

Interpretación detallada y Visualización en tres dimensiones, del Flujo de Escombros de Noviembre 13 de 1985 en Armero (Tolima, Colombia), utilizando imágenes de satélite Landsat TM 5

HENRY VILLEGAS

INGEOMINAS, Area de Reconocimientos Geocientíficos, Diagonal 53 No. 34-53, Bogotá D.E., Colombia. E-mail: henville@ingeomin.gov.co

VILLEGAS, H. (2001): Interpretación detallada y visualización en tres dimensiones, del Flujo de Escombros de Noviembre 13 de 1985 en Armero (Tolima, Colombia), utilizando imágenes de satélite Landsat TM 5.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 26, pp. 177-188, 7 Figs., Bogotá.

RESUMEN

El 13 de noviembre de 1985, la ciudad de Armero fue destruida por un flujo de escombros, desencadenado por la reactivación del Volcán Nevado del Ruiz, ubicado en el eje de la Cordillera Central de Colombia. Estudios posteriores han indicado que el flujo ocurrió en tres pulsos principales, de características hidrodinámicas diferentes, tal como fue observado por los sobrevivientes de la tragedia.

Se realizó el procesamiento de subescenas Landsat TM 5, tomadas antes y después de la depositación del flujo de escombros. Se generaron composiciones en falso color, que se combinaron con un modelo digital de elevación del terreno y la información geológica disponible, para crear vistas en perspectiva que permitieran visualizar las características del flujo, al igual que la magnitud de la catástrofe. Se realizó la interpretación de sus tres pulsos principales, aprovechando la alta resolución espectral de las imágenes Landsat TM 5, para mejorar la fotointerpretación previa, realizada con fotografías aéreas pancromáticas convencionales.

Las imágenes Landsat TM, a pesar de su baja resolución espacial y temporal, se constituyen en una herramienta de teledetección útil, para el manejo de situaciones de amenaza geológica, generadas por la sedimentación de flujos de escombros de origen volcánico. Para el tiempo en que la erupción del Volcán Nevado del Ruiz desencadenó el lahar de Armero, el acceso a este tipo de imágenes habría facilitado las labores de mitigación del desastre.

Palabras clave: *Percepción remota Landsat TM 5, interpretación, Flujo de escombros, Lahar, Amenaza volcánica, Armero-Tolima, Volcán Nevado del Ruiz.*

ABSTRACT

On november 13th of 1985, the city of Armero was destroyed by a debris flow generated by a reactivation of the Nevado del Ruiz Volcano, located in the middle third of the Central Cordillera of Colombia. Further studies have indicated that the flow occurred in at least three main pulses, each one with different hydrodynamic characteristics, as was observed by the survivors of the tragedy.

Landsat TM 5 data processing was carried out in subscenes taken before and after the debris flow sedimentation. False color composites were generated and combined with a digital terrain model and the geological information available, in order to create perspective views for visualizing the catastrophe magnitude and the flow characteristics. Taking advantage of Landsat TM 5 images high spectral resolution, a detailed interpretation of its three principal pulses was carried out, in order to improve the previous photointerpretations elaborated with panchromatic aerial photographs.

Despite its low spatial and temporal resolution, Landsat TM is a remote sensing powerful tool, which offers plenty of applications for hazard assesment of catastrophic lahars. By the time when the eruption of Nevado del Ruiz triggered the Armero debris flow, the access to Landsat TM 5 data would have played a very important role in that disaster's mitigation.

Keywords: *Remote perception, Landsat TM 5 interpretation, Debris flow, Lahar, Volcanic hazard, Armero Tolima, Nevado del Ruiz volcano*

INTRODUCCION

El 13 de Noviembre de 1985, una secuencia compleja de surgencias y flujos piroclásticos, erupcionados 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 23080 personas que habitaban en las proximidades del volcán.

Estos han sido los lahares más mortíferos de la historia registrada (PIERSON *et al.* 1990), y el desastre volcánico más grande desde la erupción de 1902 de Mount Pelée en Martinica, que causó la muerte de 28000 personas (NARANJO *et al.* 1986, TILLING & LIPMAN 1993). En un lapso de tiempo de cuatro horas después del inicio de la erupción, estos lahares descendieron 5100m y viajaron mas de 104Km, dejando una senda de destrucción y catástrofe: 23080 personas muertas o desaparecidas, 94% en la zona de Armero y 6% en la región de Chinchiná; 4420 heridos; 5092 viviendas destruidas, 4718 en Armero y 374 en Chinchiná; 229154 damnificados, 143792 en zonas urbanas y 85362 en zonas rurales; y daños en 210000 hectáreas de terreno (ANÓNIMO 1986).

En las proximidades del cañón del Río Lagunilla, 74km al Oriente de la cima del Volcán Nevado del Ruiz, la ciudad de Armero fue prácticamente destruida en su totalidad, y tres cuartos de su población perecieron. Este evento de naturaleza catastrófica, al igual que el terremoto de 1985 de la Costa de Méjico, que causó la muerte de 30000 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).

Para el tiempo en que la catástrofe sucedió, los estudios geológicos para la mitigación de la misma, fueron realizados con fotografías aéreas y superficiales convencionales, tomadas antes y después del desastre, porque el país no contaba con la infraestructura mínima para procesar imágenes de satélite, o no tenía acceso a este tipo de información. Quince años después de la sedimentación de estos lahares, se ha realizado el procesamiento digital de subescenas Landsat TM 5, tomadas antes y después del desastre. Este trabajo trata sobre procesamiento digital de imágenes de percepción remota, aplicado a visualización de amenaza volcánica en el área del Volcán Nevado del Ruiz en Colombia.

El lahar de Armero fue clasificado como flujo de escombros por UJUETA & MOJICA (1995), de acuerdo con la

clasificación para sedimentos volcanoclásticos no marinos de grano grueso, propuesta por SMITH (1986). Este autor sugiere no usar el término "lahar", y recomienda discontinuar su utilización en escritos técnicos, porque en sentido descriptivo no aporta, más que el término menos ambiguo de "flujo de escombros". Como la palabra lahar es aún de uso común en la literatura técnica colombiana, en este escrito se utilizará como sinónimo de flujo de escombros, o flujo de escombros de origen volcánico.

EL AREA DE LOS NEVADOS EN LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA

El Volcán Nevado del Ruiz, con una altura de 5370m sobre el nivel del mar, se localiza en el tercio central de la Cordillera Central de Colombia. Hace parte del Parque Nacional Natural Los Nevados (GARCÉS & DE LA ZERDA 1994), y del Complejo Volcánico Ruiz-Tolima, que se extiende por 60Km en la cima de la parte central de la Cordillera Central, y está compuesto de norte a sur por los volcanes Cerro Bravo, Ruiz, El Cisne, Santa Isabel, Páramo de Santa Rosa, Tolima, Quindío y Machín.

El Ruiz es un volcán activo, de forma elíptica, con 12 a 15Km de diámetro mayor, un área de 20Km², pendientes laterales de 20° a 35° y una cima relativamente plana, donde se encuentra el cráter Arenas. Se ubica 28Km al sureste de la ciudad de Manizales; sus laderas están cubiertas por un casquete glaciar de 21Km², que desciende hasta los 4800m de altura, donde nacen los ríos Gualí, Azufrado, Lagunilla, Recio y Claro (Fig. 1). Se reactivó el 22 de diciembre de 1984 a las 17:31 horas, con un temblor moderado de 5 grados de intensidad, en la escala modificada de Mercalli, con epicentro en las cercanías del cráter Arenas, que fue sentido en toda el área circundante al volcán, y causó alarma en los municipios de Manizales, Chinchiná, Armero, Mariquita, Líbano y Murillo (DUARTE 1986).

MEDINA (1986) afirma que el Nevado del Ruiz es uno de los volcanes activos más difíciles de estudiar en el mundo, por estar a 5370m sobre el nivel del mar, tener topografía fuerte de enormes farallones, grietas y ausencia de vías para acceder los distintos sitios de trabajo; presentar condiciones meteorológicas adversas, con temperaturas bajo cero, fuertes vientos y neblina que dificulta la operación de los equipos de medición mas sofisticados; presentar amenaza permanente de una nueva erupción, que hace necesario extremar las medidas de precaución para el personal científico que se desplace al volcán; y poseer casquete de hielo, poco frecuente en volcanes activos, que aumenta el riesgo de avenidas de flujos de escombros.

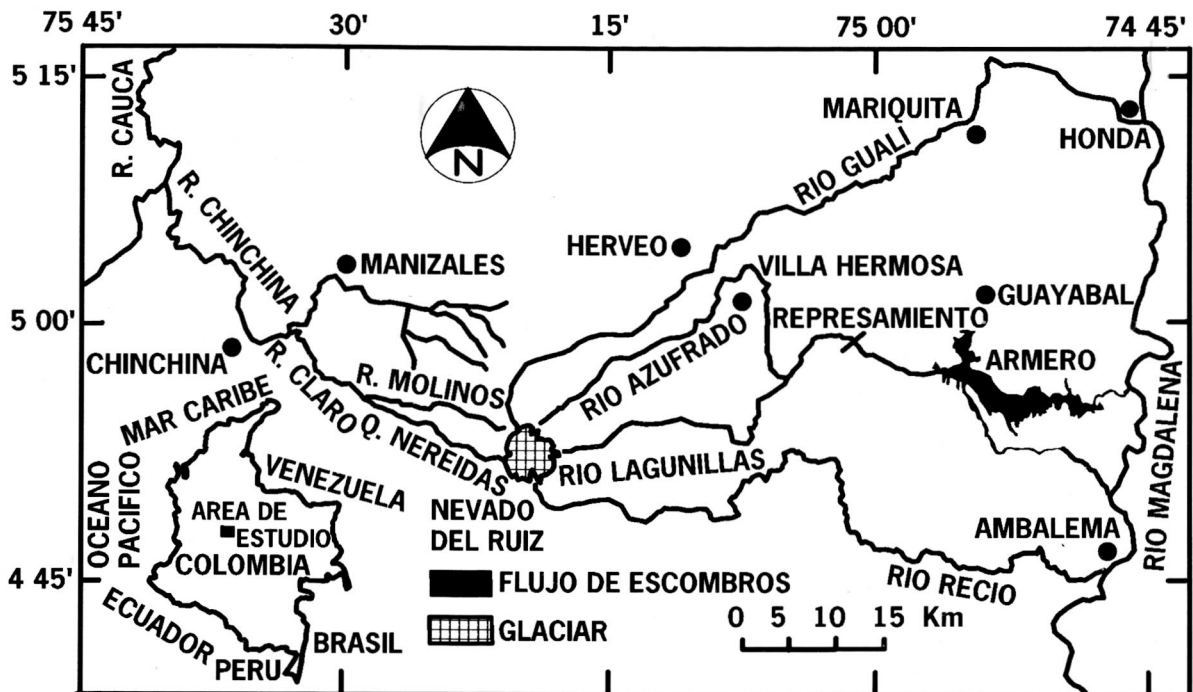


Fig. 1. Mapa de localización (Dibujó: H. Villegas)

De acuerdo con los documentos históricos, el valle de Armero ya ha sido afectado por lahares más catastróficos que el de 1985. Antes de esta fecha, el Nevado del Ruiz no había tenido una erupción mayor desde el 12 de marzo de 1595, cuando la avenida de escombros generada por una erupción magmática explosiva, desencadenó lahares en los valles de los ríos Gualí, Azufrado y Lagunilla. Los registros históricos indican que el lahar de 1595 que descendió por los últimos dos ríos, fue más grande que el que destruyó Armero en 1985 (MOJICA *et al.* 1985 a). Otro gran lahar, también mayor que el de 1985, descendió por el cañón del Río Lagunilla el 19 de febrero de 1845, inundando el sitio donde posteriormente se fundaría el Municipio de Armero; este flujo de escombros quitó la vida a más de mil personas, razón por la cual es considerado el desastre histórico más mortífero, generado por sedimentación de flujos de escombros en Colombia (MOJICA *et al.* 1985 a).

Posteriores estudios estratigráficos (MOJICA *et al.* 1985 b) y de percepción remota (KOOPMANS & FORERO 1993), realizados en la mitad occidental de la porción sur del Valle Medio del Río Magdalena, indican que estos relieves planos están conformados por acumulaciones sucesivas de abanicos aluviales, que fueron formados principalmente por la deposición de flujos de escombros, que descendieron a lo largo de los cauces de los ríos que nacen en las

proximidades del Volcán Nevado del Ruiz, y drenan el flanco oriental de la Cordillera Central (Lagunilla, Recio y Gualí, Fig. 1). Estos lahares representan eventos catastróficos, generados por la fusión parcial del glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, o por deslizamientos súbitos de material, en el área que actualmente corresponde al Parque Nacional de los Nevados.

Tales flujos, al igual que los que sepultaron Armero, se caracterizan por su mezcla caótica de materiales poligénicos, de tamaños variados; por la frecuente combinación de clastos angulares, casi siempre predominantes, con clastos redondeados a subredondeados; y finalmente, por la pobre expresión de sus estructuras sedimentarias primarias internas. Además de los eventos catastróficos ya mencionados, la región ha sido afectada por esporádicas inundaciones, como la de abril de 1950, generada por lluvias intensas en la Cordillera Central (MOJICA *et al.* 1985 a).

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES LANDSAT TM 5

Se elaboró un mosaico con subescenas tomadas después de la sedimentación del lahar (Fig. 2). El área de estudio se localiza en la Región Andina Colombiana, que tiene condiciones climáticas muy variables, las cuales

pueden oscilar desde húmedas hasta secas. Las áreas en los alrededores de la cima del Volcán Nevado del Ruiz están cubiertas por depósitos piroclásticos inconsolidados y glaciares, que dan condiciones de vida a una cubierta vegetal de baja densidad tipo páramo. Hay bosques primarios en las laderas orientales del volcán, y patrones de vegetación totalmente alterados por agricultura, ganadería y otras actividades humanas, en las zonas más bajas que coinciden con la planicie del Valle del Río Magdalena, donde se localizaba la Ciudad de Armero.

Teniendo en cuenta la espesa cubierta vegetal del terreno considerado, se dio mucha importancia a aquellas bandas que corresponden con propiedades de reflectancia alta de la vegetación, de acuerdo con la curva típica de reflectancia de una hoja (Fig. 3a). Para el Landsat TM 5 estas bandas son 2, 4, 5 y 7. Las composiciones en falso color que resultaron más útiles para aplicaciones geológicas son:

CANAL	ROJO	VERDE	AZUL
BANDA	4	5	7
	4	5	2

La segunda composición, además de mostrar los contrastes litológicos, resalta los patrones de drenaje en azul. El incluir la banda 5 (infra-rojo lejano, 1.55 – 1.75 mm) en cualquier composición de falso color, permite la diferenciación entre las nubes (en blanco) y la nieve (en violeta) sobre la cima del Volcán Nevado del Ruiz (Fig. 2).

Se aplicó un método de expansión de contraste fuerte, el de equalización de histogramas, que suele generar imágenes muy contrastadas, sin ventajas aparentes para interpretación (GREENBAUM 1989), pero que ha demostrado ser muy útil en terrenos totalmente cubiertos de vegetación como los colombianos, donde resalta patrones del material vegetal relacionados con las litologías infrayacentes. La Fig. 2 muestra la ubicación del Volcán Nevado del Ruiz en la Cordillera Central de Colombia; los ríos Lagunilla y Azufrado están resaltados en azul, dado que por estos canales se movilizaron los lahares más grandes que destruyeron la ciudad de Armero. En la composición de falso color aplicada (4 en rojo, 5 en verde, 2 en azul), el depósito del flujo de escombros aparece en color azul intenso, cubriendo el sitio donde se localizaba la ciudad de Armero. La vegetación de la Cordillera Central se muestra en colores verde, rojo y marrón, mientras los suelos cultivados del Valle del Río Magdalena aparecen en tonos blancos, rojos y azules.

Aprovechando la resolución temporal del Landsat TM 5, fue posible observar el área de los alrededores de

Armero, en subescenas tomadas antes (22 de Marzo de 1985) y después (22 de Marzo de 1988) del evento de flujo de escombros, para visualizar la magnitud de la catástrofe (Fig. 4).

El Lahar de Armero es una masa heterogénea de material volcánico fresco y antiguo, cantidades apreciables de azufre, rocas, suelo y vegetación proveniente de los taludes de los cauces; la mayor parte de sus sedimentos se generó por erosión de suelo inconsolidado de los valles de los ríos (LOWE *et al.* 1986), que se mezcló con material eruptivo primario no predominante (NARANJO *et al.* 1986).

En la mineralogía de la fracción arena de los lahares de Armero, se reportan feldespatos calco-sódicos, vidrio volcánico ácido, piroxenos, cuarzo, moscovita, biotita y clorita; en la fracción arcilla, montmorillonita, caolinita, micas y óxidos de hierro. El color pardo grisáceo a gris de la matriz de los depósitos, parece estar determinado por la presencia de altas cantidades de azufre en diferentes estados de oxidación y reducción, que conlleva a la generación de jarosita (FRYE 1986).

En estudios de la respuesta espectral, de las porciones visible e infra-roja del espectro electromagnético, realizados en muestras de rocas alteradas hidrotermalmente, con contenido mineral similar al del flujo de escombros de Armero, se ha observado que en el rango espectral comprendido entre 1.2 y 2.5 mm, suelen dominar los rasgos de constituyentes minerales, que por lo general son del grupo de las arcillas; mientras que en el rango de longitudes de onda menores de 1.2 mm, el espectro es fuertemente influenciado por las propiedades de minerales que contienen hierro (HUNT & ASHLEY 1979).

Los depósitos del flujo de escombros de Armero contienen estos dos tipos de minerales. Estudios realizados en muestras de agua extraídas del lahar que sepultó Armero, muestran una muy alta concentración de SO_4^{-2} (5375 ppm), una concentración de Cl^- de 380 ppm, y una proporción resultante S/Cl de 4.67 (WILLIAMS *et al.* 1986); la gran abundancia de SO_4^{-2} , favorece la formación de jarosita ($(SO_4)_2KFe_3(OH)$) sobre la de óxidos de hierro, mientras que la montmorillonita parece ser el mineral arcilloso dominante, dado que su presencia explica la tendencia al cuarteamiento observada en los lodos al secarse (FRYE 1986).

La curva de reflectancia de la jarosita (Fig. 3b), tiene un pico de reflexión centrado en aproximadamente 0.72 mm, dentro de la porción de longitudes de onda menores de 1.2 mm; el rango de la banda 3 del Landsat TM 5 (0.63 – 0.69 mm), es el que provee los valores más altos de

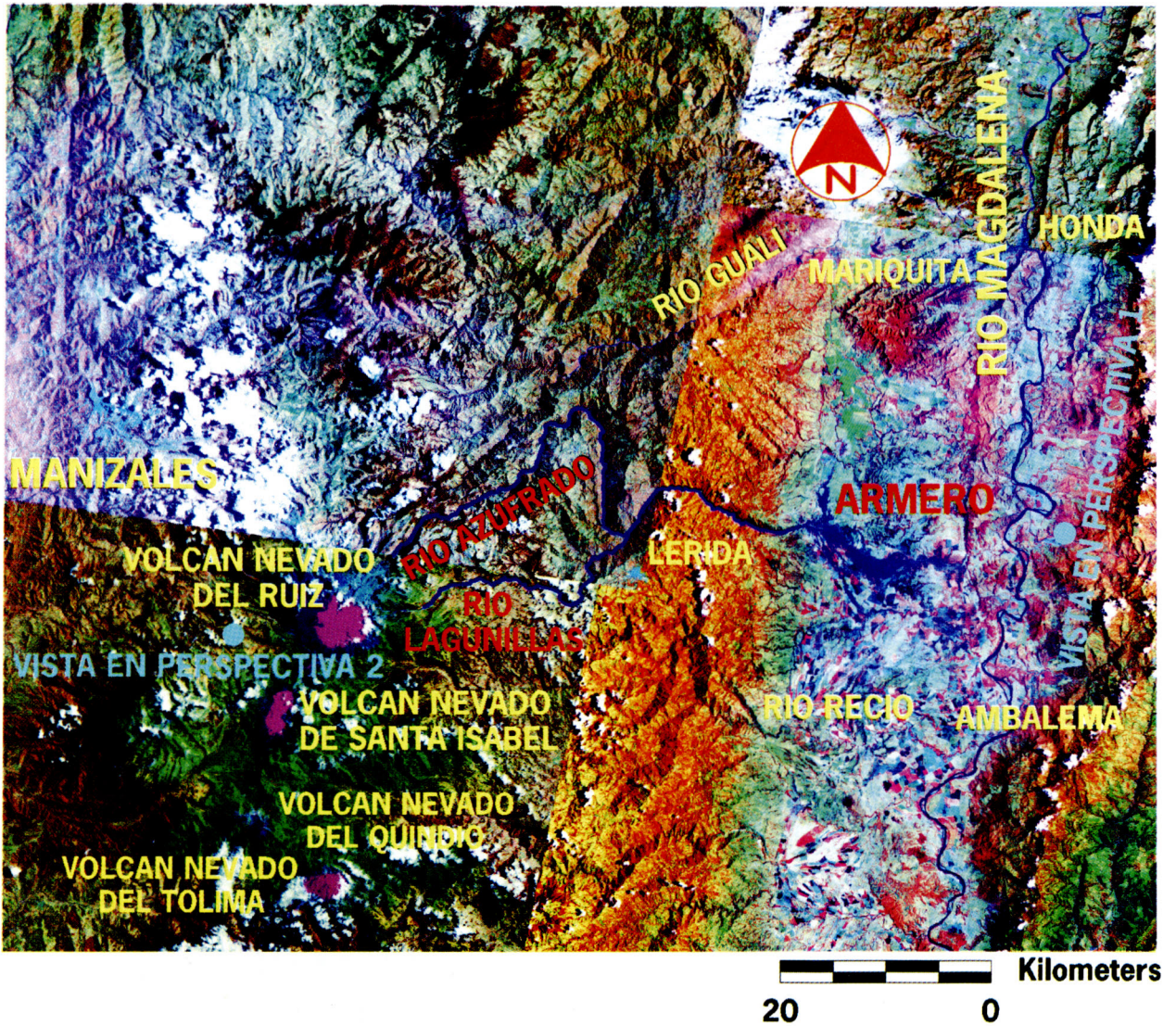
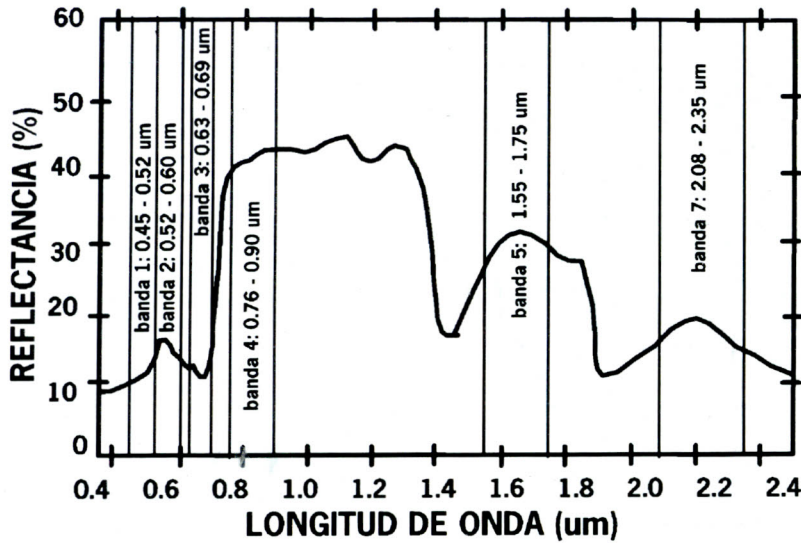


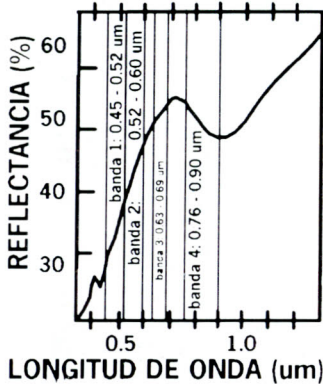
Fig. 2. Mosaico Landsat TM 5 procedente de las escenas Path (P) 9 Row (R) 56 de septiembre 21 de 1986, P9R57 de agosto 7 de 1989, P8R57 de marzo 22 de 1988 y P9R56 de diciembre 30 de 1989. Composición en falso color, 4 en rojo, 5 en verde, 2 en azul, con ecualización de histogramas.

reflectancia para este mineral. La curva de reflectancia de la montmorillonita (Fig. 3c), dentro de la porción de longitudes de onda comprendida entre 1.2 y 2.5mm, muestra sus valores mas altos, en el rango de longitudes de onda coincidentes con la banda 5 del Landsat TM 5 (1.55 – 1.75 mm), que también coincide con un pico de reflectancia de la vegetación en el infra-rojo lejano (Fig. 3a). La banda 2, muestra propiedades de reflectancia espectral de la vegetación en la porción visible del espectro electromagnético (Fig. 3a), permitiendo la diferenciación entre los sedimentos del flujo de escombros, y los terrenos cubiertos de material vegetal en el valle del Río Magdalena.

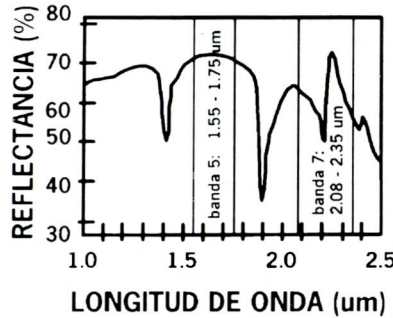
Así la composición en falso color seleccionada, fue 5 en rojo, 3 en verde y 2 en azul (Fig. 5). Dado que con esta combinación de bandas, se pretende diferenciar sedimentos (flujo de escombros) de vegetación, se aplicó un método de expansión de contraste suave (linear simple). El lahar de Armero aparece en azul y la vegetación del valle del Río Magdalena en rojo; en el flujo de escombros, los tonos más oscuros corresponden con material menos deshidratado, o sea más reciente; tales tonos son criterio para diferenciar eventos de flujo en los depósitos, dado que los lóbulos secundarios generados por la segunda fase del lahar, no se pueden individualizar en fotografías aéreas pancromáticas convencionales



a) Curva típica de reflectancia de una hoja



b) Curva de reflectancia de la jarosita



c) Curva de reflectancia de la montmorillonita

Fig. 3. a) Curva típica de reflectancia de una hoja (modificado de DRURY 1987). b) Curva de reflectancia de la jarosita, en el rango de 0.4 a 1.3 μm (modificado de HUNT & ASHLEY 1979). c) Curva de reflectancia de la montmorillonita, en el rango de 1.0 a 2.5 μm (modificado de HUNT & ASHLEY 1979).

(UJUETA & MOJICA 1995).

PULSOS DE FLUJOS DE ESCOMBROS Y FOTOINTERPRETACION DEL LAHAR DE ARMERO

En 1984, un año antes del desastre, un derrumbe represó el Río Lagunilla, aguas abajo de su confluencia con el Río Azufrado (NARANJO *et al.* 1986), generando un lago de 25m de profundidad, que llegó a contener cerca de 750000m³ de agua (PIERSON *et al.* 1990). Dicho

represamiento estuvo muy relacionado con la dinámica y poder destructor de los pulsos de flujos de escombros, porque permitió la acumulación de grandes volúmenes en el curso del Río Lagunilla. La ubicación de este represamiento se muestra en la Fig. 1.

El 11 de septiembre de 1985, a las 13:30 (hora local) se produjo una notable emisión de material piroclástico, acompañado de intensas tempestades eléctricas sobre el cráter Are-

nas del Volcán Nevado del Ruiz. Hacia las 18:30 se inició un pequeño flujo de lodo, que avanzó unos 8Km por el cauce del Río Azufrado e interrumpió la carretera Manizales-Murillo (INGEOMINAS 1985:6 en MOJICA *et al.* 1985 a).

El 13 de noviembre de ese mismo año, a las 15:05 horas de la tarde, siete (7) horas antes de que se desencadenara la tragedia, una explosión freática fuerte del cráter Arenas, comenzó una erupción de aproximadamente 15 minutos, que depositó cenizas líticas hasta 50Km de distancia del volcán, en direcciones noreste y este. Esta erupción generó un deslizamiento pequeño en las cabeceras del Río Azufrado, el cual aguas abajo se desencadenó como un lahar, que destruyó un puente ubicado a 4.5Km del cráter (Calvache, 1986 en PIERSON *et al.* 1990).

Estos dos flujos de escombros previos y de poca magnitud, posteriormente serían una de las razones por las cuales el lahar del Río Azufrado alcanzó más velocidad y volumen que el del Lagunilla, ya que empezaron a adecuarle su camino hacia Armero.

Los estudios regionales, al igual que el testimonio de gran número de sobrevivientes, indican que los principales eventos de flujos de escombros en Armero, sucedieron de la siguiente manera (PIERSON *et al.* 1990):

Evento 1: aconteció aproximadamente a las 23:25, como un flujo de agua fría, relativamente limpia, que alcanzó a mover vehículos en algunas calles, pero que en la mayoría de las localidades alcanzó unos pocos centímetros de profundidad.

Evento 2: a las 23:35 llegó a Armero el primer pulso del lahar, con una velocidad frontal probable de

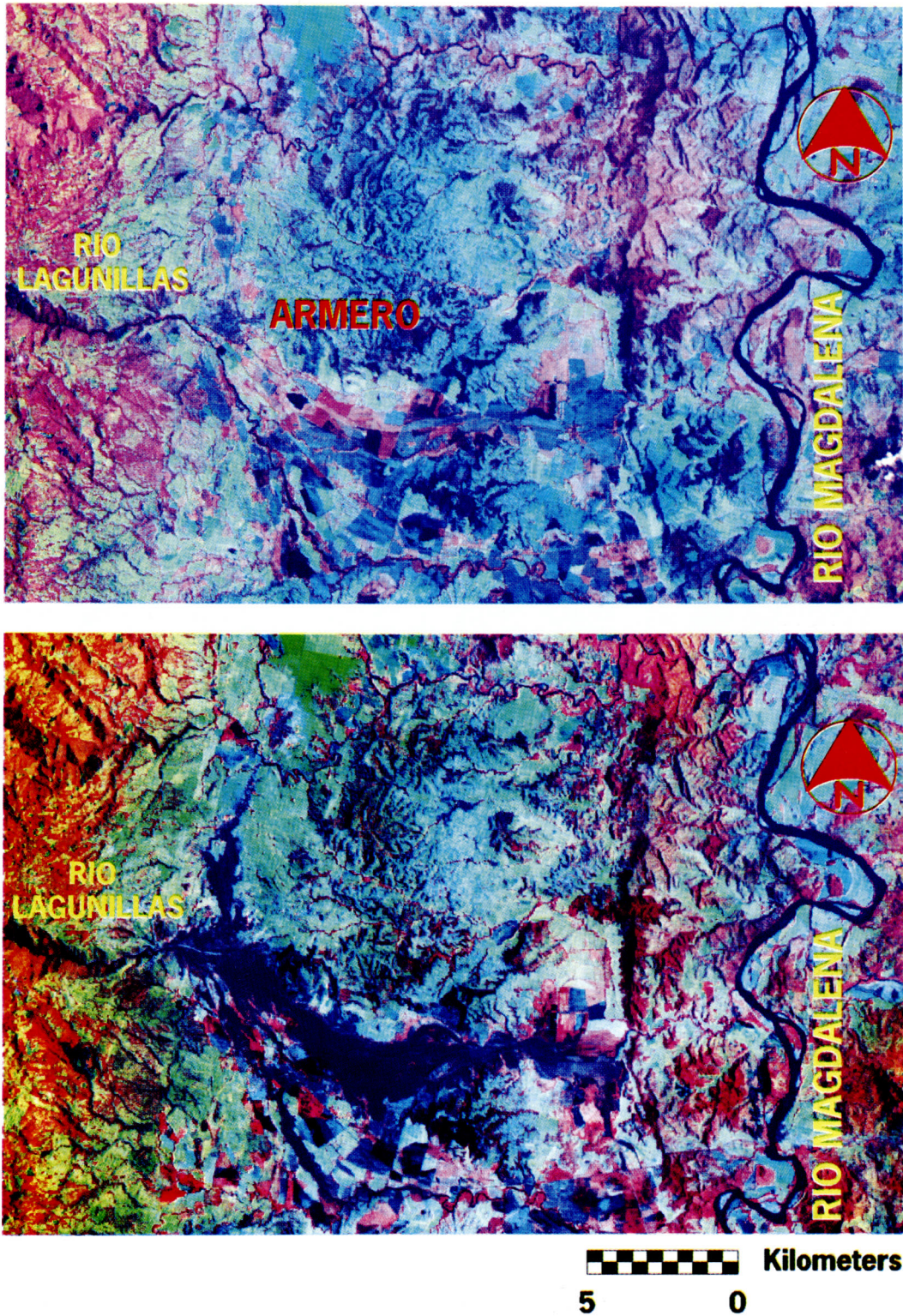


Fig. 4. Subescenas Landsat TM 5 P9R57 tomadas antes (marzo 22 de 1985) y después (marzo 22 de 1988) de la deposición del lahar de Armero. Composición en falso color, 4 en rojo, 5 en verde, 2 en azul, con ecuilización de histogramas.

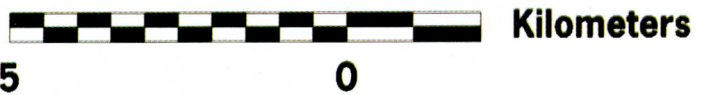
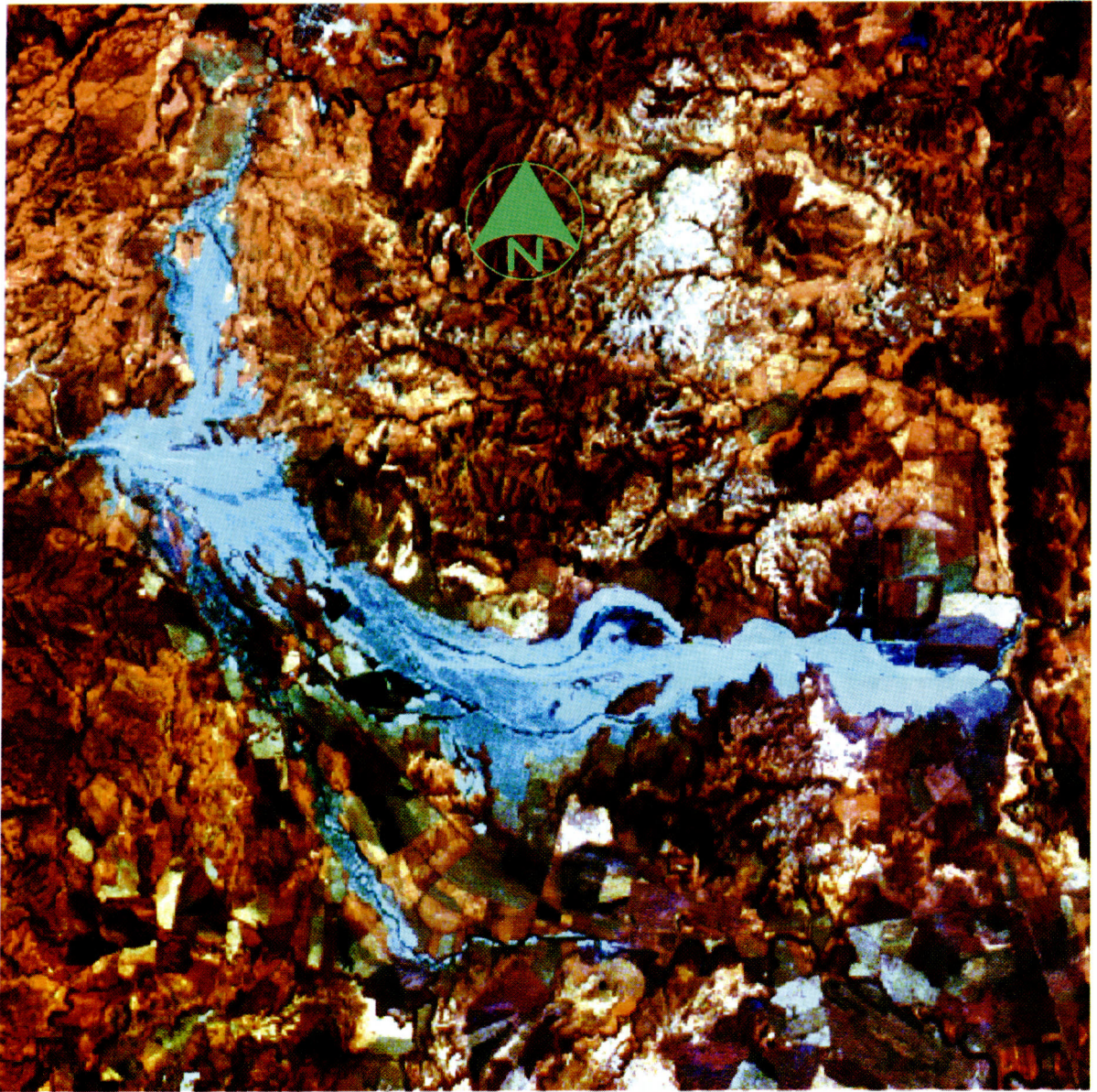


Fig. 5. Composición en falso color, 5 en rojo, 3 en verde, 2 en azul, con expansión de contraste lineal simple. Subescena Landsat TM 5 P9R57 de marzo 22 de 1988.

aproximadamente 12m/s. Este fue el pulso más grande, con una duración de 10 a 20 minutos.

Evento 3: sucedió a las 23:50 como un segundo pulso mayor de flujo, que duró aproximadamente 30 a 35 minutos, y tuvo una velocidad de mas o menos 6m/s.

Evento 4: se dio durante la siguiente hora, como se-

ries de pulsos mucho más pequeños, que según relatos de los sobrevivientes fueron de 6 a 8.

Evento 5: sucedió mas o menos a la 1:00 de la mañana y fue el último pulso substancial, con una velocidad reportada de 4 a 5m/s y una duración de aproximadamente 15 minutos.

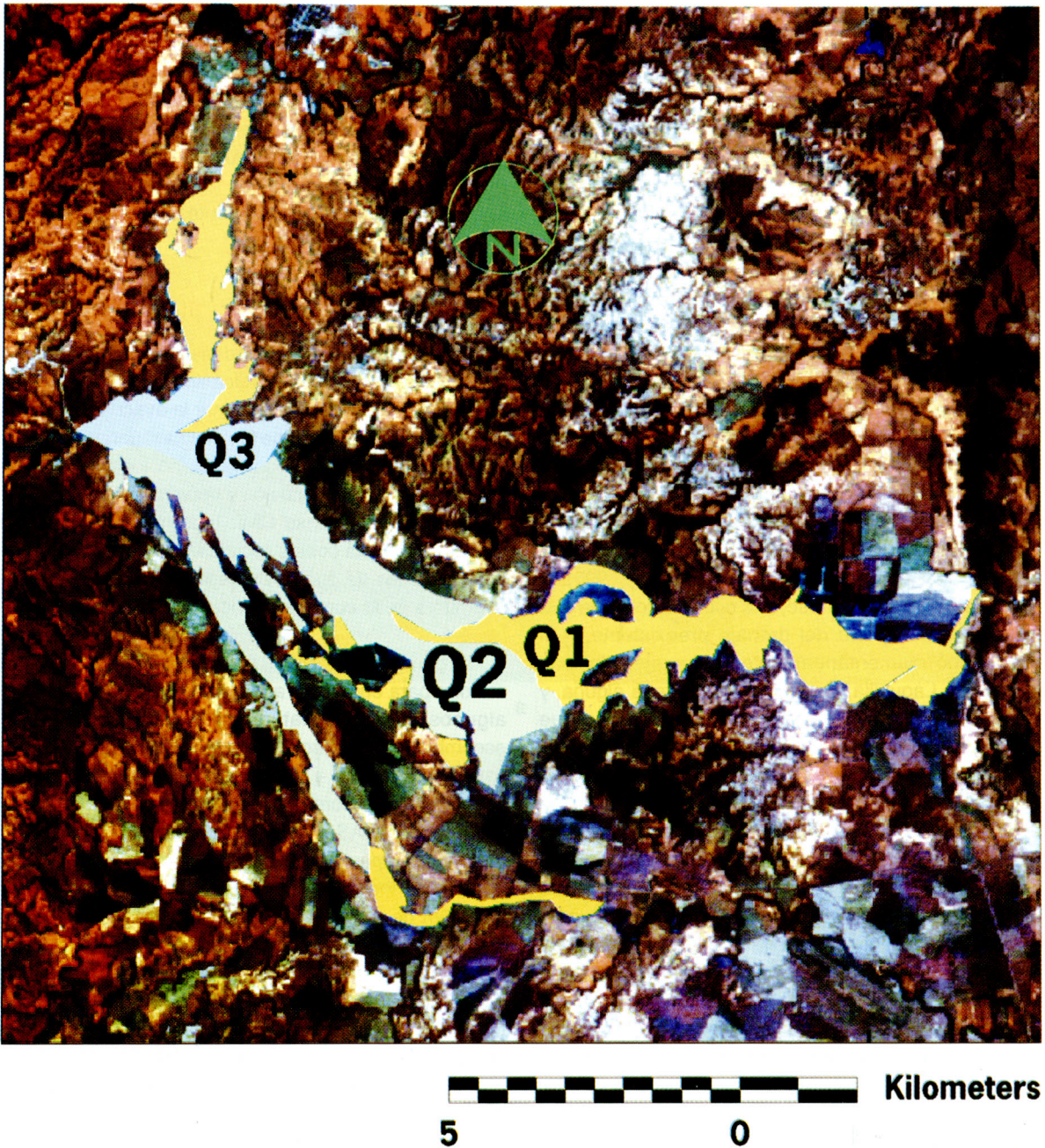


Fig. 6. Cartografía de los tres principales pulsos de flujo de escombros de Armero.

Aprovechando la alta resolución espectral del Landsat TM 5, combinada con las fotointerpretaciones previas (PIERSON *et al.* 1990, UJUETA & MOJICA 1995), se realizó la cartografía de los tres principales pulsos del flujo de escombros de Armero, de la siguiente manera (Fig. 6):

El evento 1 no tiene registro geológico. Suwa & Okuda (1985, en UJUETA & MOJICA 1995), con base en

observaciones sistemáticas sobre estos fenómenos, encuentran que el movimiento de flujo de escombros empieza con un flujo lodoso precedente de poca magnitud, que correspondería con este evento. UJUETA & MOJICA (1995) lo explican como un flujo de escombros de menor magnitud, que pudo haberse originado por el Río Lagunilla, una ruta más corta que la del Río Azufrado para llegar a Armero, con pendiente inicial pronunciada. Por no existir evidencias

contendientes de la ocurrencia de este flujo menor, es más lógico explicar el volumen de agua del evento 1, como material desplazado del represamiento del Río Lagunilla, por la llegada del primer lahar a este lago, ya que precedió, por solo unos minutos, la sedimentación del primer flujo de escombros en Armero (PIERSON *et al.* 1990).

El evento 2 es cartografiado como Q1, siendo el evento más mortífero entre los que destruyeron Armero. Al menos dos pulsos de lahar fueron reportados a lo largo de los ríos Azufrado y Lagunilla, con base en cambios de niveles de sonido. En el valle del segundo, los picos estuvieron separados de 15 a 20 minutos, 7 a 9Km aguas abajo del cráter del Volcán Nevado del Ruiz. En el valle del Río Azufrado la separación solamente fue de 5 a 7 minutos, 30Km aguas abajo del cráter (PIERSON *et al.* 1990). El lahar del Río Azufrado, a pesar de haber seguido una ruta más larga que el originado en el Lagunilla (Figs. 1 y 2), fue el primero en llegar a Armero (PIERSON *et al. op cit*), y corresponde con Q1. El evento 2 se correlaciona con el frente de flujo de escombros de UJUETA & MOJICA (1995), el cual estableció al sedimentarse, una cubierta continua que destruyó la mayor parte del drenaje preexistente, y al menos taponó momentáneamente el drenaje principal, incluido el Río Lagunilla, sin respetar topografía alguna, y ejerciendo la enorme acción de empuje y barrido que destruyó Armero.

El evento 3 tiende a presentar colores más oscuros en la composición de falso color (Figs. 5 y 6), por ser más fluido. Se cartografía como Q2, y parece corresponder con el segundo pulso del lahar del Río Azufrado, donde alcanzó alturas hasta de 40m, mientras en el Lagunilla sólo llegó a 10m (MOJICA *et al.* 1985 a). Se correlaciona con la segunda fase de UJUETA & MOJICA (1995), correspondiente con una corriente de agua muy turbulenta cargada de guijarros y gravas, responsable de erodar la sedimentación lograda en el pulso anterior. Estos autores (*op cit*) afirman que dicha fase también se bifurcó en dos ramales principales.

Las series de pulsos más pequeños del evento 4, no son distinguibles en la composición de falso color seleccionada, razón por la cual también se cartografiaron como Q2. Parecen corresponder con el primer pulso del lahar del Río Lagunilla, que descendió con velocidades menores que el del Río Azufrado, no siendo el primero en llegar a la confluencia de estas dos corrientes, porque parece haber sido represado temporalmente por derrumbes en sus cursos más superiores (PIERSON *et al.* 1990).

El evento 5 presenta tonos más claros y es cartografiado como Q3. Es un depósito de color gris, mejor seleccionado, de arenas predominantes, con gravas y

lodos, que suprayace en discordancia erosiva los depósitos de color café (Q1 y Q2), en una banda estrecha a lo largo del eje del flujo principal. La posición estratigráfica de estos depósitos, al igual que sus diferencias en color y textura con los infrayacentes, sugieren que fueron depositados por el último pulso del lahar del Río Lagunillas (PIERSON *et al.* 1990). Se correlaciona con la tercera fase, de flujo de agua con relativa poca altura, planteada por UJUETA & MOJICA (1995).

VISTAS EN PERSPECTIVA

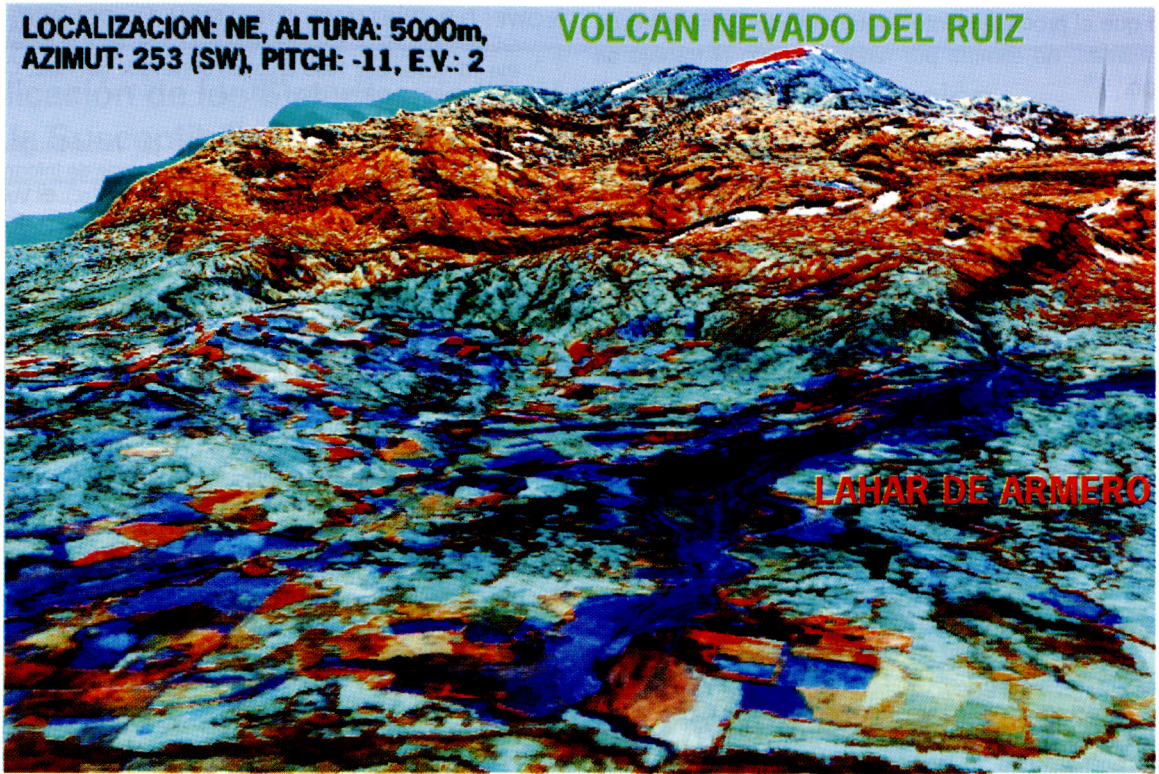
La responsabilidad para ordenar acciones de respuesta ante situaciones de riesgo volcánico, tales como restringir el acceso a ciertas áreas, ordenar la evacuación de otras, y establecer la duración de las mismas, generalmente son función de autoridades del gobierno local, funcionarios responsables por la atención y prevención de desastres, y personal de la Defensa Civil. Toda medida que se tome siempre implicará costos sociales y económicos enormes, acompañados de gran resistencia por parte de todos los miembros de la comunidad local.

La generación de vistas en perspectiva, es un muy buen método para enseñarle a la gente común, la magnitud de algunos desastres naturales. En el caso del flujo de escombros de Armero, la composición de falso color 4 en rojo, 5 en verde y 7 en azul, con eualización de histogramas, se combinó con un modelo de elevación del terreno de la NASA, de 920m de resolución espacial. La vista en perspectiva 1 (Fig. 7a) muestra lo que vería un observador localizado al este del área de estudio (Fig. 2), a 5000m de altura, observando en dirección suroeste, o sea con 253º de azimut, con su mirada dirigida 11º por debajo de la horizontal, sobre un relieve exagerado dos veces. La vista en perspectiva 2 (Fig. 7b) es diametralmente opuesta a la anterior; muestra lo que vería un observador ubicado en el oeste del área de estudio (Fig. 2), a 22000m de altura, mirando en dirección noreste-este (azimut de 75º), con su mirada dirigida 33º por debajo de la horizontal, sobre un relieve exagerado 1.5 veces.

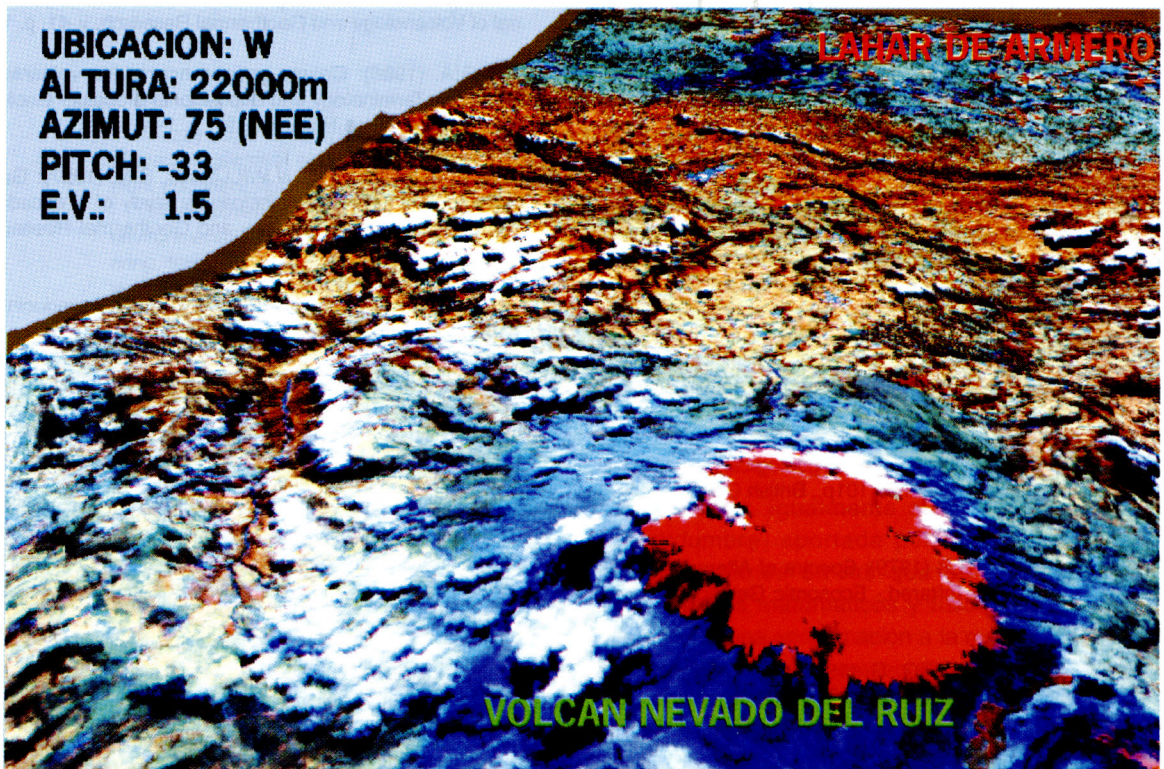
CONCLUSIONES

Las imágenes Landsat TM, a pesar de sus resoluciones espacial y temporal bajas, se constituyen en una herramienta de percepción remota muy útil, para el manejo de situaciones de amenaza geológica, generadas por la sedimentación de flujos de escombros de origen volcánico.

Para el manejo de estas situaciones, las imágenes Landsat TM al igual que las provenientes de cualquier otro sensor, deben usarse combinadas con datos del terreno,



a



b

Fig. 7. Vistas en perspectiva a y b.

dado que el procesamiento e interpretación detallados de las mismas, no elimina por ningún motivo el trabajo de campo.

Para el tiempo en que la erupción del Volcán Nevado del Ruiz desencadenó el lahar de Armero, el acceso a las imágenes del satélite Landsat TM 5, habría sido de gran ayuda en las labores de mitigación del desastre.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus más sinceros agradecimientos a INGEOMINAS, por haber facilitado los equipos para realizar el procesamiento digital de las imágenes, y por haber asumido los sobrecostos que demandó la impresión de las figuras en color. Igualmente desea agradecer al geólogo Domingo Mendivelso L., del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Sede Central) y a un revisor anónimo, por la corrección del artículo.

REFERENCIAS CITADAS

- ANONIMO (1986): Estadísticas sobre lo que fue Armero hasta la noche del 13 de noviembre.- En: Secretaría de Información y Prensa de la Presidencia de la República (Ed.): El Volcán y la Avalancha, 13 de Noviembre de 1985, p. 26-32. Presidencia de la República, Bogotá.
- DRURY, S.A. (1987): Image Interpretation in Geology.- 243 p., Allen & Unwin Ltd, Londres.
- DUARTE, J. (1986): En Julio de 1985 se instalaron equipos para "vigilar" constantemente el Ruiz.- En: Secretaría de Información y Prensa de la Presidencia de la República (Ed.): El Volcán y la Avalancha, 13 de Noviembre de 1985, p. 52-55. Presidencia de la República, Bogotá.
- FRYE, A. (1986): El suelo y los desastres naturales. Características de los depósitos del Nevado del Ruiz.- En: Palomino, G. (Ed.): Ecología de un desastre, p. 72-96, SENA, Regional Tolima. Ibagué.
- GARCÉS, G. & DE LA ZERDA, S. (1994): Gran Libro de los Parques Nacionales de Colombia.- 230p., Intermedio Editores, Bogotá.
- GREENBAUM, D. (1989): Introduction to geological remote sensing, Course notes for students.- 101p., British Geological Survey, Nottingham.
- HUNT, G.R. & ASHLEY, R.P. (1979): Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared.- Economic Geology, v. 74, p. 1613-1629.
- KOOPMANS, B.N. & FORERO, G. (1993): Airborne SAR and Landsat MSS as complementary information source for geological hazard mapping.- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 48, p. 28-37.
- LOWE, D.R., WILLIAMS, S.N., LEIGH, H., CONNOR, C.B., GEMMELT, J.B. & STOIBER, R.E. (1986): Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia.- Nature, v. 324, p. 51-53.
- MEDINA, P. (1986): Labores del Centro de Vulcanología para conocer mejor los fenómenos.- En: Secretaría de Información y Prensa de la Presidencia de la República (Ed.): El Volcán y la Avalancha, 13 de Noviembre de 1985, p. 139-142.- Presidencia de la República, Bogotá.
- MOJICA, J., COLMENARES, F., VILLARROEL, C., MACIA, C. & MORENO, M. (1985 a): Características del Flujo de Lodo ocurrido el 13 de noviembre de 1985 en el Valle de Armero (Tolima-Colombia). Historia y comentarios de los flujos de 1595 y 1845.- Geología Colombiana 14, p. 107-140. Bogotá.
- MOJICA, J., BRIEVA, J., VILLARROEL, C., COLMENARES, F. & MORENO, M. (1985 b): Observaciones preliminares sobre flujos de lodo cuaternarios relacionados con la actividad del Volcán Nevado del Ruiz en la Región de Armero-Guayabal-Mariquita (Departamento del Tolima, Colombia).- Geología Colombiana 14, p. 141-164. Bogotá.
- NARANJO, J.L., SIGURDSSON, H., CAREY, S.N. & FRITZ, W. (1986): Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars.- Science, v. 233, p. 961-963.
- PIERSON, T.C., JANDA, R.J., THOURET, J.C. & BORRERO, C.A. (1990): Perturbation and melting of snow and ice by the 13 november 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, glow and deposition of lahars.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 41, p. 17-66.
- SMITH, G.A. (1986): Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process.- Geological Society of America Bulletin, v. 97, p. 1-10.
- 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.
- TILLING, R.I. & LIPMAN, P.W. (1993): Lessons in reducing volcano risk.- Nature, v. 364, p. 277-280.
- UJUETA, G. & MOJICA, J. (1995): Fotointerpretación y observaciones del flujo de escombros de Noviembre 13 de 1985 en Armero (Tolima, Colombia).- Geología Colombiana 19, p. 5-25. Bogotá.
- WILLIAMS, S.N., STOIBER, R.E., GARCIA, N. LONDOÑO, A., GEMMELT, J.B., LOWE, D.R. & CONNOR, C.B. (1986): Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Gas Flux and Fluid Geochemistry.- Science, v. 233, p. 964-967.

Manuscrito recibido, Enero de 2001