, al igual que fases precursoras que son de flujo de corriente hiper-concentrada. Los dos tipos de flujo pueden erodar o depositar a lo largo de un canal; los flujos de escombros son mezclas de sólidos y fluidos, con concentraciones de sedimento generalmente mayores del 50% en volumen y del 80% en peso; en los flujos de corriente hiper-concentrados, estas concentraciones varían del 20 al 60% en volumen y del 40 al 80% en peso (BEVERGE & CULBERSTON 1964 en LAVIGNE *et al.* 2000). A continuación se presenta la concepción de esta amenaza volcánica específica, para cada uno de los volcanes considerados:

Volcán Cerro Bravo

Como el Volcán Cerro Bravo no tiene nieve o hielo, los lahares que se originen durante una erupción serían secundarios. El agua para generar estos flujos, a partir de piroclastos de caída y flujos piroclásticos depositados en las laderas y valles del volcán, debe provenir de lluvias, lagunas y corrientes de agua que drenan el área volcánica. Un lahar así generado, puede moverse a 50 Km/h y amenazaría lo que encontrase en el fondo y paredes, hasta

una altura de 10 m, en los valles de quebradas y ríos que nacen en el Volcán Cerro Bravo o reciban tributarios provenientes de él, y además de esto nutran los ríos Guarín y Gualí respectivamente (MONSALVE & NUÑEZ 1992). Estas zonas de amenaza se representan en rojo (amenaza alta), a lo largo de los cursos anteriormente mencionados, en la Fig. 4. Los lahares de Cerro Bravo, en ningún momento tendrían la magnitud de los generados por la erupción del Volcán Nevado del Ruiz, en noviembre de 1985 (MONSALVE & NUÑEZ *op cit.*).

Volcán Nevado del Ruiz

Para el Volcán Nevado del Ruiz, la magnitud de esta clase de evento volcánico depende principalmente del tamaño y tipo de erupción, de la disponibilidad de agua y de material no consolidado en la parte alta del volcán que repentinamente pueda desprenderse, así como del material susceptible de ser incorporado en su camino; también son factores importantes la pendiente y la sinuosidad del cauce de los ríos por donde se desplace el material. La presencia de depósitos de lahares antiguos en los valles de algunos ríos comprendidos en el área, indica que la posibilidad de ocurrencia de este tipo de eventos a lo largo de estos mismos ríos, durante fases eruptivas de alguna importancia, es muy alta (100%) (PARRA *et al.* 1986).

La caída de delgadas capas de ceniza sobre el glaciar del Nevado del Ruiz alrededor del Cráter Arenas, sumado a la ocurrencia de sismos de alta intensidad, pueden producir un aumento en la fusión de la nieve e inestabilidad en los flancos del volcán respectivamente; estos hechos podrían ocasionar lahares e inundaciones comparables con fenómenos mayores ocurridos en la región, sin intervención de la actividad volcánica (PARRA *et al.*, *op cit.*). Sobre el Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Nevado del Ruiz, se modelaron dos escenarios erupción: el del 13 de noviembre de 1985, y uno similar al del 19 de febrero de 1845, con dimensiones de 2.5 a 3 veces mayores que el primero (PARRA *et al.* 1985; PARRA & CEPEDA 1990). El área de influencia del lahar de 1985 se muestra en color rojo (amenaza alta), a lo largo de los cursos de los ríos Claro, Lagunilla y Gualí (Fig. 5); mientras las zonas afectables por un evento como el flujo de 1845, se observan en color anaranjado (amenaza intermedia), coincidiendo con los cursos de los ríos Claro, Lagunilla, Gualí y Recio (Fig. 5). Para integrar este proceso volcánico en el área del Parque Nacional de los Nevados, se tuvo en cuenta el escenario correspondiente con el evento de 1845.

Volcán Nevado del Santa Isabel

El complejo de domos este cubierto por un casquete glaciar de aproximadamente 7 Km² de área, espesor

promedio de 10 m y 72 millones de m³ de hielo (0,072 Km³). Esto representa amenaza, pues en caso de erupción en el área glaciar, el casquete podría sufrir fusión parcial, generándose lahares que descenderían por los ríos Campoalegre y Claro, al occidente, y el Recio y Totare al oriente (INGEOMINAS-CARDER 1994). Estas áreas de amenaza se muestran en rojo (amenaza alta), a lo largo de los cursos mencionados anteriormente (Fig. 6).

Volcán Nevado del Tolima

El dominio del actual casquete glaciar de este volcán se halla sobre la cota de 4.800 m, cubriendo un área proyectada de 1,7 Km², con espesor mínimo de 50 m, que implica un volumen mínimo de 95 millones de m³ de hielo (0,095 Km³). Este casquete glaciar es drenado en un 94% por los ríos Combeima (60%) y Totare (34%), lo cual significaría que la casi totalidad de lahares formados como consecuencia de un evento eruptivo potencial del Tolima, transitarían a lo largo de sus valles. El Rio Combeima, además de recibir el mayor aporte de agua por deshielo, no posee en sus partes altas zonas amplias que frenen o faciliten la deposición de los lahares, permitiéndole así el tránsito de todo el material hasta zonas distales. La zona distal del Valle del Rio Combeima se encuentra densamente poblada, especialmente en la ciudad de Ibagué, donde estarían potencialmente amenazados 50.000 de sus habitantes (CEPEDA & MURCIA 1988).

Se calculó que luego de desencadenados, los lahares de la parte alta del Nevado del Tolima tardarían menos de media hora en llegar a Juntas (Fig. 7), menos de 40 minutos en llegar a Villa Restrepo y Pastales, menos de 50 minutos para llegar a Chapetón, y en menos de una hora estarían entrando a la zona urbana de la Ciudad de Ibagué (Fig. 7) (CEPEDA & MURCIA *op cit.*). Las zonas amenazadas se muestran en rojo (amenaza alta), coincidentes con los cursos de los ríos Totare, La China y Combeima (Fig. 7).

Volcán Machín

Si ocurren flujos piroclásticos, como consecuencia directa e indirecta, serían generados lahares. De manera directa por transición desde flujos de ceniza y pómez que se enriquecen en agua, en la zona distal, alcanzando el Rio Magdalena, e indirecta por represamientos en el Rio Coello y sus afluentes. Asociados a la generación, tránsito y deposición de lahares, pueden ocurrir represamientos e inundaciones en la cuenca del Rio Coello y en el Rio Magdalena (CEPEDA *et al.* 1996). En el mapa de amenaza (Fig. 8), no se diferencian los lahares de los flujos piroclásticos, porque comparten parcialmente dominios, y es difícil saber cuándo terminan unos y comienzan los

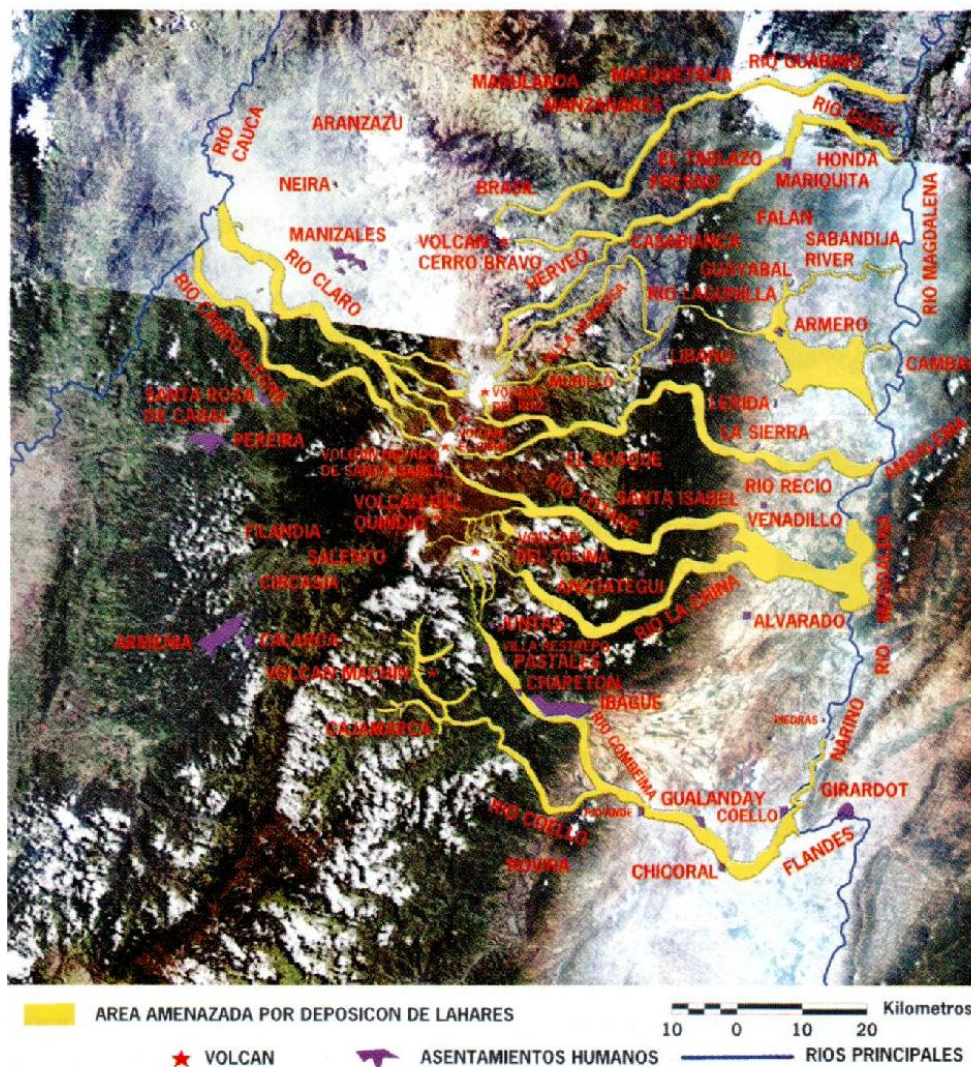


Fig. 13. Mapa de amenaza volcánica por lahares para el Parque Nacional de los Nevados, desplegado sobre mosaico Landsat TM 5 en composición de falso color 3 en rojo, 2 en verde, 1 en azul (VILLEGAS 2002).

otros. El área de influencia de estos procesos volcánicos se muestra en amarillo (amenaza baja), a lo largo del curso del Río Coello (Fig. 8).

La Figura 13 muestra el Mapa de Amenaza Volcánica por lahares para el Parque Nacional de los Nevados, donde se han representado en color amarillo los polígonos coincidentes con áreas potencialmente afectables por este proceso volcánico; dicho color significa amenaza y no implica ninguna categorización del misma. La integración de la amenaza para fenomenologías volcánicas específicas en estos cinco volcanes, nos permite observar que por el Río Combeima pueden circular flujos originados en los volcanes Machín y

Nevado del Tolima; que a lo largo del curso del Río Totare es posible que coincidan lahares generados en los volcanes nevados de Santa Isabel y Tolima; que los ríos Recio y Claro pueden conducir lahares producidos por los volcanes nevados del Ruiz y Santa Isabel; que el Río Gualí está amenazado por flujos que pueden originarse en el Volcán Nevado del Ruiz y/o el Volcán Cerro Bravo; y que por el Río Campoalegre solamente circularan lahares originados por el Volcán Nevado de Santa Isabel.

VISUALIZACION DE BASES DE DATOS

Trabajando en ambiente SIG, la información espacial puede

representarse de formas variadas, que incluyen puntos, líneas y polígonos para los datos vectoriales, al igual que mallas ("grids"), productos de barrido digital ("scans") e imágenes, que constituyen los datos "raster". Durante el pasado se hizo mucho énfasis en las ventajas de uno u otro formato; hoy en día los usuarios SIG tienen las ventajas de ambos, así como la posibilidad de migrar información entre los mismos. Combinando la flexibilidad y velocidad del procesamiento digital de una imagen "raster", con el análisis espacial de las bases de datos relacionales del formato vector, se tienen posibilidades que antes no estaban disponibles.

Se ha propuesto la combinación de datos "raster" con datos vectoriales, como metodología para generar productos que ayuden a mejorar la comunicación entre los vulcanólogos y la gente no familiarizada con los volcanes (VILLEGAS 2001a, 2002a, 2002b). El Mapa de Amenaza Volcánica por Lahares para el Parque Nacional de los Nevados (Fig. 13), es un juego de datos vectorial que representa mediante polígonos, áreas de amenaza volcánica.

El Landsat TM 5 es un juego de datos "raster"; es el sistema de percepción remota que hasta la fecha ha sido más utilizado para aplicaciones geológicas en Colombia; muestra gran potencial para el manejo de situaciones de amenaza geológica generadas por la sedimentación de lahares (VILLEGAS 2001b, 2003). Se ensambló un mosaico con las cuatro escenas que registran las áreas de influencia de los volcanes considerados; dicho mosaico se presenta en composición de falso color TM3 en rojo, TM2 en verde, TM1 en azul, que emula la visión humana.

La topografía del área de estudio a escala 1:100.000 es un juego de

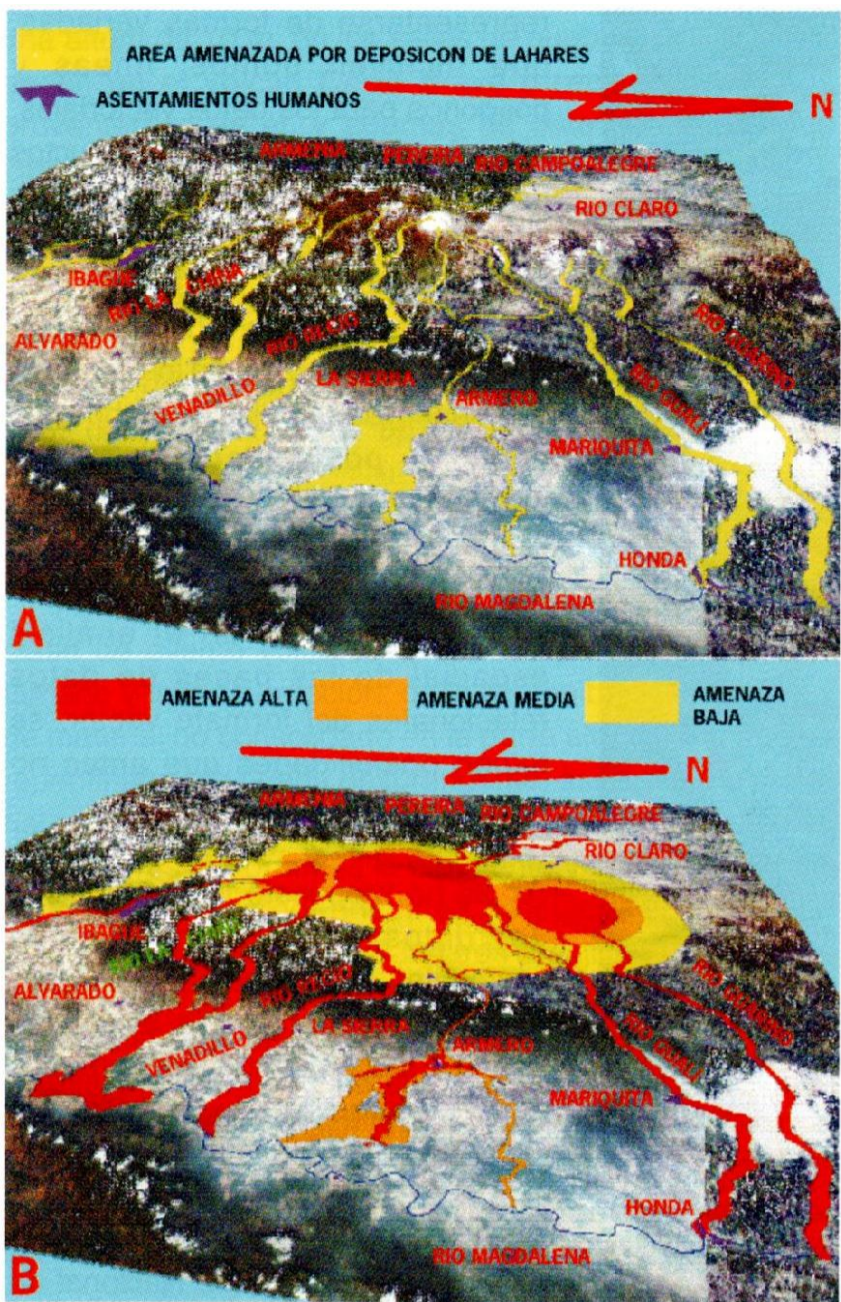


Fig. 14. Vistas en perspectiva de los mapas de amenaza volcánica integrada para el Parque Nacional de los Nevados: A. por lahares y B. probabilístico.

datos vectorial que contiene información representada mediante coordenadas, la cual se organiza como sucesiones de puntos denominados líneas (curvas de nivel), que tienen longitud pero carecen de área. Como la tercera dimensión (topografía) suele ser la más difícil de percibir, a partir de este mapa topográfico se genera un modelo digital de elevación del terreno, promediando las elevaciones de las distintas isolíneas dentro de las celdas de una malla, para crear una matriz digital de dichas alturas.

Esta matriz de salida o modelo de elevación del terreno es un mapa "raster", donde los elementos que le componen se organizan en forma de malla. Cada celda tiene localización definida por un sistema de coordenadas tipo línea ("row") y columna ("column"), representadas por X y Y respectivamente. Estas tienen un atributo numérico Z o de tercera dimensión, correspondiente con un numero digital específico, que en el caso de los modelos de elevación

coincide con la altura expresada en metros. En este mapa "raster" los pixeles tienen un largo de 30 m de lado, coincidente con la resolución espacial de los datos "raster" del Landsat TM 5.

Al mosaico Landsat TM 5 se le superpusieron los polígonos del Mapa de Amenaza Volcánica por Lahares para el Parque Nacional de Los Nevados (Fig. 13). Este juego de datos vectoriales y "raster" se hizo interactuar con el modelo de elevación del terreno, mediante la generación de vistas en perspectiva de las áreas expuestas a amenaza por lahares, donde se emulan todos los parámetros de observación de un observador virtual, tales como localización, altura sabré el nivel del mar, dirección de observación, Angulo del campo de observación, ángulo de visión con respecto de la horizontal ("pitch") y exageración vertical del relieve, sobre un paisaje que también es simulado por el programa (Fig. 14a). De manera análoga pueden generarse vistas en perspectiva con el mapa integrado de amenaza probabilística (Fig. 14b).

Este es uno de los usos más interesantes de la topografía en ambiente SIG y se denomina visualización de bases de datos. Tal aplicación tiende a convertirse en la manera más común de desplegar información, permitiendo que datos complejos como aquellos relacionados con la amenaza volcánica del Parque Nacional de los Nevados, sean más fácilmente entendidos por planificadores, políticos y el público en general. Los programas SIG disponibles comercialmente en la actualidad, no solamente le permiten a sus usuarios generar vistas en perspectiva de juegos de datos vector y "raster", sino también generar vuelos virtuales a través de ellos (BROOKE 2001).

CONCLUSIONES

En regiones donde existen volcanes adyacentes, no es adecuado modelar la amenaza volcánica desde la perspectiva de la zona de influencia de cada uno de los mismos, considerados individualmente, porque solo se muestran áreas a poblaciones amenazadas por un solo volcán. La integración regional de la amenaza de todos los edificios volcánicos, genera un cuadro más real de la misma, porque permite observar cual o cuales son los volcanes que amenazan regiones o poblaciones específicas.

Los dos criterios preponderantes para la representación de la amenaza volcánica en un mapa son el probabilístico, que enfatiza en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de todos los fenómenos volcánicos, y el vulcanológico, que delimita áreas que podrían ser

afectadas por una fenomenología volcánica específica. El primero es adecuado para manejar emergencias volcánicas a corto plazo, mientras el segundo es útil para realizar programas de educación sobre los volcanes y sus amenazas, en tiempos de calma (sin crisis volcánica), dirigidos a ciudadanos comunes y funcionarios públicos expuestos a la amenaza. Estos dos criterios (probabilístico y vulcanológico), deben conjugarse para la elaboración de cualquier mapa de amenaza volcánica.

Los mapas de amenaza volcánica en formato digital, mejoran la capacidad de los científicos para integrarla regionalmente, al igual que para relacionar áreas de amenaza con el paisaje, mediante visualización de bases de datos en tres dimensiones.

Los productos generados combinando datos de teledetección, con mapas de amenaza volcánica y modelos digitales de elevación del terreno, son cruciales en la gestión de amenazas generadas por procesos volcánicos, para educar y comunicarse con quienes son responsables de la seguridad pública, durante cualquier situación de crisis volcánica.

Los sistemas de información georreferenciada pueden utilizarse como una tecnología de comunicación, para apoyo de programas de educación continua sobre los volcanes y sus amenazas, dirigidos a responsables de la seguridad pública y ciudadanos comunes expuestos a amenaza volcánica.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus más sinceros agradecimientos a INGEOMINAS, por haber facilitado los equipos para realizar el procesamiento de la información georreferenciada que es tema de este trabajo, y por haber asumido los costos que demanda la impresión de las figuras en color. Igualmente desea agradecer a tres (3) revisores anónimos, por aportar excelentes observaciones que permitieron estructurar adecuadamente el trabajo para su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANONIMO (1986): Estadísticas sobre lo que fue Armero hasta la noche del 13 de noviembre.- Secretaria de Información y Prensa de la Presidencia de la Republica. eds. *El Volcán y la Avalancha, 13 de Noviembre de 1985*, pp. 52-55. Presidencia de la Republica, Bogotá, Colombia.
- ARAÑA. V.; FELPETO, A.; ASTIZ, M.; GARCIA, A.; ORTIZ, R. & ABELLA, R. (2000): Zonation of the main volcanic hazards (lava flows and ash fall) in Tenerife, Canary Islands. A proposal for a surveillance network.- *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 103, p. 377-391, Amsterdam, Holanda.
- BROOKE, G. (2001): Not just visualization—simulation.- *Geoinformatics*. July-August, p. 6-9, Emmeloord, Holanda.

- CEPEDA, H.; MURCIA, L.A.; NUÑEZ, A. & PARRA, E. (1987): Mapa preliminar de amenaza volcánica en Colombia, escala 1:3.000.000.- *Revista CIAF*, v. 11. Tomo II, 1-3, p. 179-187, Bogotá, Colombia.
- CEPEDA, H. & MURCIA, L.A. (1988): Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del Nevado del Tolima, Colombia, S.A.- *Boletín Geológico*, v. 29. 3, p. 33-75, Bogotá. Colombia.
- CEPEDA, H.; MURCIA, L.A.; MONSALVE, M.L.; MENDEZ, R.A. & NUNEZ, A. (1996): Volcán Cerro Machín, Departamento del Tolima, Colombia: pasado, presente y futuro (Informe 2305 INGEOMINAS).- 48 p., INGEOMINAS. Bogotá. Colombia.
- COLE, P.D.; GUEST, J.E.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J.M.; GASPAR, J.L.; FERREIRA, N. & DUNCAN, A.M. (1999): Styles of volcanism and volcanic hazards on Furnas Volcano, Sao Miguel, Azores.- *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 92, p. 39-53, Amsterdam, Holanda.
- CRANDELL, D.R. & MULLINEAUX, D.R. (1978): Potential hazards from future eruptions of Mount St. Helens Volcano. Washington.- U.S. Geological Survey, Bull., 1383-C. 26 p, Washington, U.S.A.
- DIBBEN, C. & CHESTER, D.K. (1999): Human vulnerability in volcanic environments: the case of Furnas, Sao Miguel, Azores.- *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 92, p. 133-150, Amsterdam, Holanda.
- GARCES, G. & DE LA ZERDA, S. (1994): *Gran Libro de los Parques Nacionales de Colombia*.- 230 p., Intermedio Editores, Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS — CARDER (1994): Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial, Complejo de Doms de Santa Isabel.- *Revista INGEOMINAS*, v. 1, 3. p. 1.28, Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS (2000): *Atlas de Amenaza Volcánica en Colombia*.- 120 p., INGEOMINAS. Bogotá, Colombia.
- LAVIGNE, F.; THOURET, J.C.; VOIGHT, B.; SUWA, H. & SUMARYONO. A. (2000): Lahars at Merapi Volcano, Central Java: an overview.- *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. v. 100, p. 423-456, Amsterdam, Holanda.
- MILLER, C.D.; MULLINEAUX, D.R. & CRANDELL, D.R. (1981): Hazard assessments at Mount St. Helens.- Lipman, P.W. & Mullineaux, D.R., eds. *The 1980 eruptions of Mount St. Helens. Washington. U.S.*, p. 789-802, U.S. Geological Survey, Professional Paper 1250, Washington, U.S.A.
- MONSALVE, M.L. & NUNEZ, A. (1992): El Volcan Cerro Bravo, geologic y amenaza volcanica.- *Revista INGEOMINAS*, v. 1, p. 2-9, Bogota, Colombia.
- MULLINEAUX, D.R. (1981): Hazards from volcanic eruptions.- Hays, W.W. editor. *Facing Geologic and Hydrologic Hazards. Earth-Science Considerations*, p. 87-100, U.S. Geological Survey, Professional Paper 1240-B, Washington, U.S.A.
- MUNOZ-CARMONA, F. (1999): The role of communication in the construction of volcanic risk in Pasto, Colombia (Doctor of Philosophy dissertation).- 207 p., Arizona State University, Phoenix. U.S.A.

- ____ (2001): Perspectivas para la evaluación de amenazas y riesgos geológicos en INGEOMINAS — Colombia.- III Simposio Panamericano de deslizamientos, Cartagena. Colombia.
- MUÑOZ-CARMONA, F. & MONSALVE, M.L. (2001): Replanteando la formulación de mapas de amenaza volcánica.- VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales, Colombia,
- PARRA, E.; CEPEDA, H. & THOURET, J.C. (1986): Mapa actualizado de amenaza volcánica potencial del Nevado del Ruiz.- INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- PARRA, E. & CEPEDA, H. (1990): Volcanic hazard maps of the Nevado del Ruiz Volcano.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.42, p.117-127, Amsterdam. Holanda.
- SIMKIN, T. (1994): Volcanoes: their occurrence and geography.- Volcanic Ash and Aviation Safety: proceedings, First International Symposium, U.S. Geological Survey, Bull. 2047, p. 75-79, Denver, U.S.A.
- STIX, J.; CALVACHE, M.L. & WILLIAMS, S.N. (1997): Galeras Volcano, Colombia. Interdisciplinary study of a decade volcano.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 77, p. 1-4, Amsterdam, Holanda.
- TILLING, R. (1993): Introducción y marco general.-Tilling, R., editor. *Los Peligros Volcanicos*, p. 1-8, Organizacion Mundial de Observatorios Vulcanologicos, Menlo Park, U.S.A.
- THOURET, J.C.; LAVIGNE, F.; KELFOUN, K. & BRONTO, S. (2000): Toward a revised hazard assessment at Merapi Volcano, Central Java.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.100, p. 479-502, Amsterdam, Holanda.
- UNITED NATIONS (1992): Glossary. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management.- 43 p, United Nations, Department of Humanitarian affairs, Geneva.
- VILLEGAS, H. (2001 a): Educating policy makers about volcanic hazards.- Imaging Notes, v. 16, 5, p. 18-20, Thornton, U.S.A.
- ____(2001 b): Interpretación detallada y visualización en tres dimensiones, del flux) de escombros de noviembre 13 de 1985 en Armero (Tolima, Colombia), utilizando imágenes de satélite Landsat TM 5.- Geología Colombiana, 26, p. 177-188, Bogotá, Colombia.
- ____(2002 a): 3D visualization of volcanic hazards.- GIM International, v. 16, p. 61-63, Lemmer, Holanda.
- ____(2002 b): Visualización en tres dimensiones, los mapas de amenaza volcánica educan al ciudadano común.- Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander, v. 24, 39, p. 73-88, Bucaramanga, Colombia.
- ____(2003): Multi-temporal study and detailed photogeological mapping of the Armero debris flow (Colombia), using Landsat TM 5 images.- Geocarto International, v. 18, 1. p. 67-74, Hong Kong.
- VOIGHT, B. (1990): The 1985 Nevado del Ruiz Volcano catastrophe: anatomy and retrospection.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.44, p.151-188, Amsterdam, Holanda
- WRIGHT, T.L. & PIERSON, T.C. (1992): Living with Volcanoes.- 58 p., U.S. Geological Survey, Circular 1075, Denver, U.S.A.

Manuscrito recibido, Agosto de 2002; aceptado, Octubre de 2003.