



## Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México

Sergio R. Rodríguez<sup>1,2,\*</sup>, Ignacio Mora-González<sup>2</sup>, José Luis Murrieta-Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, México, D.F.

<sup>2</sup>Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Francisco J. Moreno 207 Col Zapata, 91080, Xalapa, Veracruz.

\*srre@servidor.unam.mx

### Resumen

Durante los días 2, 3 y 4 de junio de 2003, lluvias de gran intensidad en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, produjeron una serie de flujos de agua y sedimentos que descendieron el 5 de junio por varios cauces que se originan en zonas relativamente altas del Pico de Orizaba. El flujo de mayor magnitud se concentró en uno de los cauces que nace a una altura de 4,200 m s.n.m, el cual, a medida que desciende, recibe los nombres de barranca Infiernillo, barranca del Muerto y al llegar a la parte baja, río Chiquito.

Los daños provocados por el flujo de agua y detritos fueron cuantiosos, especialmente en las zonas bajas, en donde causó inundaciones en ciudades como Nogales y Mendoza. Sin embargo, la mayor afectación estuvo relacionada con la ruptura de un poliducto de hidrocarburos, cuyas consecuencias fueron catastróficas, especialmente en la población de Balastlera, en donde hubo pérdida de vidas humanas y varias personas resultaron seriamente lesionadas como resultado de la expansión del gas y su posterior ignición.

Los materiales que aportaron la mayor parte de los sedimentos mezclados con el agua, se derivaron de depósitos piroclásticos y epiclásticos ubicados en las zonas altas e intermedias de los flancos de los volcanes Pico de Orizaba y Sierra Negra. Estos depósitos constituyen una fuente potencial muy importante para la generación de flujos de detritos de naturaleza similar o incluso mayores al que ocurrió el 5 de junio.

Las características granulométricas de los depósitos dejados por el flujo varían en la medida en que se desciende topográficamente. Las fracciones más gruesas ( $> 0 \phi$ ) se encuentran en alturas comprendidas entre los 2,400 y 3,000 m s.n.m. Las fracciones finas ( $< 0 \phi$ ) se separaron y llegaron al valle en forma de flujos de baja concentración, los cuales depositaron sedimentos no cohesivos en las planicies de inundación ocupadas por zonas urbanas.

Se estima que un total de 500,000 personas habitan en el corredor urbano Orizaba-Nogales-Ciudad Mendoza. Además, es atravesado por una compleja infraestructura como ductos de conducción de hidrocarburos, líneas de alta tensión y vías de comunicación. Los estudios preventivos y obras de mitigación para eventos como el ocurrido el 5 de junio, ayudarán, sin duda alguna, a salvaguardar la seguridad de la población, así como de los bienes materiales de esta región.

Palabras clave: Flujos de baja concentración, volcán Pico de Orizaba, Citlaltépetl.

### Abstract

*During June 2 to 4 2003, heavy rainstorms struck the southern flanks of the Pico de Orizaba volcano. As a result of this extreme climatic event, on June 5 water and sediment stream flows descended along the several rivers beds that constitute the hydrologic network of the southern flank of the volcano. The largest stream flow was channeled in one of the rivers beds which begin at an altitude of 4,200 m a.s.l. In the highest zones this riverbed or gully is called "barranca Infiernillo", in the middle "barranca del Muerto" and in the lowest zones over the valley is called Chiquito river.*

The damages caused by the stream flow were of high consequences, specially at the low lands, where floods covered partially the cities of Nogales and Mendoza. However, the major damages were associated with the rupture of a gas pipe line due to the impact of the water. This led to a catastrophic scenario in the village of Balastrera, where human lives were lost and several persons resulted with severe injuries, as a consequence of the gas expansion and later ignition.

The source of the debris and sediments incorporated in the stream flows is located in the high lands over the 3,000 m a.s.l., with contribution from the pyroclastic and epiclastic deposits related with the volcanic activity of the Pico de Orizaba and Sierra Negra volcanoes. These deposits constitute an important source for the potential generation of debris flows and lahars.

The sedimentology and grain size characteristics of the deposits produced by the stream flow of June 5 change along the course of the river. The coarser fractions ( $> 0 \phi$ ) were concentrated between the 2,400 and 3,000 m a.s.l., the finer ones ( $< 0 \phi$ ) were transported by the stream flow producing non cohesive deposits over the food plains on the urban zones.

An estimated population of 500,000 is living on the Orizaba-Nogales-Ciudad Mendoza area, which is also occupied by a complex infrastructure consisting of oil and gas pipe lines, high voltage electricity lines, highways and railroad. These reasons point out to the importance of making hazards and risk studies in order to mitigate the consequences of future debris flows.

*Key words:* Normal streamflows, Pico de Orizaba volcano, Citlaltépetl.

## 1. Introducción

El Pico de Orizaba o Citlaltépetl (5,675 m s.n.m) es el volcán activo más alto de Norteamérica y debido a su altura, su cima permanece cubierta de nieve a lo largo de todo el año (Figura 1). Tiene una forma cónica bien definida y se ubica, junto con el extinto volcán Sierra Negra, en el extremo sur de una cordillera volcánica alineada en dirección NNE-SSW, formada por el Cofre de Perote (4300 m s.n.m), al norte y los complejos de La Gloria (3500 m s.n.m) y Las Cumbres (3800 m s.n.m) en la parte central. Estos estratovolcanes cuaternarios se encuentran rodeados por una gran cantidad de aparatos volcánicos más recientes tales como conos de escoria, cráteres de explosión (maares), domos riolíticos y una caldera (Los Humeros). Todo este vulcanismo descansa sobre un basamento de rocas calcáreas del Mesozoico intensamente plegadas y falladas. El conjunto de estas estructuras, constituye uno de los rasgos morfológicos más espectaculares del sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana. Esto es importante si se considera que dentro de esta provincia volcánica se ubica la mayoría de los volcanes activos del país, los cuales son el resultado de la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa de Norte América (Figura 2).

Desde un punto de vista fisiográfico, la cordillera volcánica Cofre de Perote-Pico de Orizaba conforma una importante barrera orográfica que separa al Altiplano Central de la Planicie Costera del Golfo (Figura 2). Este pronunciado relieve con más de un kilómetro de desnivel, permite el arribo de corrientes de humedad provenientes del Golfo de México que precipitan en el sector oriental y suroriental de dicha cordillera, ocasionando importantes escurrimientos hidrológicos.

Durante la temporada de lluvias, entre los meses de junio a octubre, es común que ocurran precipitaciones cuya intensidad es capaz de generar avenidas extraordinarias de agua y detritos. Este artículo tiene como finalidad describir los orígenes y alcances del fenómeno hidrometeorológico

ocurrido el 5 de junio de 2003 en el flanco sur del Pico de Orizaba, el cual provocó un flujo de agua con baja concentración de sedimentos que descendió a lo largo de los ríos Chiquito y Carbonera (Figura 3). Se incluyen datos de granulometría de muestras tomadas tanto en zonas altas como bajas, características de los depósitos que aportaron sedimentos y datos acerca del entorno hidrológico y geológico del flanco sur del Pico de Orizaba. Finalmente, se dan algunas recomendaciones para la realización de acciones preventivas que ayuden a minimizar los daños provocados por este tipo de fenómenos hidrológicos extremos.

En el corredor urbano Orizaba- Nogales-Cd. Mendoza (Figura 3) se estima una población aproximada de 500,000 habitantes. Además se localiza una gran cantidad de industrias de diversos ramos de la producción y es atravesado por una costosa infraestructura instalada en la planicie de inundación de la subcuenca del río Chiquito (Figura 4). Estas características socioeconómicas hacen obligatorio que se tomen medidas preventivas para evitar catástrofes como la que aquí se describe.



Figura 1. Vista del flanco suroriental del volcán Pico de Orizaba (5,675 m s.n.m.) con su cumbre nevada.

Tanto la subcuenca del río Chiquito, como la del río Carbonera, pertenecen a la cuenca del río Blanco que drena sus aguas hacia el Golfo de México. En sus partes altas e intermedias, ambas subcuencas presentan pendientes máximas aproximadas de 5–20° y pendientes medias de 2–5°.

El río Chiquito (Figura 3) es una subcuenca moderadamente ramificada (orden 3–4) que nace en el flanco sur del Citlaltépetl a una altura de 3700 m s.n.m. Desde su nacimiento en las zonas altas tiene una dirección de flujo de norte a sur, pero al llegar al valle formado entre La Balastreira y Cd. Mendoza adquiere una dirección de oeste a este. Antes de llegar al valle recibe los nombres de Barranca del Muerto en la zona intermedia-alta (4,000 a 2,500 m s.n.m.) y Barranca El Infiernillo en la parte intermedia (aproximadamente entre 2,500 y 2,000 m s.n.m.) de la subcuenca (INEGI, 1985). Presenta dos patrones principales de drenaje, uno de tipo paralelo que ocurre en alturas de intermedias a altas, en donde predominan los materiales

piroclásticos y derrames de lava, y otro perpendicular, que ocurre en los tributarios que bajan de los cerros formados por calizas cretácicas en la zona intermedia. El ancho promedio del cauce efectivo varía entre 10 y 15 m en la zona intermedia-alta, 20 y 25 m en la zona intermedia, y 10 a 15 m en la zona baja. Los valles de inundación en las zonas bajas pueden abarcar varios cientos de metros.

El río Carbonera (Figura 3) es una subcuenca escasamente ramificada (orden 2), nace a 3,550 m s.n.m., sigue un curso predominante de noroeste a sureste hasta que se junta con las subcuencas de los ríos Chiquito y Maltrata para formar el río Blanco (Figura 3), el cual corre en una dirección predominante de oeste a este. En sus zonas intermedias y altas recibe los nombres de Barranca Chicles y Barranca Paso Seco, respectivamente (INEGI, 1985). Al igual que el río Chiquito, presenta un patrón de drenaje paralelo en la zona intermedia - alta con predominio de depósitos volcánicos, y otro perpendicular en los arroyos

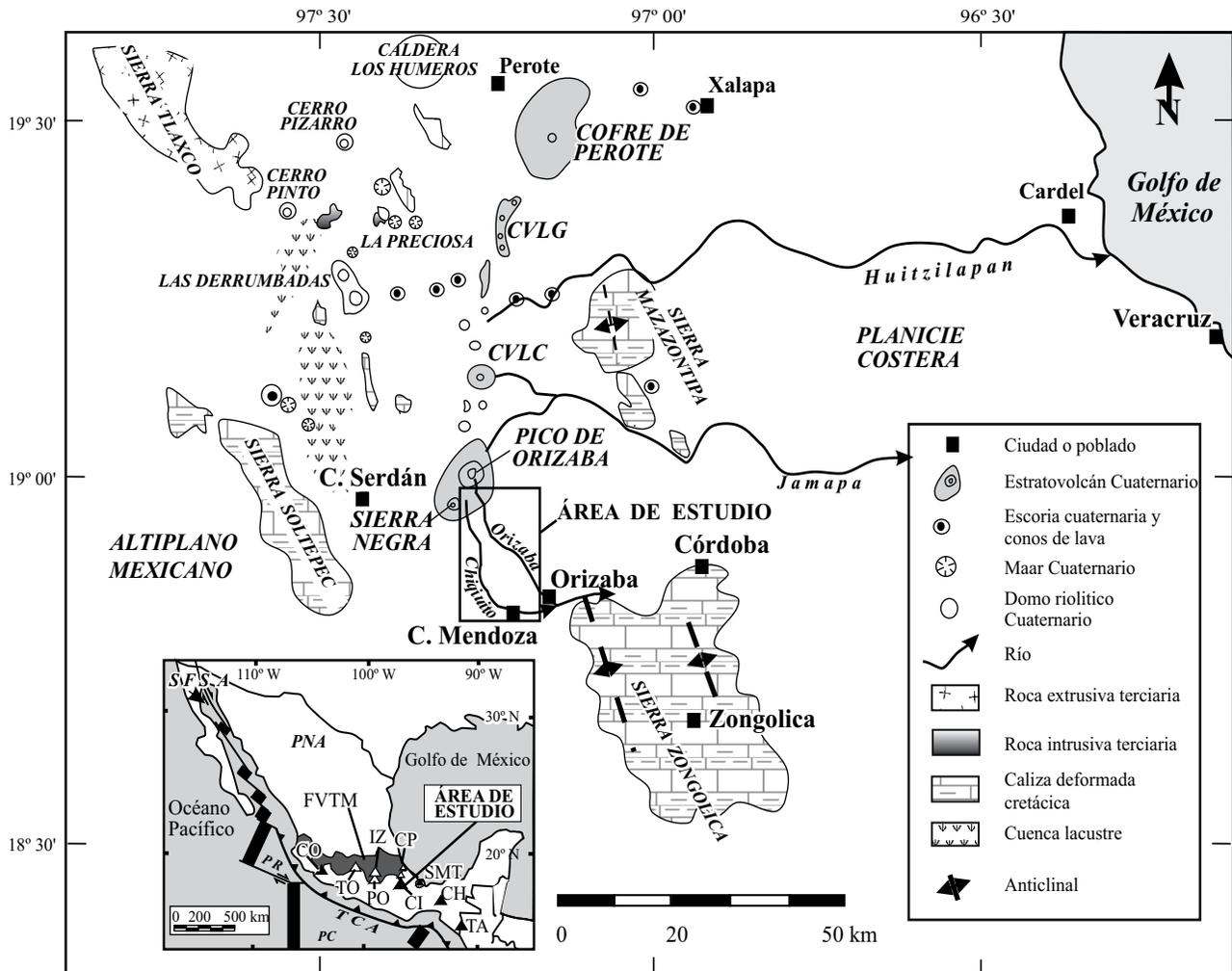


Figura 2. Mapa de localización y geología regional del área de estudio. En el recuadro se muestra un marco tectónico de la República Mexicana. SFSA: Sistema de fallas de San Andrés, PNA: Placa de Norte América, PR: Placa Rivera, PC: Placa de Cocos, TCA: Trincheras de Centro América, FVTM: Faja Volcánica Trans-Mexicana, CO: Colima, TO: Nevado de Toluca, IZ: Iztaccihuatl, PO: Popocatepetl, CP: Cofre de Perote, CI: Citlaltépetl o Pico de Orizaba, SMT: San Martín Tuxtla, CH: Chichón, TA: Tacaná, CVLG: Complejo Volcánico de La Gloria, CVLC: Complejo Volcánico de Las Cumbres.

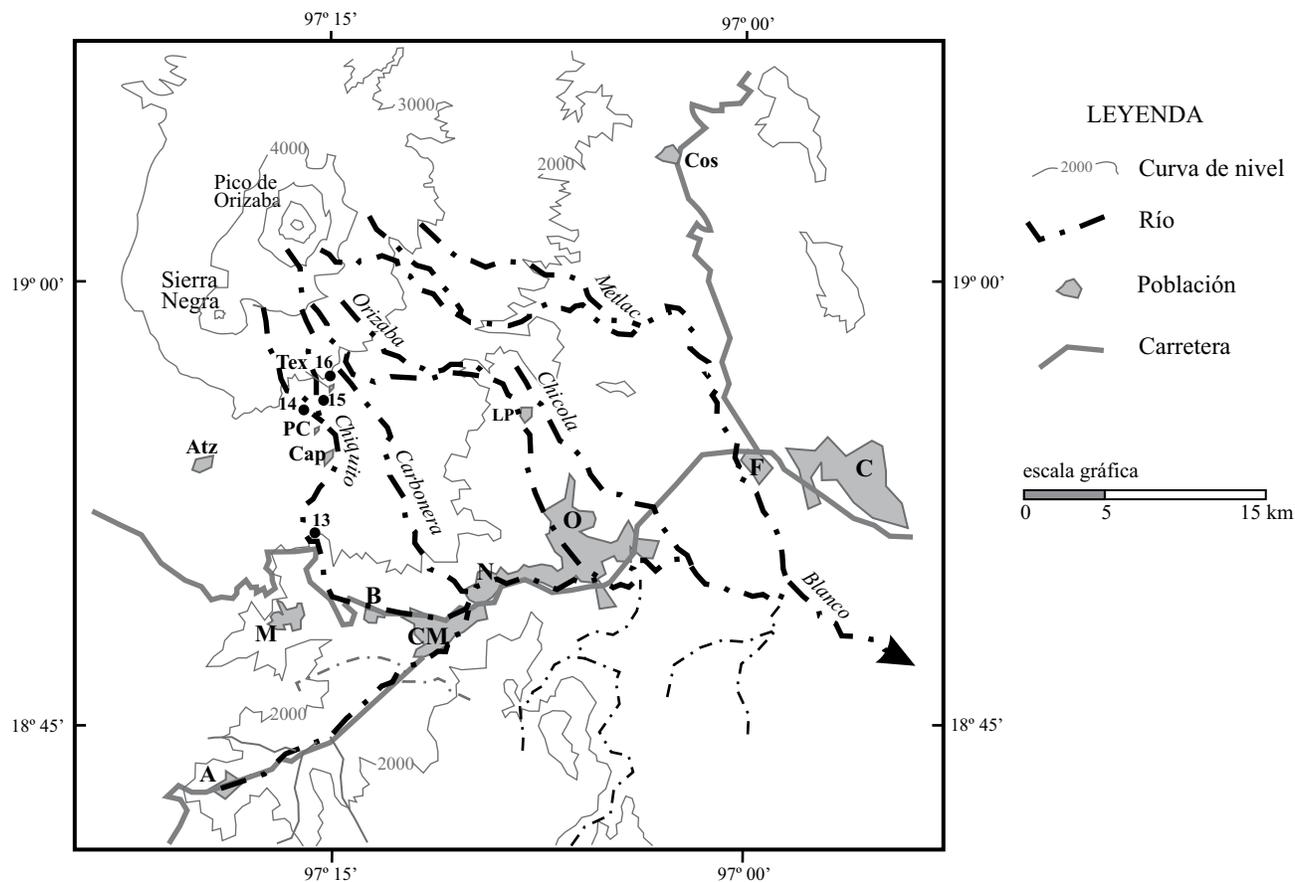


Figura 3. Cuenca del río Blanco y sus principales afluentes sobre el flanco sur del Pico de Orizaba. Los puntos numerados indican sitios de levantamiento de campo y colecta de muestras. C: Córdoba, F: Fortín, O: Orizaba, LP: La Perla, N: Nogales, CM: Ciudad Mendoza, B: Balastlera, M: Maltrata, A: Acultzingo, Atz: Atzitzintla, PC: Paso Carretas, Tex: Texmalaquilla, Cap: Capulín, Cos: Coscomatepec.

que bajan de las rocas calcáreas. El ancho promedio efectivo varía entre 10 y 20 m en la zona intermedia – alta, a 5 y 10 m en la zona baja con planicies de inundación de varios cientos de metros.

## 2. Estudios previos y antecedentes

Desde un punto de vista vulcanológico y geológico, el Pico de Orizaba ha sido objeto de múltiples y variados estudios, entre los que se puede mencionar los realizados por Robin *et al.* (1983); Höskuldsson y Robin (1993); Siebe *et al.* (1993); Carrasco-Núñez *et al.* (1993); Carrasco-Núñez (2000). Además existe un mapa de peligros volcánicos (Sheridan *et al.*, 2002), en el que la zona afectada por el evento del 5 de junio figura dentro de las áreas susceptibles de ser alcanzadas por lahares y flujos piroclásticos. Sin embargo, no todo el peligro que presenta el Citlaltépetl se deriva de potenciales eventos eruptivos; las precipitaciones pluviales extraordinarias producidas por fenómenos climáticos extremos, o los sismos cuyos epicentros se localicen en zonas próximas al volcán, pueden generar lahares, flujos de escombros y flujos hiperconcentrados que descienden

por las barrancas con un alto poder destructivo. El área potencialmente afectable por fenómenos de esta naturaleza es muy grande; Hubbard *et al.* (2007) presentan una zonificación de la distribución de lahares generados en el Pico de Orizaba y zonas adyacentes usando modelos digitales.

La tarde del jueves 5 de junio de 2003, después de varios días de intensas lluvias, se produjo un flujo de agua cargado con sedimentos que bajó por dos cauces que durante la mayor parte del año se mantienen secos o con niveles muy bajos de agua: el del río Chiquito y el del río Carbonera ubicados en el flanco sur del Pico de Orizaba (Figura 3). Sobre el río Chiquito, el flujo rompió dos ductos de hidrocarburos, provocando una explosión que afectó a la comunidad de Balastlera (Figura 3). Los lugareños usan el nombre de “barrancada” para referirse a este tipo de fenómenos con gran capacidad destructiva, los cuales de acuerdo a la clasificación existente en la literatura se consideran como flujos de baja concentración de sedimentos o “flujos de corriente normal” (Pierson y Costa, 1987) y por lo regular presentan períodos de recurrencia relativamente cortos.

Algunos informes técnicos inéditos fueron elaborados por la Universidad Veracruzana y el Instituto de Geología

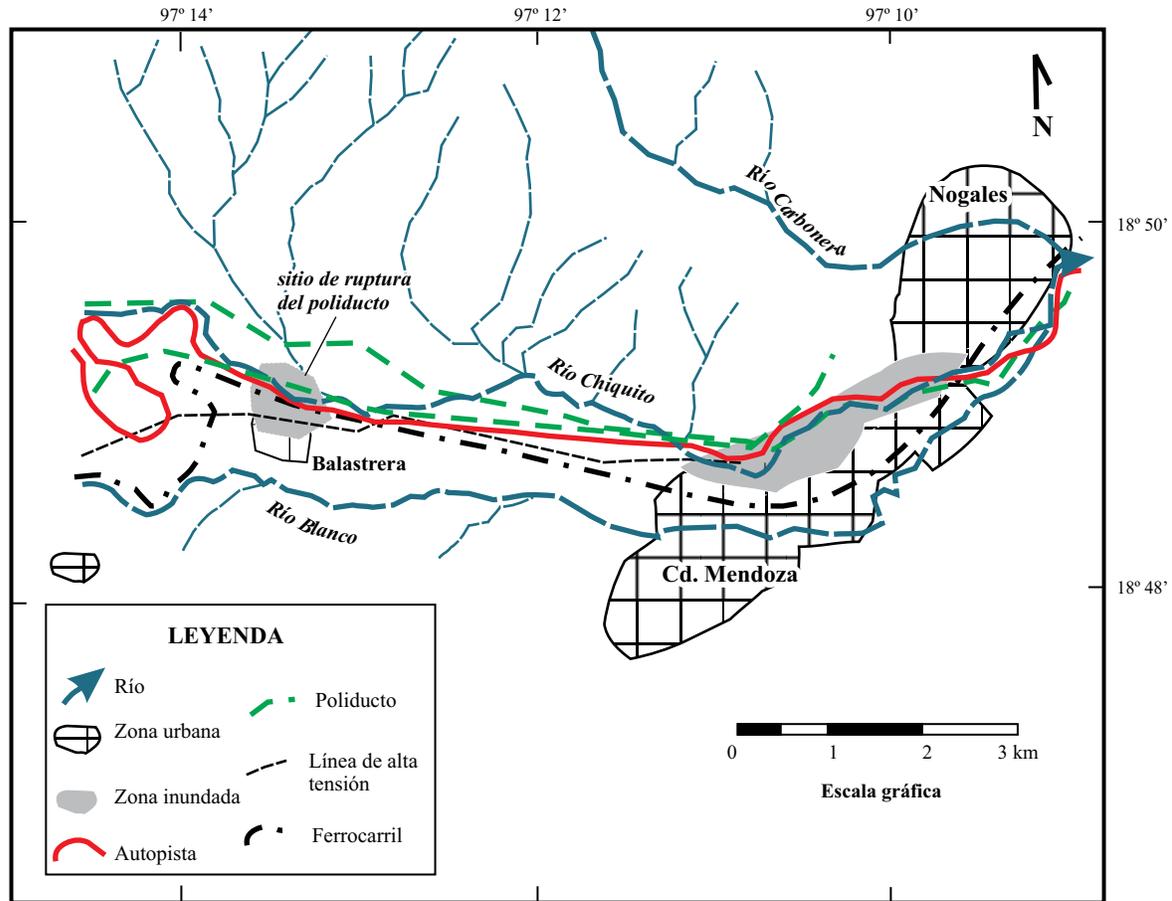


Figura 4. Zona urbana Nogales-Cd. Mendoza- Balustrera con sus principales instalaciones de infraestructura y su relación con la red de drenaje del flanco sur del Pico de Orizaba.

de la UNAM (Rodríguez *et al.*, 2003), CENAPRED (Salas-Salinas *et al.*, 2003) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (de Luna-Cruz, 2003).

Depósitos encontrados durante los trabajos de campo, revelan la ocurrencia en el pasado de eventos laháricos de grandes proporciones. Además, a lo largo de los flancos orientales de la cordillera Pico de Orizaba-Cofre de Perote han ocurrido flujos de detritos de gran magnitud en tiempos más recientes. Tal es el caso del que sucedió en el año de 1920, cuyo evento disparador fue un sismo registrado el 3 de enero de ese año ( $M_s = 6.5$ ) (Singh *et al.*, 1984). Los flujos de escombros producidos descendieron a lo largo de la barranca Huitzilapan (Figura 2) y sus consecuencias fueron catastróficas para la mayoría de las poblaciones localizadas sobre su cauce (Comisiones del Instituto Geológico de México, 1922; Siebe *et al.*, 1993; Scott *et al.*, 2001; Hubbard *et al.*, 2007).

### 3. Geología

La región de Orizaba se encuentra en una zona de confluencia entre dos provincias geológicas del país, la

Sierra Madre Oriental (SMO) y la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). Las rocas pertenecientes a la SMO son calizas y lutitas estratificadas del Cretácico Medio y Superior (INEGI, 1994) que constituyen grandes barreras topográficas con alturas máximas que varían entre 3,000 y 1,500 m s.n.m. Estratigráficamente estas rocas conforman el basamento pre-volcánico de la zona. Se encuentran intensamente plegadas y falladas, formando un complejo patrón de anticlinales, sinclinales, fallas normales e inversas, cuyos ejes y planos están orientados en dirección NW-SE. También se puede observar un patrón de fracturamiento perpendicular (NE-SW) que condiciona la red de drenaje en las calizas (INEGI, 1994) (Figura 5).

Las rocas y materiales de origen volcánico son depósitos piroclásticos y lavas emitidos por los volcanes Pico de Orizaba y Sierra Negra, así como por algunos conos de escoria. En las zonas intermedias y altas hay un predominio de depósitos piroclásticos de flujo y de caída, los cuales están asociados con erupciones de tipo explosivo ocurridas en el pasado en ambos volcanes.

Los depósitos de lahar son abundantes y están asociados a erupciones volcánicas y lluvias torrenciales. En algunos sitios cubren discordantemente a las rocas cretácicas y se

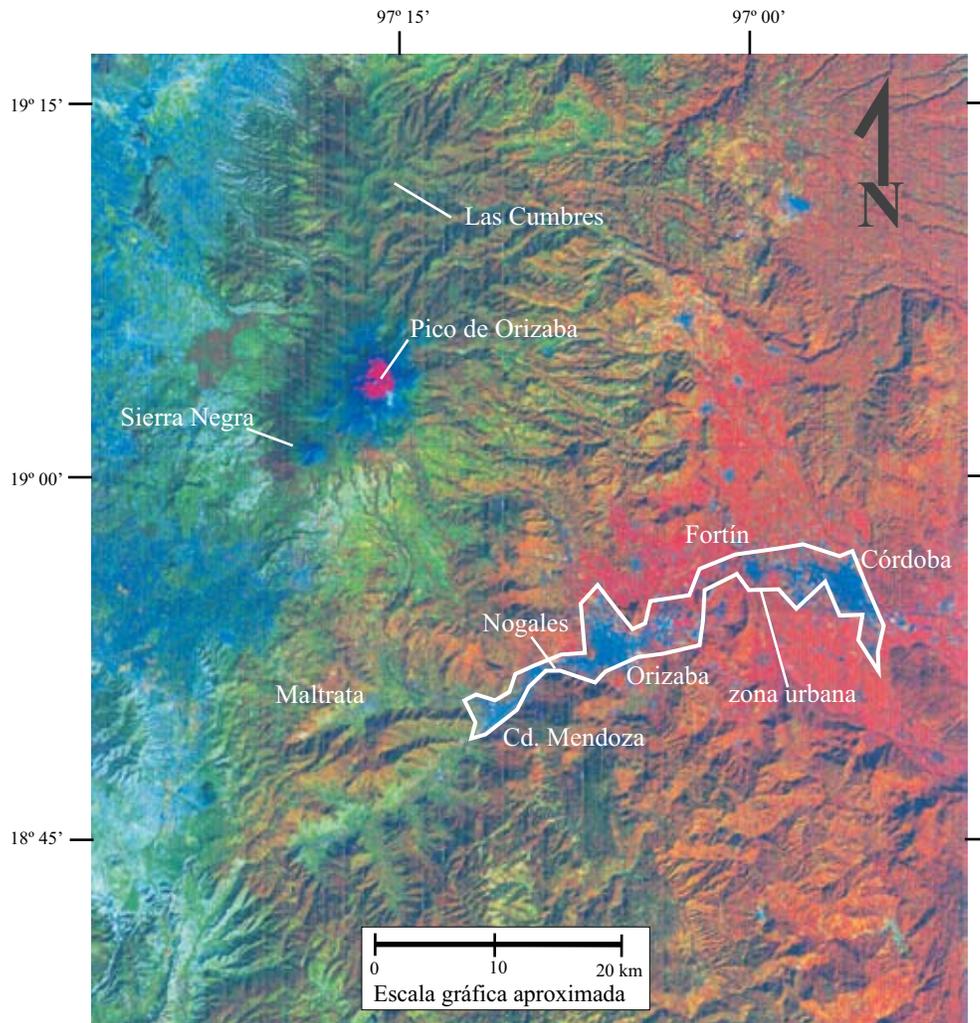


Figura 5. Imagen Landsat en falso color de la región del Pico de Orizaba. Los colores en tonos verde y violáceo son predominantemente rocas volcánicas y aluvión del Cuaternario; los colores en tonos naranja y rojizo son rocas calcáreas del Mesozoico.

encuentran principalmente a lo largo de las barrancas.

Las diferencias estructurales, texturales y de resistencia que existen entre las calizas, los depósitos piroclásticos y las lavas, son factores determinantes que condicionan el curso de los cauces de agua, así como la cantidad y características del material que es transportado hacia las zonas más bajas.

Aproximadamente entre las cotas 4,500 y 2,500 m s.n.m. hay abundancia de material volcánico sobre las barrancas. Se trata de depósitos piroclásticos y epiclásticos no consolidados, con una granulometría que varía entre bloques de varios metros de diámetro (movidos por rodamiento) hasta gravas, arenas, limos y arcillas que son transportados por arrastre, suspensión y disolución. En esta zona se localizan las principales fuentes de aporte de material que es arrastrado por las corrientes de agua (Figuras 6 y 7).

La Figura 8 muestra un mapa geológico simplificado de la zona en donde se incluyen las principales unidades

litológicas que intervienen en el aporte de sedimentos y control dinámico de los flujos. Se identificaron cuatro grupos: Sierra Negra (SN), Pico de Orizaba (PO), Rocas Carbonatadas (RC) y Planicies de Inundación (PI).

Los grupos SN y PO están constituidos por derrames de lava masivos y depósitos piroclásticos de flujo y caída. Concentran el mayor volumen de material susceptible de ser removido y presentan una amplia variación granulométrica (con predominio de la parte media y fina). Poseen una alta energía potencial debido a la altura sobre el nivel del mar en la que se encuentran, la pendiente media del terreno, y la escasa o nula consolidación del material.

Las Rocas Carbonatadas (RC), tienen una estructura masiva y sólida y están intensamente fracturadas. El aporte de sedimentos se concentra mayoritariamente en la fracción de material de arrastre (grava y bloques). Pero la función más crítica de estas rocas, se resume en que los grandes cerros de calizas estrechan y encanalan el cauce de los ríos en su parte media-baja. Esto genera cuellos de

botella que forma sitios de incremento de velocidad de los flujos antes de su salida a las planicies de inundación y valles aluviales.

Planicies de Inundación (PI). En esta unidad se agrupan los depósitos aluviales y los depósitos dejados por flujos hiperconcentrados cuya fracción granulométrica se concentra en las arenas, limos y arcillas. Se trata de material proveniente de los depósitos piroclásticos de SN y PO y en menor cantidad de RC. Es en esta zona en donde se encuentran los principales asentamientos urbanos.

#### 4. Evento disparador del flujo del 5 de junio

El evento disparador fue un aguacero de intensidad extraordinaria ocurrido hacia el mediodía o tarde del jueves 5 de junio de 2003, aunque la lluvia había empezado desde uno o dos días antes. La respuesta en forma de flujos de baja concentración de lodo y detritos llegó a la zona del valle alrededor de las 6 de la tarde del mismo día.

Al momento de la ocurrencia del evento no se contaba con estaciones climatológicas en las zonas altas e intermedias. La Comisión Nacional del Agua en declaraciones emitidas a la prensa, estimó una precipitación de 260 mm para ese día, lo que ocasionó gastos del orden de 350 m<sup>3</sup>/s (El Mundo de Orizaba, 11 de junio de 2003).

Los pocos registros históricos de precipitación máxima diaria se obtuvieron de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional. Las estaciones consultadas fueron: Coscomatepec, Fortín de Las Flores, Huatusco (al norte de Coscomatepec, fuera del área del mapa), Orizaba y Maltrata (Figura 3).

Al seleccionar las precipitaciones máximas para un período de 24 horas entre los años 1982 y 2002 y promediarlas entre sí, se obtiene una intensidad máxima media de 150 mm/día.

De acuerdo con las características geológicas de las subcuencas, los valores de intensidad de lluvia son más significativos que los de lluvia acumulada, ya que los primeros determinan la capacidad erosiva y de transporte del agua.

Si bien la cifra promediada de 150 mm/día es importante, solo es representativa de las partes bajas (valles aluviales y planicies de inundación). Una cantidad similar de agua en sitios como Atzitzintla, Texmalaquilla, Paso Carretas o El Capulín, localizados en zonas más elevadas dentro de la subcuenca del río Chiquito (Figura 3), sería un valor mínimo capaz de producir flujos de baja concentración de lodo y detritos como el ocurrido el 5 de junio de 2003. Por lo tanto, es posible que con intensidades de precipitación del orden de 50 o 100 mm/hr se generen flujos de lodo con capacidad destructiva considerable. Esto debe de ser tomado en consideración para establecer valores mínimos de alertamiento.

En el informe técnico reportado por CENAPRED (Salas-Salinas *et al.*, 2003) Se plantean dos posibilidades

para explicar la magnitud del flujo, una es por la intensa precipitación ocurrida y la otra la formación de una represa que pudo haber fallado. Durante las observaciones de campo no se encontraron evidencias de la formación de una represa a lo largo del cauce del río Chiquito, por consiguiente, la generación del flujo se explica con una lluvia estacionaria de gran intensidad producida por un fenómeno climatológico extremo. En zonas tropicales, un ejemplo de fenómenos de esta naturaleza es el que ocurrió en el volcán Casitas en Nicaragua el 30 de octubre de 1998 (Scott, 2000; Sheridan *et al.*, 1998), el cual estuvo relacionado con el huracán Mitch.

#### 5. Zona de aporte de sedimentos

El río Chiquito nace a una altura de aproximadamente 4,100 m s.n.m. Su cauce es resultado de la erosión de depósitos piroclásticos, lavas y en menor medida calizas. En la parte más alta (entre los 4,100 y 2,400 m s.n.m) es conocido como Barranca del Muerto y en la intermedia (entre



Figura 6. Afloramiento de depósitos piroclásticos en las zonas alta e intermedia de la zona de estudio. Altura aproximada 2,650 m s.n.m. Como escala la camioneta mide 3 m de largo.



Figura 7. Lecho del río Chiquito en la zona intermedia (altura ≈ 1900 m s.n.m.) El bloque a un costado de la persona fue movido por arrastre (altura de la persona ≈ 1.80 m).

los 2,400 y 1,700 m s.n.m), como Barranca Infiernillo. En estas zonas hay un predominio de materiales piroclásticos y epiclásticos tales como depósitos de flujo de ceniza, caída de pómez, depósitos de surgencia, lahares, conglomerados y suelos residuales, los cuales presentan diferentes características de consolidación (Figura 6). Generalmente estos depósitos descansan sobre derrames de lava masiva o calizas. Los valles son generalmente estrechos (ente 30 y 50 m de ancho) y sus paredes son casi verticales con alturas variables entre 10 y 20 m.

En la Figura 9 se muestran cuatro secciones esquemáticas levantadas en los puntos 13, 14, 15 y 16 entre las cotas 1920 y 2,890 m s.n.m., las cuales son representativas de las zonas altas e intermedias del cauce. La ubicación de estos cuatro puntos puede verse en la Figura 3.

En estos afloramientos se observan depósitos piroclásticos de flujo y de caída escasamente consolidados, así como depósitos de lahar y conglomerados fluviales, estos últimos, son el testimonio de eventos de flujo de detritos ocurridos en el pasado reciente, cuya magnitud fue mayor al que aquí se describe. Tanto los depósitos de lahar como los de conglomerado rellenaron los antiguos cauces y hoy afloran sobre las paredes de las barrancas con espesores que varían entre 1 y 3 m. El aporte de material de estos depósitos a los flujos de baja concentración está relacionado con la fuerza erosiva de la corriente, ya que se encuentran regularmente consolidados y ligeramente cementados por fluidos ricos en carbonato de calcio proveniente de las calizas. Probablemente la fracción más fina (limo y arcilla) contenida en los flujos de baja concentración, provenga de la matriz de los depósitos de lahar.

Los depósitos piroclásticos están formados por pómez de caída, flujos de ceniza y depósitos de surgencia no consolidados. Sus espesores varían entre 1 y 2 m con un grado de selección de buena a regular. Por ser más fácilmente erosionables, son los materiales que aportan la mayor cantidad de sedimentos concentrados entre las fracciones -3 y 4 phi.

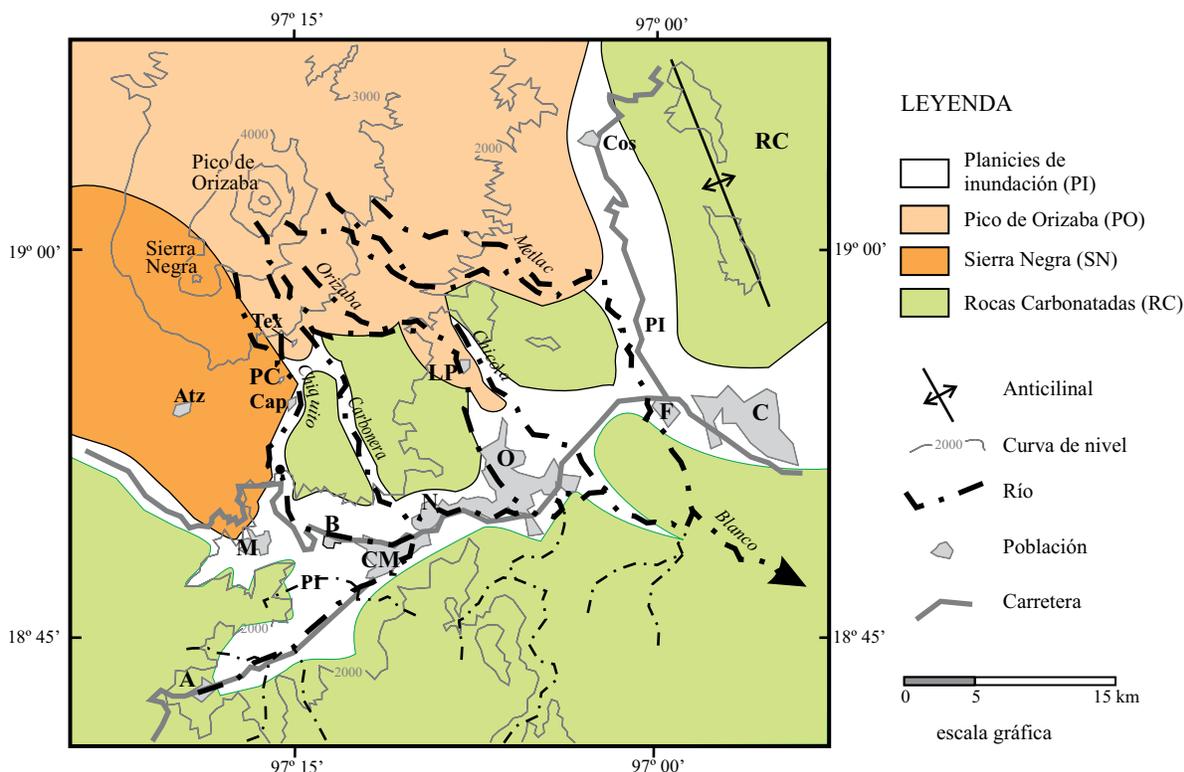


Figura 8. Mapa geológico simplificado de la región de Orizaba. Las abreviaciones de los poblados son las mismas que en la Figura 3.

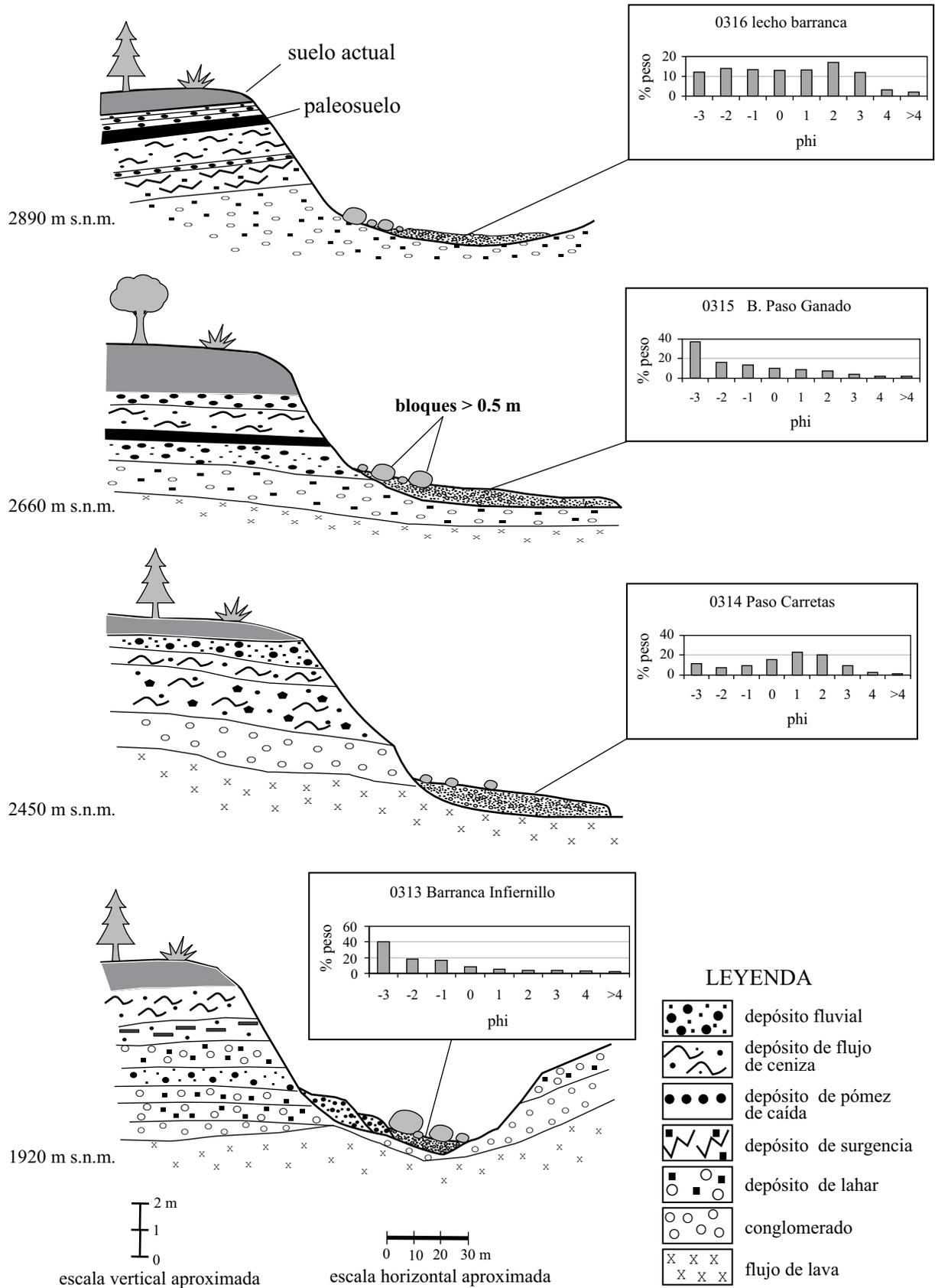


Figura 9. Secciones esquemáticas con la litología y estratigrafía de algunos puntos representativos de las zonas intermedias y altas. Los recuadros muestran los histogramas de análisis granulométricos realizados en muestras del depósito dejado por el flujo del 5 de junio de 2003.

Los daños causados por la corriente en estas zonas no fueron de consideración y solo se limitaron al corte de caminos y la destrucción de algunos puentes.

### 5.1 Granulometría

En la zona alta del cauce, el agua arrastró material cuyas características granulométricas varían desde limos y arcillas hasta arena gruesa, grava y bloques redondeados a semiredondeados. En algunas partes la fuerza de la corriente fue capaz de arrastrar bloques de hasta 2 m de diámetro (Figura 7). Los depósitos dejados por la corriente tienen espesores variables entre 1 y 2 m, están formados por un material granular empobrecido en finos que rellena de manera irregular el cauce (Figura 9). Tienen a presentar una gradación inversa con bloques en la cima, y son de regular a mal seleccionados.

Se realizaron análisis granulométricos en cuatro muestras representativas (0313, 0314, 0315 y 0316) de la zona alta del cauce (Figuras 3 y 9). La Tabla 1 muestra los datos granulométricos realizados mediante análisis sedimentológicos con tamices. Los diámetros de las partículas analizadas están entre  $-3$  y  $4 \phi$  y sus histogramas se muestran en la Figura 9. Las fracciones más gruesas a  $-3 \phi$  (bloques, grava y arena gruesa) se estimaron visualmente en el afloramiento con un porcentaje mayor al 60 %.

El histograma representativo de las zonas más elevadas tiene un comportamiento polimodal que se refleja en una mala selección del material (muestra 0316). A medida que se desciende, el material tiende a concentrarse en las fracciones gruesas debido al arrastre de los finos (muestra 0315). Posteriormente hay un nuevo enriquecimiento de finos (muestra 0314), lo cual puede interpretarse como la existencia de otra fuente de aporte cercana, el comportamiento del histograma respectivo tiende a ser nuevamente polimodal con una mala selección. Finalmente hay un nuevo predominio de la fracción gruesa debido al arrastre de los finos (muestra 0313).

## 6. Zona de inundación

La parte baja de la subcuenca del río Chiquito (1500 a 1300 m s.n.m) forma un valle amplio y extenso dentro del cual se encuentran importantes asentamientos urbanos tales como La Balastrea, Cd. Mendoza y Nogales. Además, es atravesado por una compleja infraestructura que incluye vías de comunicación, poliductos de hidrocarburos y líneas de electricidad de alta tensión (Figura 4). En esta zona, el flujo se salió de su cauce en varios sitios, provocando inundaciones y una gran cantidad de daños.

El sitio de mayor impacto fue en La Balastrea, ahí el cauce cambia su dirección de NW-SE a W-E, este súbito cambio provocó que el flujo se desbordara, invadiendo la autopista e inundando parcialmente la zona habitada. Pero el daño más grave fue la ruptura de un poliducto de gas que corre sobre el cauce del río. Al escapar el fluido y encontrar una fuente de ignición, se provocó un flamazo que calcinó cientos de metros a la redonda (Figuras 4 y 10). En La Balastrea hubo pérdida de vidas humanas por quemaduras, además de daños materiales cuantiosos. El nivel máximo de agua promedio en la parte habitada de esta zona fue de 0.80 m.

El flujo siguió hacia Cd. Mendoza, en donde la zona afectada fue la parte NE de la ciudad, más próxima al cauce del río Chiquito.

En esta área se ahogó una persona y las pérdidas materiales fueron totales en las viviendas localizadas a un lado del cauce, y parciales en aquellas asentadas en la planicie de inundación. En los lugares más próximos al cauce, como es el caso del jardín de niños Gabriela Mistral, la altura del flujo de lodo alcanzó 2 m (Figura 11). En el resto de la zona inundada, que abarca hasta la avenida Ferrocarril Mexicano, las alturas varían desde pocos centímetros hasta 1.5 m máximo. La Tabla 2 muestra las alturas de agua medidas en sitios seleccionados, cuya ubicación se muestra en la Figura 12.

En Nogales la zona más afectada fue el sur de la ciudad. En ese lugar el río Chiquito cruza nuevamente la autopista

Tabla 1. Análisis granulométricos de muestras colectadas sobre el lecho del río Chiquito y zonas de inundación. El parámetro  $\phi$  equivale al logaritmo negativo base 2 del diámetro de la partícula en mm. La ubicación de las muestras puede verse en las figuras 3 y 12.

Muestra	0301	0304	0311	0312	0313	0314	0315	0316
Ubicación	Calle La Raya	Jardin de niños	Balastrea	Granja de pollos	B. Infiernillo	Paso Carretas	B. Paso Ganado	Lecho barranca
$\phi$				% e n p e s o				
-3	1.64	4.54	1.24	0.96	40.12	11.62	37.30	12.15
-2	3.15	1.53	2.60	3.20	18.47	7.27	16.00	14.00
-1	2.78	5.50	8.89	10.71	16.30	9.12	13.08	13.40
0	7.15	13.57	21.40	20.27	8.26	15.72	10.00	13.00
1	19.13	20.01	18.77	20.55	4.80	23.12	8.56	13.20
2	26.18	23.02	16.98	22.17	3.85	20.32	7.31	17.00
3	26.10	23.25	13.76	14.57	3.55	9.17	4.20	12.00
4	13.15	5.61	12.76	5.00	2.43	2.52	2.00	3.20
>4	0.72	3.02	3.56	2.57	2.22	1.14	2.00	2.05

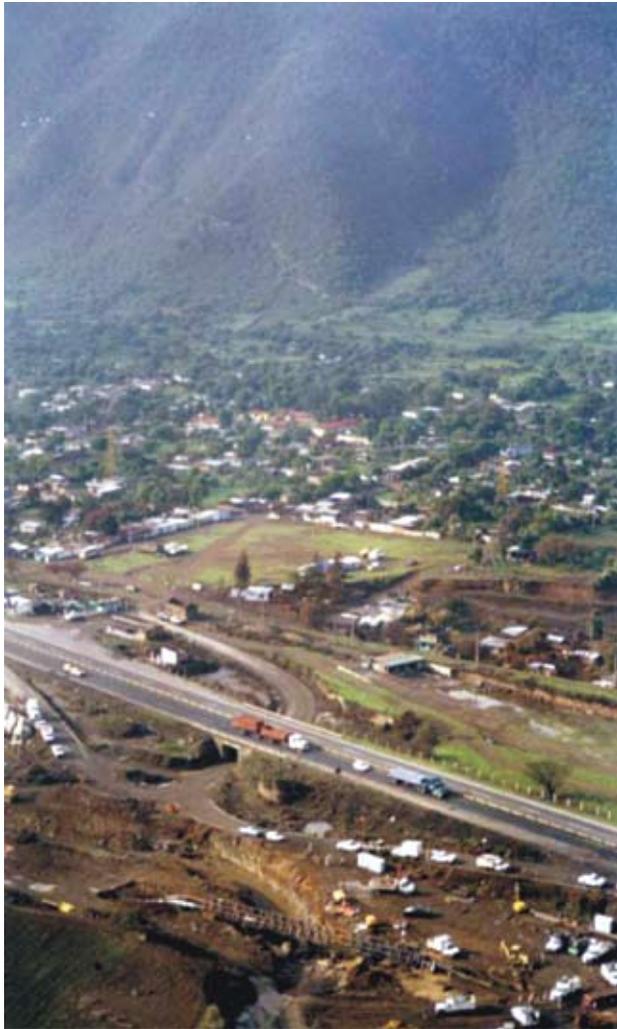


Figura 10. Vista del sitio de ruptura del ducto de gas en la población de Balasterra.

federal a través de un túnel. El flujo inundó la autopista y causó pérdidas totales en las casas localizadas a un lado del cauce. Hasta donde se sabe no hubo víctimas mortales. Otro efecto importante fue el total anegamiento y azolvamiento de la laguna de Nogales que se encuentra sobre la margen izquierda del cauce.

Las alturas máximas medidas en la zona inundada son de 2.55 m en el paso a desnivel bajo la autopista, 2 m en la laguna y 1.5 m en el puente de la avenida principal.

El espesor de la capa de sedimentos dejado por el flujo varía entre 0.20 y 1 m, dependiendo de la proximidad al cauce principal. Los depósitos se distribuyeron en calles y en el interior de las viviendas, causando pérdidas materiales considerables.

En los depósitos no se observa ninguna estructura de sedimentación definida, mas bien tienen una apariencia masiva producto de la turbulencia de la corriente.

Basado en las observaciones de campo se estima que el área más afectada fue de 5 km<sup>2</sup>. Los daños se concentra-

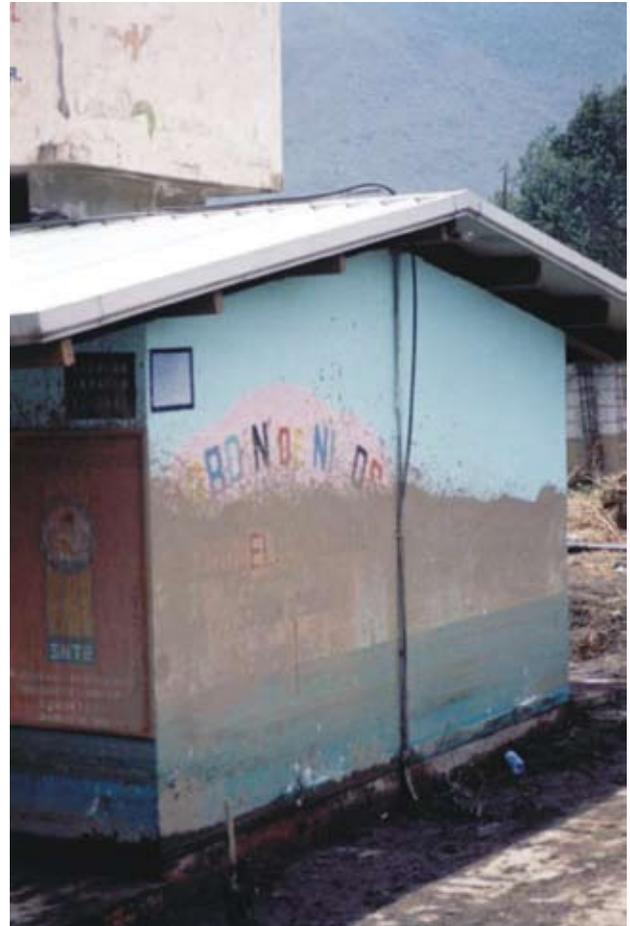


Figura 11. Marca de agua dejada en un jardín de niños ubicado cerca del cauce del río Chiquito en la población de Ciudad Mendoza. La altura máxima es de 2.5 m.

ron principalmente en las poblaciones de Balasterra, Cd. Mendoza y en menor medida en Nogales, a lo largo de un corredor que sigue la dirección de la autopista y el cauce del río (Figura 4). Si se considera un espesor promedio de 0.80 m para los depósitos dejados por la corriente en las zonas de inundación, se obtiene un volumen aproximado de  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de sedimentos.

## 6.1 Granulometría

Las muestras que se colectaron en las zonas bajas (0301, 0304, 0311 y 0312) presentan una clara concentración de la fracción más fina (arenas finas, limo y arcilla) (Tabla 1). El promedio de porcentaje en peso en los tamaños inferiores a 0 phi es mayor al 70 % y están constituidos mayoritariamente por ceniza y lapilli de origen volcánico.

La Figura 12 muestra los histogramas correspondientes a cada una de las fracciones granulométricas de muestras tomadas a lo largo del cauce del río Chiquito. Con excepción de una de las muestras (0304) que tiene un comportamiento

Tabla 2. Alturas de marcas de agua medidas en zonas de inundación. La ubicación de los sitios puede verse en la Figura 12.

Sitio	Ubicación	Coordenadas UTM		Elevación m s.n.m.	Altura de agua (m)
0301	Calle La Raya	0692205	2080630	1,360	0.50
2	Bravo y La Raya	0692184	2080679	1,360	0.90
3	s/n	0691990	2080884	1,370	1.40
0304	Jardín de Niños	0691974	2080918	1,370	2.00
5	J. O. de Dominguez	0692101	2080939	1,370	1.30
6	Rafael Tapia	0692180	2080921	1,370	1.40
7	s/n	0692260	2080839	1,370	0.70
8	Cauce río	0692124	2081205	1,360	2.5
9	Álamo	0692032	2080853	1,370	1.40
10	Av. de La Rosa	0692062	2080963	1,370	0.70
0312	Granja de Pollos	0692270	2081298	1,350	1.60
17	Balustrera	0686897	2081588	1,570	0.80
18	Nogales (puente)	0693201	2081788	1,290	1.65
20	Nogales (parque)	0693680	2081890	1,295	2.20

ligeramente bimodal, el resto de las muestras tiene una distribución normal. Las muestras tomadas dentro del cauce (0311, 0304, 0312) contienen las fracciones más gruesas ( $0 - 2 \phi$ ) y presentan una mala selección, mientras que la muestra tomada en una zona más alejada del cauce (0301) concentra fracciones más finas ( $2 - 4 \phi$ ).

No se realizaron análisis por vía húmeda para determinar el contenido de limo y arcilla; sin embargo, el promedio de la fracción granulométrica inferior a  $4 \phi$  de las 4 muestras analizadas es menor a 3 %, por lo que el flujo se considera no cohesivo, ya que el contenido de arcilla es considerablemente inferior a este porcentaje (Scott *et al.*, 1995).

## 7. Conclusiones

El 5 de junio de 2003 ocurrió un evento de flujo de agua con una baja concentración de sedimentos que descendió por uno de los cauces del flanco sur del Pico de Orizaba conocido como Río Chiquito. De acuerdo a la clasificación de este tipo de fenómenos puede ser considerado como un "flujo de corriente" (Pierson y Costa, 1987).

A pesar de los daños provocados, los cuales sin lugar a dudas fueron cuantiosos, se trató de un evento de baja magnitud y alta frecuencia. De acuerdo con Scott *et al.* (1995), el término magnitud es un indicador del área inundada (en este caso relativamente baja), considerando la extensión del flujo en función de sus depósitos. Según este mismo autor, el término frecuencia se refiere a la probabilidad de ocurrencia del flujo, o su equivalente, el valor inverso del período de recurrencia del fenómeno.

Como resultado de la accidentada topografía, las ocasionales condiciones climáticas extremas y la amplia red de cauces que descienden de las zonas altas de los volcanes Pico de Orizaba y Sierra Negra, la zona urbana e industrial

ubicada entre Orizaba, Cd. Mendoza y La Balustrera, está expuesta a fenómenos asociados con flujos de detritos y lahares que descienden por los diferentes cauces que llegan al valle sobre el que se asientan estas poblaciones.

Las áreas consideradas como zonas fuente de material detrítico se localizan por arriba de los 2,500 m s.n.m. Este material está conformado por depósitos piroclásticos no consolidados, cuyas características granulométricas, condiciones de inestabilidad y gran volumen, les confieren una alta energía potencial capaz de generar flujos detríticos de mayor magnitud que el del 5 de junio, de hecho, los registros estratigráficos indican su ocurrencia en el pasado geológico reciente.

## 8. Recomendaciones

A continuación se enlistan algunas recomendaciones que ayudarían a mitigar los daños ocasionados por flujos similares o mayores al del 5 de junio de 2003.

1. Instalar cuando menos dos estaciones climatológicas en la zona de Atzitzintla, Texmalaquilla, La Perla. Estas estaciones deberán contar con un sistema de comunicación que les permita dar la voz de alerta cuando los valores de precipitación rebasen los mínimos estipulados (50 – 100 mm/hr).

2. Estudiar la ubicación precisa y más conveniente de muros de retención de sedimentos a lo largo del cauce del río Chiquito. La función de estos muros sería detener paulatinamente la carga de arrastre y en menor medida en suspensión. Estos muros de retención deberán estar sujetos a un mantenimiento permanente, que incluya su limpieza y desazolve en los meses previos a la temporada de lluvias.

3. Realización de estudios geológicos que ayuden a determinar con precisión, con base en los depósitos existentes, las características de los materiales, su estabilidad y su volumen. Así mismo, la historia de ocurrencia de fenómenos relacionados con avenidas extraordinarias en épocas pasadas recientes.

4. Fomentar un programa de reubicación de viviendas localizadas a lo largo del cauce del río Chiquito en los tramos que cruza las zonas urbanas, y prohibir en lo futuro el asentamiento de nuevas colonias sobre sus márgenes.

5. Frenar la tala inmoderada en las zonas intermedias y altas del Citlaltépetl, y fomentar la reforestación. La deforestación es un factor que induce la erosión y el deslizamiento de laderas.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Subsecretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, en especial al Dr. Rubén Colorado Salazar y al Ing. Arturo Romero Montero del Departamento de Atlas Estatal de Riesgos su valioso apoyo durante la fase de campo, así como por la información facilitada.

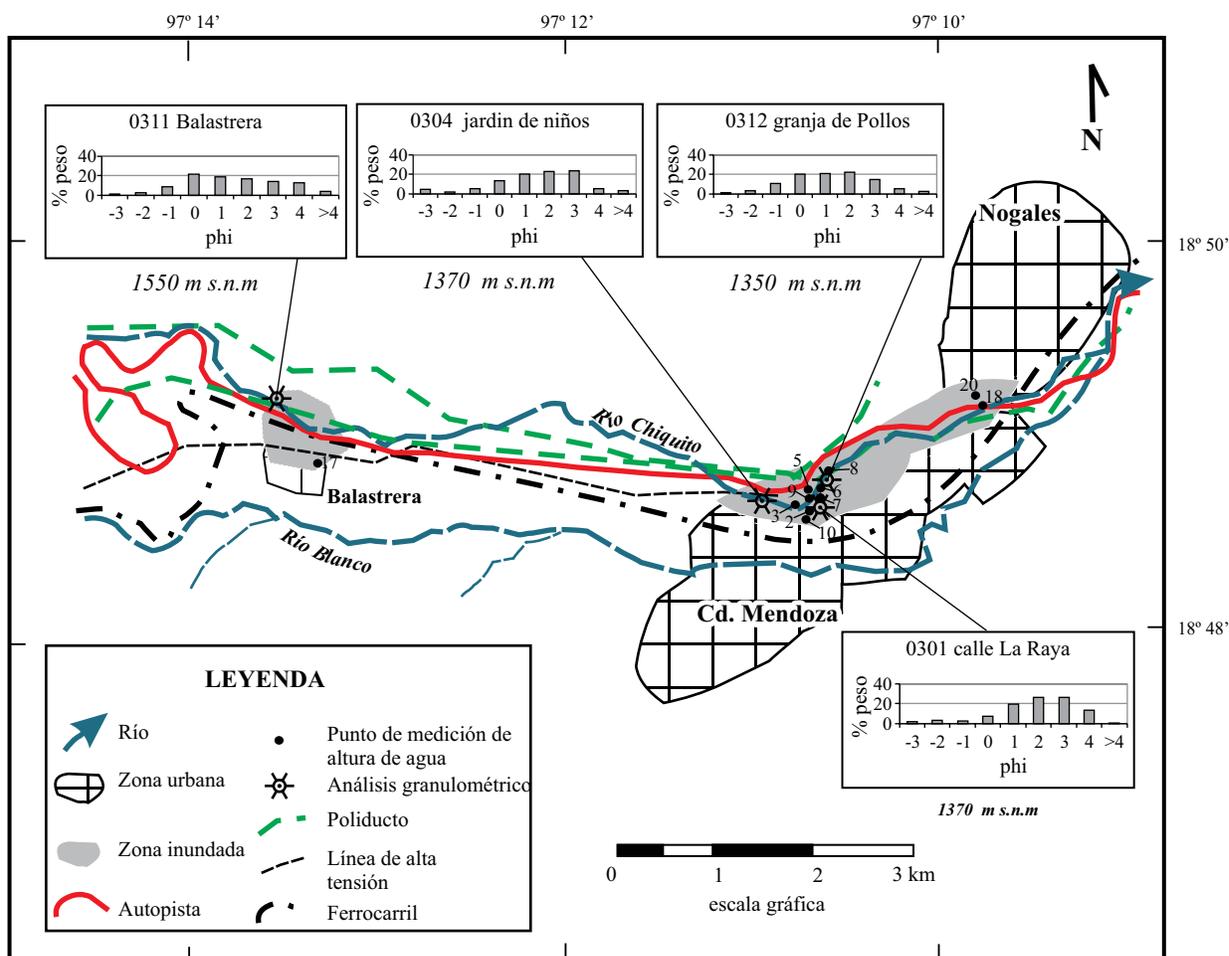


Figura 12. Zonas afectadas por la inundación en el corredor urbano Balasterra-Cd. Mendoza-Nogales. Los recuadros muestran los histogramas de análisis granulométricos realizados en muestras de sedimentos del lecho del río.

Apoyo parcial fue proporcionado por el Instituto de Geología de la UNAM, el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana y el proyecto CONACYT 42644.

Un agradecimiento especial para Juan Manuel Espíndola y José Luis Arce, su trabajo de revisión y comentarios fueron de gran importancia para lograr la versión final de este artículo. Así mismo un agradecimiento a Armando García-Palomo por su trabajo editorial.

## Referencias bibliográficas

- Carrasco-Núñez, G. Vallance, J.W., y Rose, W.I., 1993. A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazards assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59: 35-46.
- Carrasco-Núñez, G., 2000. Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), Mexico: *Geological Society of America Special Paper 334*: 247-262.
- Comisiones del Instituto Geológico de México, 1922. Memoria relativa al terremoto mexicano del 3 de enero de 1920: *Boletín del Instituto Geológico de México* No. 38, 106 p.
- De Luna-Cruz, Faustino, 2003. Visita técnica de los días 18, 19 y 20 de junio para la identificación y validación del origen de las avenidas ocurridas los días 5 y 6 de junio en la cuenca del río "El Chiquito" en el estado de Veracruz. Informe técnico inédito. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Höskuldsson, A., y Robin, C., 1993. Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, eastern Mexico. *Bull. Volcanol.*, 55: 571-587.
- Hubbard, Bernard E.; Sheridan, Michael F.; Carrasco-Núñez, Gerardo; Díaz-Castellón, Rodolfo; y Rodríguez, Sergio R., 2007. Comparative lahar hazard mapping at Volcán Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topographic Data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160: 99-124.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1985. Carta Topográfica Orizaba E14B56, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1994. Carta Geológica Orizaba E14-6, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática.
- Pierson, Thomas, C., y Costa, John E., 1987. A rheologic classification of subaerial-water flows: *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, Volume VII: 1-12.
- Robin, C., Cantagrel, J.M. y Vincent, P., 1983. Le nuées ardentes de type Saint-Vincent, épisodes remarquables de l'évolution récente du Pico de Orizaba (Mexique). *Bull. Soc. Géol. France*, 5: 727-736.
- Rodríguez, S. R., Gómez-López, D., y Murrieta-Hernández, J.L., 2003.

- Informe de la visita realizada los días 10, 11 y 12 de junio de 2003 a la zona de Nogales-Cd. Mendoza-La Balastera, y lugares afectados por el desbordamiento del río Chiquito en el estado de Veracruz. Informe Técnico inédito, Centro de Ciencias de la Tierra UV e Instituto de Geología UNAM.
- Salas-Salinas, M. A., Eslava-Morales, H., Gómez-Vázquez, A., y Martínez-Bringas, A., 2003. Informe Técnico de la visita realizada los días 18, 19 y 20 de junio de 2003, debido a los acontecimientos ocurridos en los municipios de Nogales, Camerino Z. Mendoza, Maltrata y Río Blanco, con motivo de las avenidas ocurridas en día 5 de junio en la cuenca del Río Chiquito y el arroyo La Carbonera en el estado de Veracruz. Informe Técnico inédito, Sistema Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Septiembre, 2003.
- Scott, K.M., Macías, J.L., Naranjo, J.A., Rodríguez, S.R., y McGeehin, J.P., 2001. Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: Mobility, hazard assessment, and mitigation strategies. USGS Profesional Paper 1630, 67 p., 19 figs. y 9 tablas.
- Scott, K. M., Vallance, J.W., y Pringue P.T., 1995. Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey Profesional Paper, 1547: 1-56 con mapas.
- Scott, K., M., 2000. Precipitation-triggered debris flows at Casita volcano, Nicaragua: Implications for mitigation strategies in volcanic and tectonically active steepplands, en Wiczorek, G.F., y Naeser, N.D., Debris-flow hazards mitigation, mechanics, prediction, and assessment: Proceedings of the Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Taipei, Taiwan, 16-18 de agosto, 2000: 3-13.
- Sheridan, M., F., Siebe, C., Bonnard, C., Strauch, W., Navarro, M., Cruz-Calero, J., y Buitrago-Trujillo, N., 1998. Reporte sobre la avalancha y el flujo de agua con sedimentos, en el volcán Casita, Nicaragua, disparados por el huracán Mitch: en INETER, Las Lluvias del Siglo en Nicaragua; Managua, Anexo I: 141-143.
- Sheridan, M.; Carrasco-Núñez, G.; Hubbard, B. E.; Siebe, C., y Rodríguez, S. R., 2002. Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). UNAM, Instituto de Geología.
- Siebe, C., Abrams, M., y Sheridan, M.F., 1993. Major Holocene block-and-ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, México: Implications for future hazards. J. Volcanol. Geothem. Res., 59: 1-33.
- Singh, S.K., Rodríguez, M., y Espindola, J.M., 1984. A catalog of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 74, p. 267-279.

Manuscrito recibido: Octubre 3, 2006

Manuscrito corregido recibido: Noviembre 21, 2006

Manuscrito aceptado: Enero 8, 2007