

Análisis geomorfológico, geotécnico y aplicación de un modelo al flujo de detritos de Minatitlán, Colima, México

Geomorphological analysis, geotechnical and application of a model, debris flows Minatitlan, Colima, Mexico

Arreygue Rocha, E.¹✉ - Chávez Negrete, C.¹ - García Ávila, S.² - Alarcón Ibarra, J.¹

Recibido: 27 de abril de 2013 • Aceptado: 11 de septiembre de 2013

Resumen

Colima es uno de los Estado más chicos de México, en los últimos quinientos años se ha visto afectado por cuatro importantes ciclones (1626, 1812, 1881 y 1959), los dos últimos son los que han destruido gran parte del estado. Además se han tenido sequías importantes en los años de 1617 y 1787, dejando grandes pérdidas económicas.

El año 1959 fue terrible para México debido a que sufrió una de las precipitaciones más abundantes registrándose grandes daños en diferentes entidades, provocando inestabilidad de taludes en diferentes zonas, principalmente del tipo de flujos de detritos.

El fenómeno ocurrido en el poblado de Minatitlán es un claro ejemplo de los procesos de inestabilidad de taludes, debido a la sobresaturación de agua en los materiales, la masa deslizante se transformó en un flujo capaz de transportar grandes bloques (mayores a un metro de diámetro y en suspensión) por grandes distancias. El evento hidro-meteorológico que destruyó la población de Minatitlán, se presentó el 27 de octubre de 1959. Los nuevos asentamientos se encuentran sobre los depósitos de este mismo evento, por lo que se considera una zona de alto riesgo.

En este trabajo se hace una identificación del área de afectación del flujo que provocó la destrucción del poblado, se tomaron muestras de materiales con la finalidad de realizar una caracterización geotécnica, aplicándose un modelo. El resultado del estudio se dio a conocer a la autoridad municipal, para que se aplique en el Plan de Desarrollo Urbano de la población, lo que contribuirá a evitar nuevos desastres.

Palabras clave: *Ciclón de 1959, flujo de detritos, modelo, Minatitlán, Colima.*

Abstract

Colima is one of the smaller State of Mexico, in the last five hundred years has been affected by four major hurricanes (1626, 1812, 1881 and 1959), the last two are the ones who have destroyed much of the state. In addition there were major droughts in the years of 1617 and 1787, leaving large economic losses.

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Mich.

2. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado en Ciencia de los Materiales, Morelia, Mich.

✉ arrocha@umich.mx

1959 was terrible for Mexico they suffered one of the heaviest rainfall recorded in different entities major damage, causing instability of slopes in different areas, mainly the type of debris flows.

The phenomenon occurred in the town of Minatitlán is a clear example of slope instability processes, due to the saturation of water in materials, the sliding mass flow became capable of transporting large blocks (greater than one meter in diameter and suspension) for long distances. The hydro-meteorological event that destroyed the population of Minatitlán, was presented October 27, 1959. The new settlements are on the deposits of the same event, so it is considered a high risk area.

This paper makes an identification of the area affected by the flow that caused the destruction of the village, samples of materials in order to perform a geotechnical characterization, applying a model. The result of the study was released to the municipal authority, for application in the Urban Development Plan of the population, which will help to prevent further disasters.

Keywords: Cyclone of 1959, debris flow, model, Minatitlán, Colima.

INTRODUCCIÓN

En un flujo existen movimientos de partículas o bloques dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Estos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y pueden ser de roca, de detritos, de suelo o tierra.

Según *Suárez (1998)* los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden parecerse en ocasiones a los fenómenos de reptación, la diferencia consiste en que los flujos tienen una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente, principalmente cuando son fracturados o agrietados y esta saturación conduce a la formación de flujos. El movimiento de los flujos de detritos puede ser movilizados por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea.

Los daños causados por este tipo de flujos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una onda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas ondas menores superimpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo. Cuando el canal es más pequeño que el flujo, se forman ondas horizontales o depósitos laterales a los lados del canal.

Los flujos de detritos son fenómenos principalmente en estacionales que se desarrollan en tiempos cortos con un elevado grado destructivo. En los lechos de los arroyos los flujos de detritos se forman por erosión y arrastre, en la corriente líquida de materiales presentes en el fondo del lecho alcanzan una concentración volumétrica, lo que aumenta la capacidad erosiva (*Gregoretti, 1999*).

El objetivo de este trabajo es caracterizar el flujo que se presentó en el poblado de Minatitlán, en Colima, México, donde se determinó su extensión y el volumen de material transportado; se clasifica el material en distintos sitios, se estima la resistencia al corte de algunos suelos, lo que permitió hacer uso del programa "Colate detritiche" para modelar el flujo de detritos de Minatitlán. Estos resultados ayudarán a las autoridades en la prevención y mitigación de nuevos desastres naturales de este tipo.

LOCALIZACIÓN

El Estado de Colima es el tercer estado más pequeño de México. Colinda con Jalisco al Norte, Michoacán al Este, y al Oeste con el Océano Pacífico. Su superficie es de 5.455 km², con una línea de costa de 157 kilómetros. La población de Minatitlán se localiza a 55 kilómetros de la Ciudad de Colima (Capital del Estado); el poblado limita al Sur con los municipios de Coquimatlán, Tecomán y Manzanillo; al Norte con Villa de Álvarez.

Se encuentra entre los paralelos 19°23' latitud norte, y a 104°03' de longitud Oeste. Tiene una cuota promedio de 740 metros sobre el nivel del mar, con una extensión territorial de 215 Kilómetros cuadrados (Figura 1). De acuerdo al último censo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (*INEGI, 2010*), el municipio de Minatitlán tiene 8.174 habitantes.

DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

En México, se considera el año de 1959 como un año de eventos excepcionales por la cantidad de ciclones y huracanes que llegaron a tierra: cuatro por el Golfo de México y cinco por el Pacífico, así como por los grandes desastres ocasionados.

De acuerdo al Centro de Diagnóstico Climático NOAA-CIRES (siglas en inglés), encargada de estudiar los años de "Los Niños y Niñas" desde 1896 hasta 1995, reveló que el ciclón del Pacífico de 1959 coincide con un año posterior a la afectación de El Niño de 1957-1958 (*OPS, 2000*). De acuerdo con la Secretaría de Recursos Hidráulicos (*SRH, 1961*), este fenómeno inició frente a las costas de Puerto Ángel en Oaxaca el 23 de octubre. El 28 de octubre del mismo año todavía se sentían los efectos del ciclón en los Estados de Jalisco y Zacatecas.

La trayectoria inicial del Ciclón del Pacífico fue similar a la que han seguido otros ciclones, pero durante el trayecto modificó su dirección y se introdujo al país en Manzanillo (Figura 2). Según la *SRH (1961)* el Ciclón del Pacífico de 1959 fue clasificado en categoría 5, entrando a tierra hasta una distancia de 100 km (llegó hasta el Estado de Zacatecas), con vientos superiores a 250 km/h, además superó en un 300% el promedio de lluvias en 24 horas.

En Minatitlán fue imposible registrar la precipitación, dado que el huracán destruyó la estación climatológica que se instaló en 1958. Según el observatorio local de la Ciudad de Colima, la precipitación pluvial del 26 y 27 de octubre en la ciudad alcanzó 27 cm y los vientos huracanados soplaron a velocidad de 80 km/h (*Padilla, 2005*).

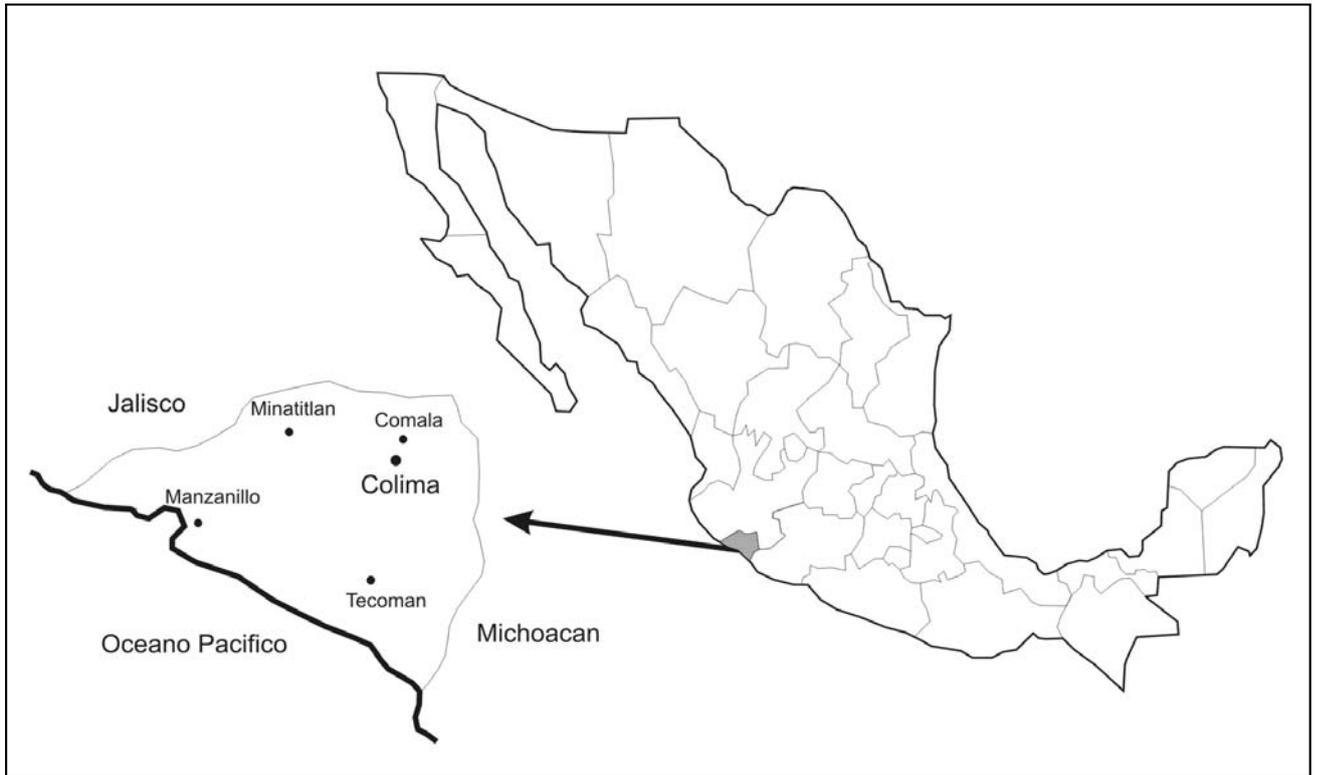


Figura 1. Localización de la zona en estudio.

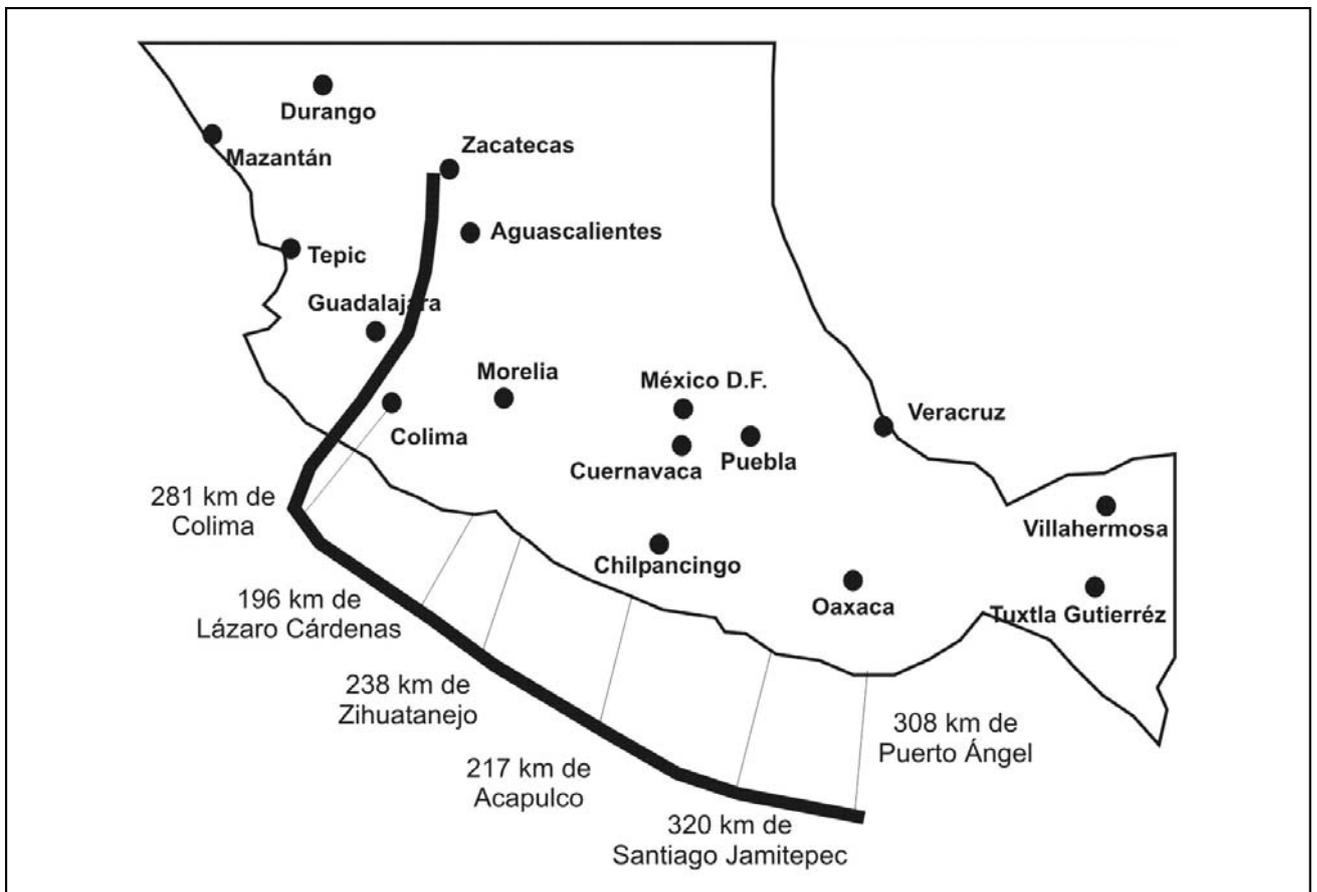


Figura 2. Ruta que siguió el Ciclón del Pacífico en 1959 (SRH, Boletín Hidrológico No. 16).

Daños en Minatitlán

El Cerro de Los Copales es una montaña de gran tamaño que se ubica a tres kilómetros del pueblo de Minatitlán, con una elevación máxima de 1.700 msnm (Figura 3). En las partes altas del cerro abundaban las coníferas y los árboles propios de los terrenos boscosos, la base del cerro estaba cubierta por vegetación tropical, arbustos y matorrales.

El 23 de octubre de 1959 llegaron las primeras lluvias a la zona humedeciendo el suelo, en ciertos momentos dejaba de llover, pero al paso de algunas horas continuaba lloviendo. Así estuvo hasta el 27 de octubre, cuando a las 6:00 a.m. se pudo ver como bajaba del cerro un gran arroyo de lodo con bloques de roca y árboles, que descendían por las calles del poblado con altura superior a 1,50 m. Entre todo este flujo de lodo y bloques se podía observar a las personas y animales que eran arrastradas por el arroyo (Corona et al. 2002).

Este evento destruyó dos terceras partes de la población, declarándose zona de desastre total: se estimaron 200 viviendas destruidas y 350 personas entre muertas y desaparecidas. Los pobladores de Minatitlán estuvieron incomunicados con las poblaciones vecinas.

En la ciudad de Colima se formó un Comité para ayudar a los damnificados del poblado. Los habitantes improvisaron una pista de aterrizaje para que los aviones del Ejército Mexicano pudieran aterrizar para suministrar víveres y regresar con los heridos a la Ciudad de Colima (Padilla, 2006).

La imagen de la Figura 3, fue tomada por elementos del Ejército Mexicano, un día después de ocurrido el evento. En ella se puede apreciar la distribución que tuvo el flujo y los depósitos dejados por el evento.



Figura 3. Área de afectación del flujo de detritos en el ciclón de 1959.

METODOLOGÍA

Geomorfología

El análisis geomorfológico se basó en la información editada por INEGI (1996), carta digital de Minatitlán E13B33, escala 1:50.000, geológica, topográfica y fotografías aéreas de diferentes periodos. Se estudió el proceso del evento, identificó el ancho de la conoide y las terrazas de depositación, se observaron los diferentes bloques de rocas que aún se encuentran dentro del poblado y la dispersión de los materiales.

Así mismo se hicieron algunas caminatas en la montaña (aguas arriba del arroyo), encontrando que sobre el lecho del arroyo existen grandes bloques de roca, no se pudo entender si corresponden al mismo evento o son de otros eventos. Se pudo observar que en algunos lugares el macizo rocoso se está desintegrando rápidamente e incluso hay demasiado material lajeado en las márgenes del arroyo, el cual en los periodos de lluvia son transportados y depositados en zonas bajas.

Geotecnia

El objetivo de analizar el depósito del flujo de detritos fue para conocer la distribución de los suelos, esto por la gran variedad de materiales observados en la superficie. Por tal motivo se realizó la clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Las pruebas que se hicieron fueron: peso volumétrico seco, densidad, absorción, humedad, granulometrías, límites de consistencia y corte directo.

Los análisis granulométricos se realizaron en dos etapas, la primera fue por medio de cribado en mallas (partículas superiores a 0,074 mm) y la segunda con un analizador de tamaño de partícula modelo Coulter LS 100Q, para partículas iguales o inferiores a 0,074 mm, con un rango de medición de 0,1 a 900 micras (García Ávila, 2007). Este análisis se hizo en estado seco.

Al mismo tiempo se hicieron pruebas de corte directo en base a las normas ASTM D 3080-72 y la UNE103401 para ensayos de corte directo consolidados no drenados en muestras de suelos con diámetro que pasó la malla No. 4 (4,75 mm). En la prueba no se realizaron mediciones de presión de poro, por lo que los resultados que se reportan son representativos de la resistencia no drenada a distintas profundidades.

Se empleó la caja circular con diámetro de 4,997 mm, el procedimiento consistió en compactar el suelo a la densidad deseada y se montó en el equipo. Las muestras fueron sometidas a un proceso de consolidación de 24 hrs; el corte se aplicó a una la velocidad de desplazamiento de 0,50 mm/min. Las muestras se sometieron a tres distintos esfuerzos normales: 0,765, 1,530 y 2,549 kg/cm².

Modelo de escenarios

Para la aplicación del modelo se tomaron como base los aspectos principales del ciclón de 1959 (precipitaciones), así como los resultados obtenidos de las pruebas geotécnicas y la información geomorfológica. En particular se empleó el software "Colate detritiche" propuesto por Bruschi (2008), el cual permitió conocer principalmente la magnitud del evento, el área de afectación, la velocidad del flujo, entre otros aspectos.

Para la aplicación del modelo se utilizaron diferentes parámetros, los cuales fueron divididos en: criterios físicos (aspectos geotécnicos), criterios geológicos (características de las rocas), criterios meteorológicos (intensidad de la lluvia, duración, etc.),

coordenadas del torrente (longitud y ancho en diferentes puntos), área de la zona de aporte de material, área probable de depositación, cuota máxima, cuota mínima, coeficiente promedio del escurrimiento, gasto de proyecto, entre otros.

RESULTADOS

Geomorfología de la zona

Los ciclos de erosión y remodelación de la superficie terrestre pertenecen a los procesos geomorfológicos continuos, los flujos de detritos o de escombros y los lahares, pueden ser considerados parte de este tipo de procesos. De acuerdo a *Bruschi (2008)*, los flujos de detrito están influenciados por una cuenca de drenaje y por una conoide. Asimismo, *Berti y Simoni (2007)*, *Kostashuk et al. (1986)*, aseguran que este tipo de eventos solamente se presentan en cuencas de montaña menores a los 10 km² y que muestran mayor probabilidad de generar flujos de detritos, con la tendencia a crear algún curso de agua efímero, incapaces de remover los materiales sólidos del lecho del arroyo mediante procesos normales de tipo fluvial (*Fioraso y Chiarle, 1996*).

Considerando la geomorfología de la zona de afectación, el área en estudio cumple con lo dicho por *Bruschi (2008)*, *Berti y Simoni (2007)*, *Kostashuk et al. (1996)*, ya que es una cuenca pequeña, la inclinación del torrente es elevado y corto. La población se localiza en la parte baja de una depresión y edificada sobre un abanico aluvial, es una región de tectónica activa, lo que se reconoce en las erupciones frecuentes del volcán de Colima y en las montañas con estructuras en bloque. Estas características condicionan una vigorosa erosión y se manifiesta en una densa red fluvial, en circos de erosión, valles montañosos profundos y otros rasgos (*Corona et al. 2002*).

De acuerdo a la hidrografía de la zona, Minatitlán se encuentra en la región hidrológica denominada "Costa de Jalisco", que se conecta al Río Minatitlán de corriente perenne, nace en la falda Este del Cerro El Zapote, de donde parte hacia el Sur para desembocar en el Océano Pacífico. La microcuenca hidrográfica de Minatitlán tiene una superficie de 6,31 km², donde nace el arroyo El Bonete con una longitud de 4,91 km, y una jerarquía del tercer orden. Este arroyo es afluente izquierdo del río Minatitlán.

La erosión más activa se produce en la parte alta, entre los cerros La Oterera y Los Copales, teniendo zonas con pendientes entre 50° y 30° (zona de aporte), lo cual es un factor determinante en la formación de flujos de detritos con bloques (Figura 4), además se puede apreciar la zona de erosión y la zona de depositación (afectando gran parte de la población) (*Arreygue y Garduño, 2004*).

Actualmente los depósitos han sido erosionados, quedando algunos pequeños restos sobre los cuales se observan grandes bloques de roca de distintos tamaños, esto dentro del poblado. En la Figura 5a (izquierda) se aprecian algunas rocas en la calle sobre la banqueta, estos bloques se encuentran en la parte baja del poblado. En la Figura 5b (derecha) se encuentra en la parte alta del poblado, observándose las dimensiones de los bloques, ahora este lugar es ocupado por una escuela.

Los depósitos aluviales recientes, se encuentran principalmente a lo largo del valle del Río Minatitlán, donde forman pequeñas terrazas con algunos horizontes de suelos intercalados, principalmente en la parte baja del valle. En la Figura 6a (izquierda) se tiene el frente del flujo de detritos con altura superior a los cuatro metros, terraza que se observa en la

margen izquierda del Río Minatitlán. La Figura 6b (derecha) es el mismo depósito aguas abajo y sobre el lecho del río. En las dos imágenes se puede observar el flujo, donde se tienen fragmentos de roca de diferentes dimensiones y cementados por material fino. Revueltos entre los materiales del flujo, se puede encontrar pequeños trozos de ollas de barro u otro tipo de objetos domésticos (*Arreygue y Garduño, 2004*).

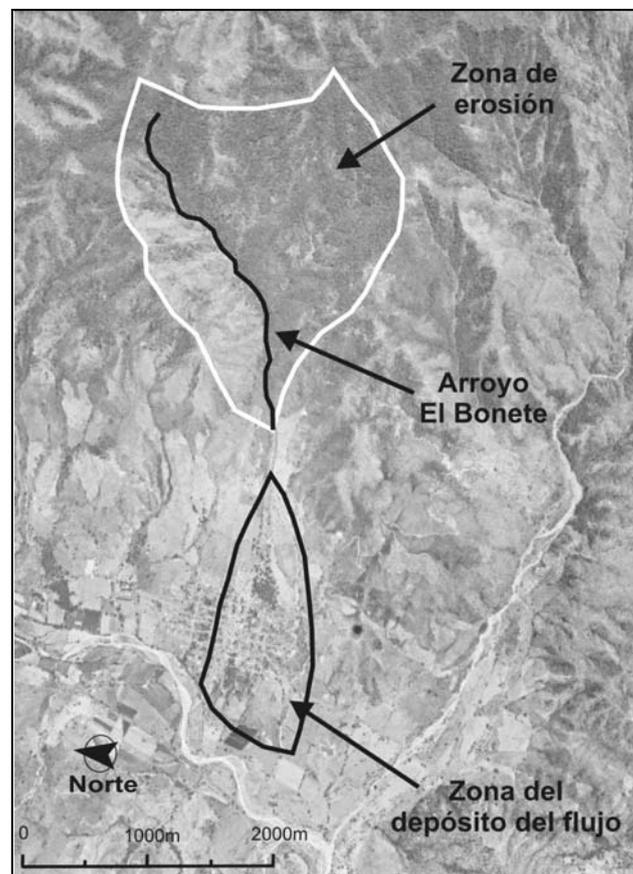


Figura 4. Distribución del flujo de detritos de 1959 (INEGI, 2004).

Geotecnia

Para conocer las características de los materiales del flujo de detritos, se efectuó un muestreo sobre el área del abanico aluvial seleccionando los mejores sitios. En primera instancia se tomaron veinte especímenes distribuidos en todo el depósito, así como fuera del área de afectación. En este trabajo solamente se presentan los resultados de ocho especímenes analizados (los más representativos), cuatro de la parte alta, dos de la parte intermedia y dos de la zona baja (terrazas del flujo).

La recolección de las muestras fue del tipo alterada, haciendo pozos a una profundidad máxima de 0,80 m y tomando alrededor de 5 kgs del material. En laboratorio se realizaron las pruebas para conocer las propiedades índice de acuerdo a la SUCS. En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran los resultados de las propiedades índice de los materiales, las cuatro primeras muestras corresponden a la parte alta del depósito, las muestras 14 y 15 son de la parte intermedia y las últimas la parte baja. Se debe resaltar el hecho que se realizaron calas en campo para obtener el peso volumétrico de campo y el contenido de humedad natural, estos datos se utilizaron para reconstituir las muestras en laboratorio y obtener sus características mecánicas. De los



Figura 5. Dimensiones de algunos bloques de rocas que demuestran la evidencia del desastre.



Figura 6. Frente del flujo de detrito, sobre la margen izquierda del Río Minatitlán.

resultados en la Tabla 1, se observa que los pesos específicos son bajos, lo que se atribuye a su porosidad y a la alta conductividad hidráulica, lo que los hace susceptibles a que se puedan saturar fácilmente. Asimismo se puede decir que no existe mucho cambio en las propiedades de los suelos.

Granulometría

El análisis permitió conocer el porcentaje de las fracciones de suelo contenidos en las diferentes muestras analizadas. En la Tabla 2 se presentan los resultados y de acuerdo al SUCS el material se clasifica de la siguiente manera: la parte alta corresponde a una arena mal graduada con gravas subángulosas, en la zona intermedia se relaciona con una arena limosa, y el área baja de la conoide pertenece a una arena limosa con finos no plásticos de baja resistencia. En base a los resultados se concluye que la depositación del material en la parte alta de la conoide es más homogénea (pocos finos) que en la parte intermedia y baja.

Corte Directo

La prueba se hizo en base a las normas descritas anteriormente, obteniendo los parámetros de resistencia al esfuerzo

cortante de las arenas limosas, permitiendo conocer el ángulo máximo de fricción interna no drenado y la cohesión. Los resultados se muestran en la Tabla 3, indicando que la cohesión es muy variable, en la parte alta de la conoide por lo general son valores bajos, pero donde se deposita todo el flujo, los valores de la cohesión son más altos, lo que explica mayor concentración de finos. Ahora, el ángulo de fricción del material no tiene mucha diferencia, el promedio está en 48° , considerado como un valor típico de este tipo de materiales.

De acuerdo a las permeabilidades calculadas en base a la prueba de consolidación y a la granulometría (k promedio de la arena $1,6 \times 10^{-2}$), se puede inducir que el tiempo de drenaje del suelo para una profundidad de 0,8 m es alrededor de un mes. Si se toma en consideración las gravas y los fragmentos de roca que existen en campo, la permeabilidad es más grande, por lo que se puede deducir que el comportamiento del suelo y los fragmentos de rocas en campo, el agua se drena.

El ángulo de fricción que se obtuvo en laboratorio es una estimación del de campo, apoyado en un comportamiento no drenado. Así mismo el ángulo de fricción es un parámetro importante en la modelación del flujo de detritos (que se presenta en la aplicación del modelo). Debido a las limitantes del

Tabla 1. Propiedades índice del material analizado.

Muestra	P.V. de campo (Kg/m ³)	Humedad natural (%)	Densidad relativa de los sólidos	Absorción (%)
M3	1.382,54	4,88	2,60	4,88
M4	1.302,05	4,65	2,50	4,65
M6	1.306,98	9,52	2,60	9,52
M8	1.333,80	8,70	2,60	8,70
M14	1.316,44	7,67	2,59	7,67
M15	1.266,05	4,70	2,52	4,70
M16	1.342,49	8,89	2,60	8,89
M17	1.297,02	6,82	2,53	6,82

Tabla 2. Resultados de la granulometría y de la distribución del tamaño de partículas.

Muestra	Granulometría				Coeficiente Uniformidad	Coeficiente Curvatura
	G (%)	S (%)	Limo (%)	Arcilla (%)		
M3	23,08	58,83	17,32	0,77	18,25	0,58
M4	34,80	55,37	9,42	0,41	39,63	0,21
M6	34,23	57,36	7,90	0,51	38,39	0,35
M8	30,11	58,89	10,44	0,56	36,00	0,35
M14	22,73	66,93	9,74	0,61	19,71	0,50
M15	47,64	46,10	6,07	0,19	126,36	0,08
M16	16,40	72,08	11,17	0,35	8,43	0,65
M17	33,43	56,75	9,03	0,78	33,06	0,31

Tabla 3. Resultados obtenidos de la prueba de Corte Directo.

Muestra	Cohesión, ccu (kg/m ²)	Ángulo de Fricción Interna, ϕ_{cu} (°)
M3	1,76	42,45
M4	3,29	55,59
M6	0,00	52,42
M8	8,10	41,79
M14	0,00	55,59
M15	0,00	58,35
M16	7,14	38,21
M17	6,99	40,61

equipo no se pudieron realizar ensayos con material a escala natural, y se decidió estimarlo. Se sabe que los fragmentos de roca son más susceptibles a romperse, entre más grande sean, debido a las imperfecciones que dio origen su formación geológica. Los ángulos de fricción son menores cuando los tamaños de partícula son mayores (Marachi et al., 1969), por lo que los ángulos que se usaron para la modelación fueron más bajos. Bruschi (2008) sugiere que se utilicen ángulos de fricción entre 36 y 40° para las modelaciones. Dado los resultados del laboratorio se optó por utilizar 40°.

APLICACIÓN DEL MODELO

La utilización de modelos de escenarios no es muy habitual, por tal motivo se desconoce el alcance que tienen este tipo de software, e incluso los parámetros que se deben que utilizar. El empleo de este tipo de simuladores permite tener un conocimiento más preciso de la problemática que se puede presentar en el lugar, lo que ayudaría para la previsión, prevención y mitigación de la zona analizada, lo que lograría disminuir la intensidad de los desastres, tanto económicos como pérdidas

humanas. Para este caso se utilizó el software “Colate detritico” (Bruschi, 2008), que permite conocer la magnitud del evento, área de afectación, velocidad del flujo, entre otros aspectos.

Perfil del arroyo Copales

Para hacer el trazo del arroyo se emplearon coordenadas UTM (INEGI, 1996), iniciando en el parteaguas, se tomó como eje el lecho del arroyo para finalizar en la confluencia con el Río Minatitlán. Se incluyó el ancho del torrente en todo su trayec-

to. Enseguida se introdujo la información al programa, creando el perfil que se muestra en la Figura 7; al principio se presentan pendientes fuertes (superior a 30°), posteriormente empieza a disminuir la pendiente del arroyo hasta llegar al Río Minatitlán (donde termina el perfil). Además la imagen muestra que del punto 1 al 12, se considera la zona de erosión (también lo demuestra la Figura 4), después de este punto inicia la zona de depositación llegando hasta el Río Minatitlán que es donde se pierde (parte final de la Figura 7).

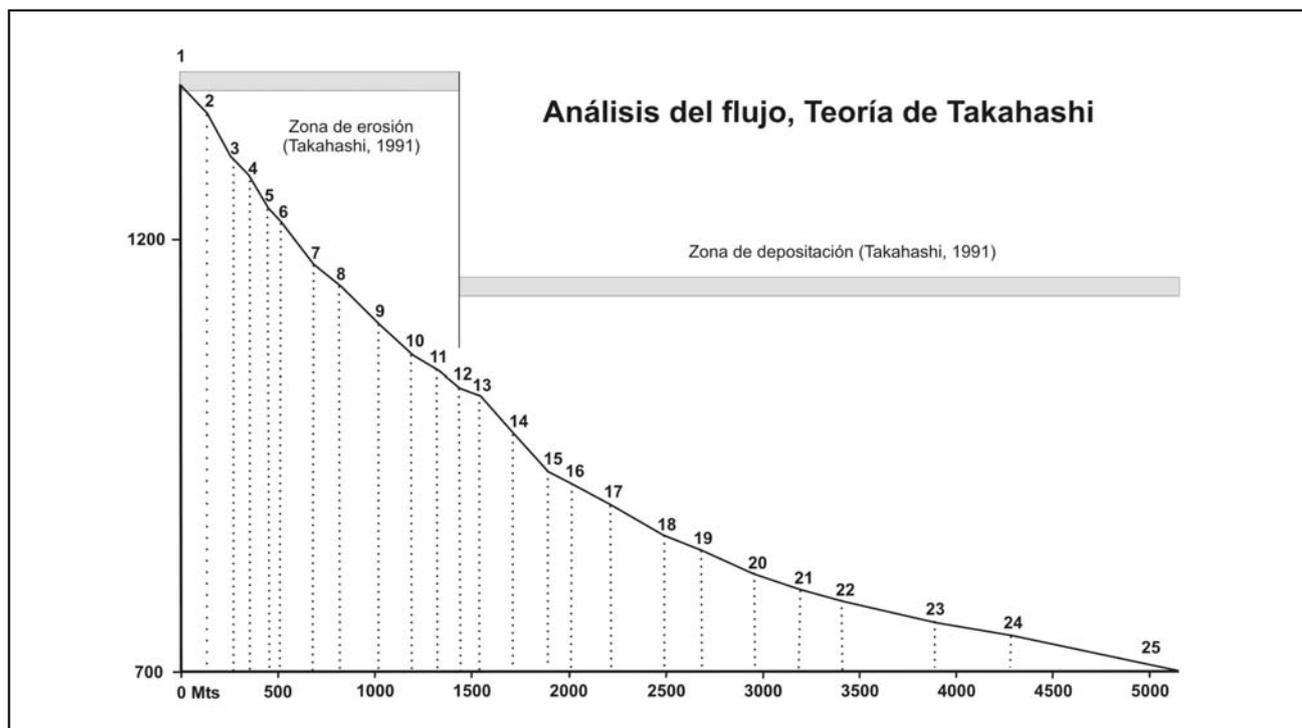


Figura 7. Perfil del arroyo El Bonete (en “y” msnm; en “x” longitud del arroyo), indicando la zona de erosión y la zona de depositación (rectángulo achurado).

Criterios físicos

De acuerdo a los criterios del programa, las condiciones de equilibrio de un afloramiento de material granular se garantiza por la relación que exista entre los elementos normales y las fuerzas inestables, para este caso deben ser menores al ángulo de fricción interna del material. Bruschi (2008) comenta que se puede considerar que un flujo de detritos puede iniciar con pendientes entre 14° y 23°, pero para pendientes mayores a 23° se pueden presentar deslizamientos de materiales en ausencia de un flujo hídrico superficial. De acuerdo a los resultados obtenidos del programa se tiene que el flujo en estudio está clasificado como un flujo de detritos, asimismo para nuestro caso las pendientes del terreno natural superan los 20°.

Velocidad del flujo detrítico

Es importante conocer la aplicación práctica de la velocidad promedio de un flujo de detritos en todo su trayecto, este programa permite hacer dos análisis: el primero, para conocer la altura del frente del flujo y la segunda para conocer la velocidad del flujo. Para tal efecto el programa propone

diferentes fórmulas de algunos autores como: Syanozhetsky (1973), Tsubaki (1981), Li Jian (1983), Rickenmann (1991), Weber y Rickenmann (2000).

Los resultados demuestran una variación en la velocidad del flujo (recordando que son varias propuestas que se analizaron), principalmente en los primeros 2.000 metros del escurrimiento los valores van de 2,00 hasta 3,40 m/s, después de esto se estabiliza (cuando llega a la zona de depositación), obteniendo valores de velocidad de 0,90 a 2,80 m/s. Para el caso en cuestión la velocidad que se elige es la propuesta por Tsubaki, que en la parte de la planicie varía de 2,00 a 0,90 m/s, considerando que es un resultado intermedio y de acuerdo a las características del terreno.

Magnitud del evento

Para conocer la magnitud del desastre se deben considerar ciertos aspectos como: la morfología, hidrología y la geología del torrente, así como del material que puede ser movilizad por el flujo detrítico, además es posible llegar a determinar el área de la conoide de depositación.

La magnitud de un flujo es el volumen máximo de material detrítico movilizado durante el evento, transporte de una masa de material y depositado sobre una conoide (Bruschi, 2008). Este es un dato difícil de cuantificar, pero tiene una gran importancia para estimar el perímetro del área expuesto al peligro.

Por la importancia del estudio se realizó el análisis, considerando información como: inclinación promedio de la microcuenca, litología y tipo de la vegetación de la zona, tipo de inestabilidad del área, cuota probable del inicio del depósito, longitud y ancho probable del flujo, etc. El programa realiza un análisis con once propuestas hechas por diferentes autores, los resultados se presentan en la Tabla 4, observándose que los resultados son muy variados entre ellos, esto basado en los diferentes elementos que considera cada autor.

Analizados cuidadosamente los valores de la Tabla 4 (magnitud del evento), se seleccionaron las propuestas que se muestran en la Tabla 5, lo anterior fundamentado en que están más apegados a la realidad (considerando el trabajo de campo). A su vez con estos valores se hace la propuesta (basado en el trabajo de campo) sobre las dimensiones del flujo de detritos que daño el área en estudio.

De acuerdo a lo analizado en campo y a los resultados que se presentan en la Tabla 5, se optó por elegir los valores de la propuesta de Bianco y Franzi (2000), considerando que son los valores más apegados a la realidad.

Tabla 4. Resultados del cálculo de la Magnitud del evento.

Método	Magnitud de la conoide (m ³)
Takey (1984)	28.793,00
Kyonfellner y Kraus (1985)	150.223,00
Keya (1989)	285.125,00
Rickemann y Zimmermann (1993)	50.611,00
Marchi y Tecca (1996)	239.400,00
Bottino et. al., (1996)	29.971,00
D'Agostini et. al., (1996)	24.126,00
Turconi et. al., (1998)	15.977,00
Ceriani et. al., (2000)	65.166,00
Bianco y Franzi (2000)	19.515,00
D'Agostini y Marchi (2001)	29.630,00

Tabla 5. Resultados de las dimensiones del flujo de detritos que afectó a la población de Minatitlán.

	Takey	D'Agostino et al.	Turconi et al.	Bianco y Franzi	D'Agostini y Marchi
Área del escurrimiento (m ²)	66,00	61,00	49,00	54,00	67,00
Área inundada (m ²)	19.324,00	16.938,00	12.458,00	14.461,00	19.742,00
Altura promedio del detrito (m)	1,49	1,42	1,28	1,35	1,50
Inicio depositación de la colada (msnm)	1.438,00	1.438,00	1.438,00	1.438,00	1.438,00
Longitud total de la colada (m)	2.204,00	2.142,00	2.005,00	2.071,00	2.214,00
Ancho de la conoide (m)	326 a 544	309 a 516	273 a 456	290 a 484	329 a 548
Gasto de pico de la colada (m ³ /s)	445,00	384,00	272,00	321,00	456,00

CONCLUSIONES

El flujo de detritos ocurrido en la población de Minatitlán es un claro ejemplo de los procesos de inestabilidad, debido a la sobresaturación de agua en las grietas de las rocas y la masa deslizante se transforma en un flujo cohesivo capaz de transportar grandes bloques (mayores a un metro de diámetro), por grandes distancias.

De acuerdo a los resultados de la geomorfología, se consideró una microcuenca hidrográfica de 6,31 km², el arroyo El Bonete tiene una longitud de 4,91 km, el arroyo es afluente izquierdo del Río Minatitlán. La erosión más fuerte se produjo en la parte alta, entre los cerros La Otatera y Los Copales, teniendo zonas con pendientes entre el 50° y 30° en la zona de aporte, lo cual es un factor determinante en la formación de flujos de detritos con bloques.

De la caracterización de los suelos se obtuvo que el material corresponde a una arena limosa mal graduada con gravas subángulosas y que tiene una cohesión entre 0 y 8 kg/m² y un ángulo de fricción interna de 38° a 52°. En base a estos datos se estimaron propiedades de campo.

De acuerdo a la simulación realizada y a los resultados obtenidos en campo (comparados con la realidad), se puede concluir que se logró reproducir el fenómeno; por lo tanto se tienen los parámetros adecuados de los cuales depende el fenómeno. De acuerdo a los resultados, la magnitud del flujo de detritos fue de 19.515,00 m³ (material transportado), el área inundada por el flujo fue de 14.461,00 m², la altura promedio del flujo fue de 1,35 m, la longitud del material transportado fue de aproximadamente 2 km, el ancho de la conoide está entre 290 a 484 m y el gasto de pico del flujo de 321,00 m³/s, que coincide con lo observado en campo.

Precipitaciones intensas que se hayan presentado después del flujo y hasta la fecha, no ha habido otro evento igual. Pero ¿qué pasaría si se presentará otro evento igual?. Con la información que se tiene se puede empezar a investigar sobre los distintos escenarios que se presentarían. Desafortunadamente el poblado se volvió a edificar en el mismo sitio, haciendo referencia que este pueblo a finales de 1900 se encontraba asentado en las faldas de los cerros de enfrente (destruido en el pasado por otro un flujo de lodo con bloques) y posterior a esta fecha se trasladó al sitio actual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen ampliamente al CONACYT por el soporte económico (proyecto No. 44275-F) y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Morelia Michoacán) por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARREYGUIE-ROCHA E. AND GARDUÑO-MONROY V.H., 2004.
Characteristic morphologic and geotechnical of the debris flow generated in a volcanic and a sedimentary area during the 1959 cyclone in Michoacan and Colima, Mexico.
32° IGC Internacional Geological Congress. Florence 20–28 August 2004. Pp. 101.
- ASTM D 3080-72.
Test designation standard method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- BERTI M. Y SIMONI A., 2007.
Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships.
Geomorphology 90, Elsevier, 144-161.
- BRUSCHI A., 2008.
Colate detritiche, stima del percorso e della pericolosità.
Dario Flaccovio Editore, p. 183.
- CORONA-ESQUIVEL R., MANCILLA-FIGUEROA H. M., CHÁVEZ-GALVÁN R. Y LUGO-HUBP J., 2002.
El desastre de Minatitlán, Colima México, del martes 27 de octubre de 1959.
Desastres Naturales en América Latina, fondo de cultura económica: 413-427.
- FIORASO G. E CHIARLE M., 1996.
Ruolo dei parametri morfometrici nella valutazione della pericolosità da colata detritica torrentizia.
Consiglio Nazionale delle Ricerche. Convegno Internazionale, Alba Italia. Vol. II, pp. 191-200.
- GARCÍA ÁVILA S., 2007.
Caracterización geotécnica de la matriz del flujo de detritos de 1959 en el poblado de Minatitlán.
Tesis de Maestría, UMSNH. p 119.
- GREGORETTI C., 1999.
Stima della velocità massima del fronte di una colata detritica che si propaga in un alveo torrentizio.
Atti del convegno internazionale "La gestione dell'erosione", Trento-Bolzano, Italia, 127-135.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI), 1996.
Comala E13B34 y Minatitlán E13B33,
escala 1:50,000 México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI), 2004,
Fotografía aérea de Minatitlán,
escala 1:50,000 México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI), 2010.
Población, Territorio, Información por entidad.
- MARACHI D. CHAN C. K., BOLTON SEED H. AND DUNCAN J. M. (1969)
"Strength and deformation characteristics of rock fill materials".
Report No. TE-69-5. Department of Civil Engineering, University of California.
- KOSTASCHUK R.A., MACDONALD G.M. & PUTNAM P.E., 1996.
Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff,
Alberta, Canada-Earth Surface Processes and Landforms, 11, p. 471-484.
- PADILLA LOZOYA R., 2005.
El ciclón de Minatitlán de 1959,
Tesis de Maestría, Universidad de Colima, p. 189.
- PADILLA LOZOYA R., 2006.
El huracán del 59, Historia del desastre y reconstrucción de Minatitlán, Colima,
CONACULTA Editores, p. 43-61.
- OPS, 2000.
Organización Panamericana de la Salud. Crónica de desastres "huracanes George y match 1998".
Washington, D.C.
- SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS (SRH), 1961.
Boletín Hidrológico No. 16, datos de la región Pacífico-Centro.
México, D.F., Dirección de Hidrología.
- SUÁREZ. D.J., 1998.
Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales
Editorial: Universidad Industrial de Santander, UIS, p 1-35.
- UNE103401, 1998.
Determinación de los parámetros de resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo, p. 34.
Norma Española.