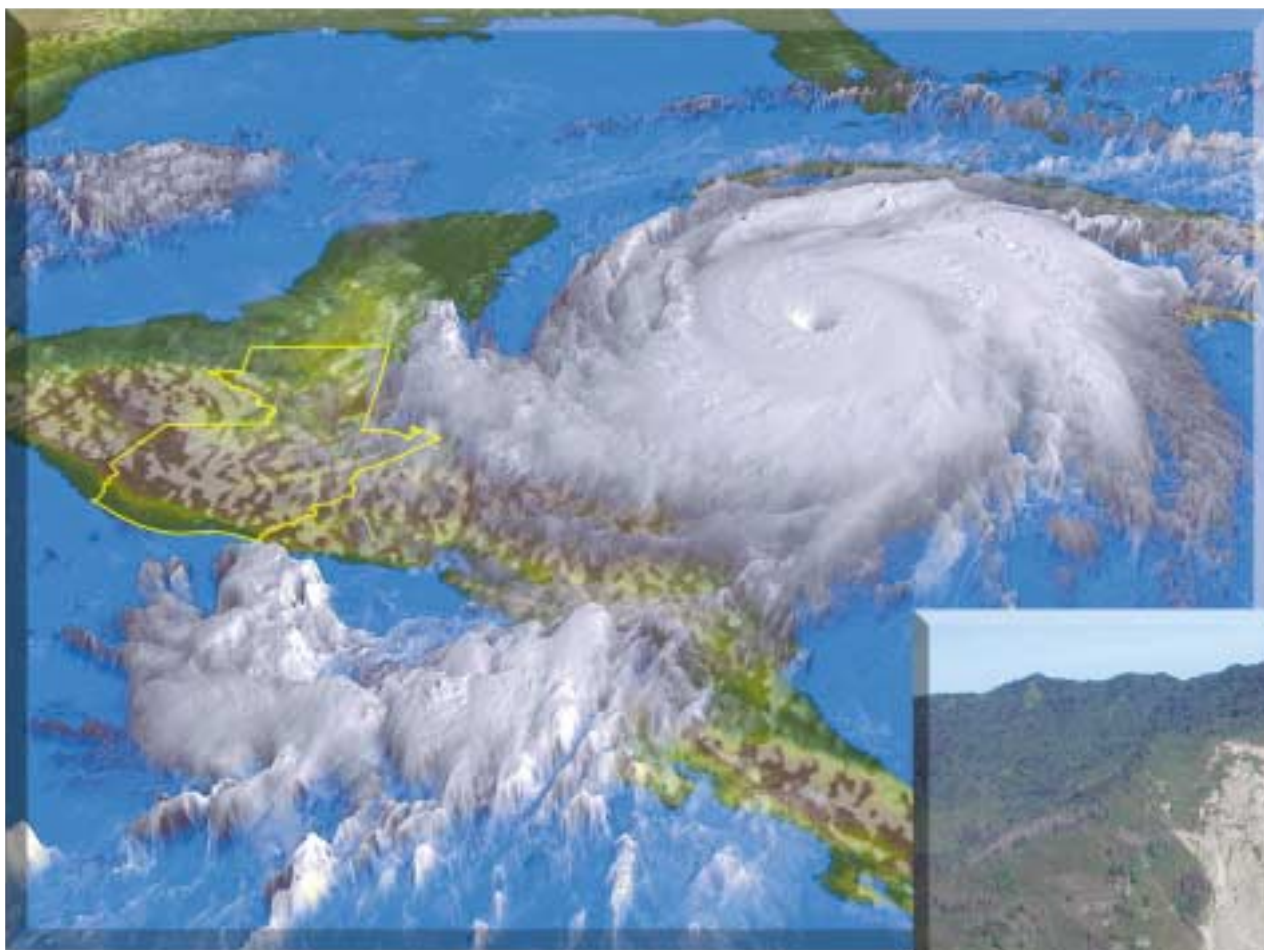


Deslizamientos de Tierra Inducidos por el Huracán Mitch en Guatemala—Inventario y Discusión

por Robert C. Bucknam, Jeffrey A. Coe, Manuel Mota Chavarría, Jonathan W. Godt, Arthur C. Tarr, Lee-Ann Bradley, Sharon Rafferty, Dean Hancock, Richard L. Dart, y Margo L. Johnson



Open-File Report 01-443
(también disponible en inglés)

2001

U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey





Deslizamientos de Tierra Inducidos por el Huracán Mitch en Guatemala—Inventario y Discusión

por Robert C. Bucknam,¹ Jeffrey A. Coe,¹ Manuel Mota Chavarría,² Jonathan W. Godt,¹ Arthur C. Tarr,¹ Lee-Ann Bradley,¹ Sharon Rafferty,¹ Dean Hancock, Richard L. Dart¹ y Margo L. Johnson¹

Este informe está basado en el estudio de cooperación entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos, Denver, Colorado y el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Guatemala, Guatemala. Trabajo financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos para el Programa de Reconstrucción del Huracán Mitch.

Open-File Report 01-443

(también disponible en inglés)

Carátula: Huracán Mitch acercándose a Honduras el 26 de octubre, 1998, 13:15 TCU (26 de octubre, 07:15 hora local). Obsérvese la banda de nubes de lluvia acercándose al este de Guatemala (delineada en amarillo) como a 650 km enfrente del ojo del huracán. La imagen se deriva de datos satelitales de color mejorado y procesados para producir una perspectiva del huracán. Modificado de la imagen producida por Hal Pierce, Laboratory for Atmospheres (Laboratorio para Atmósferas), NASA Goddard Space Flight Center.

Deslizamiento de tierra desatado por el Huracán Mitch el 1 de noviembre, 1998, Río La Lima, Sierra de las Minas, Guatemala.

¹USGS, Denver, Colorado

²INSIVUMEH, Guatemala City, Guatemala

Este informe es preliminar y no ha sido revisado en conformidad con los estándares editorial del Servicio Geológico de los Estados Unidos ni con el Código Estratigráfico Norteamericano. Cualquier uso de cambio, firma o nombre de producto es para propósitos descriptivos solamente y no implica endoso por el Gobierno de Estados Unidos.

2001

**U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey**

RESUMEN

Las lluvias torrenciales que acompañaron al Huracán Mitch en octubre y noviembre de 1998 provocaron miles de deslizamientos de tierra tanto en terrenos de pendiente moderada a terrenos más escarpados en los bordes de los Ríos Motagua y Polochic, al este de Guatemala. Utilizando fotografías aéreas tomadas entre enero y marzo del 2000, pudimos localizar en el mapa todas los deslizamientos de tierra visibles mayores de 15 m en su dimensión mínima en un área de estudio de 10,000 km² abarcando veinte cuadrángulos del mapa topográfico a una escala de 1:50,000.

Las lluvias del Huracán Mitch fueron excepcionales debido a que se difundieron geográficamente, prolongándose por un período de alrededor de una semana, con una intensidad de moderada a fuerte, y ocurrieron al final de la época de lluvia cuando la tierra ya tenía un alto contenido de humedad. Según se documenta en este informe, este tipo de lluvia, en tierra saturada o casi saturada, tiene la capacidad de provocar tanto deslizamientos someros como profundos sobre un área grande.

Localizamos en el mapa alrededor de 11,500 deslizamientos de tierra en el área de estudio. Los deslizamientos localizados en el mapa fueron de dos tipos generales: relativamente pequeños, deslizamientos de tierra traslacionales y rotacionales que comúnmente se movilizaron hacia flujos de escombros y cubrieron áreas de extensión de pocas hectáreas (no incluyendo senderos de flujo); y grandes, deslizamientos comúnmente traslacionales, que algunas veces generaron flujos de escombros y cubrieron entre 15 y 25 hectáreas (no incluyendo senderos de flujos). La principal concentración de deslizamientos de tierra está en laderas con pendientes moderadas a inclinadas sobre unidades geológicas diversas. Para propósitos de describir los deslizamientos de tierra cartografiados, dividimos el área de estudio en cinco regiones distintas basadas en diferencias en las características geológicas y geomórficas. Estas regiones incluyen el valle superior del Polochic y montañas circundantes, la Sierra de las Minas central, las montañas que

rodean La Unión y Zacapa, el lado este de la Sierra de las Minas, y la región fronteriza con Honduras. Todas estas áreas recibieron entre 200 mm y 600 mm de lluvia en un período de 13 días entre el 25 de octubre y el 6 de noviembre. Las mayores cantidades de lluvia (400 mm a 600 mm) ocurrieron en la parte alta del Valle del Polochic y montañas circundantes y en la Sierra de las Minas central. Las menores cantidades de lluvia (200 mm a 400 mm) ocurrieron en las montañas que rodean La Unión, el lado este de la Sierra de las Minas y en la región fronteriza con Honduras. En general, la lluvia recibida en estas áreas es burdamente equivalente a la precipitación promedio recibida en el período de un año.

Utilizamos modelos de elevación digital de 10-m (DEMs) generadas de contornos en dos cuadrángulos en la Sierra de las Minas central para crear un mapa mostrando áreas que fueron susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch, y otro mostrando las áreas susceptibles durante una precipitación uniforme. Para crear el mapa de susceptibilidad del Huracán Mitch, desarrollamos una ecuación de umbral de susceptibilidad basada en la elevación y el gradiente. El análisis indica que, al menos en dos cuadrángulos, los gradientes de menos de 9° no eran susceptibles a deslizamientos durante el Huracán Mitch. La inclinación de la línea definida por la ecuación de umbral indica que se requería de menos precipitación para iniciar deslizamientos de tierra en gradientes empinados que en gradientes someros. Noventa por ciento de los deslizamientos de tierra cartografiados y que fueron desatados por el Huracán Mitch, están dentro de la zona de susceptibilidad mostrada en el mapa. Ochenta y seis por ciento de los deslizamientos de tierra que fueron localizados en el mapa como previos al Huracán Mitch, y todos los deslizamientos de tierra localizados en el mapa como después del Huracán Mitch, están dentro de la zona de susceptibilidad.

Utilizamos el programa LAHARZ para modelar el área potencial río abajo afectada por escombros si llegara a fallar una gran presa originada por grandes deslizamientos de tierra en el Río La Lima. El modelo

muestra que el área afectada sería similar al área que fue afectada por el flujo de escombros que se movilizó de un gran deslizamiento de tierra a lo largo del Río La Lima durante el Huracán Mitch.

Las características de los deslizamientos de tierra desatados por precipitación descritas en este informe pueden ser utilizadas como una guía parcial para actividades futuras de deslizamientos de tierra desatados por tormentas. En base a datos existentes, las áreas en peligro incluyen: laderas con pendientes moderadas a empinadas y áreas menos empinadas directamente debajo de estas laderas, canales de drenaje ladera abajo de laderas con tendencia a deslizamientos, y abanicos aluviales en la boca de drenajes a lo largo de frentes de montañas o laderas. La evidencia para, y la frecuencia de, deslizamientos de tierra pasados en sitios individuales pueden ser utilizados para determinar el nivel de peligro futuro. Esto es, la evidencia de actividad pasada de deslizamientos de tierra, es el mejor indicador de una futura actividad de deslizamientos de tierra. Por esta razón, los mapas de inventario de deslizamientos

de tierra que muestran deslizamientos de tierra Cuaternarios, históricos y modernos son de importancia crítica y deberán seguirse compilando.

Herramientas útiles para predecir la ocurrencia de deslizamientos de tierra desatados por precipitación en áreas pobladas son los umbrales de intensidad/duración de precipitación. Datos nuevos y existentes sobre precipitación y deslizamientos de tierra podrían ser utilizados para desarrollar dos umbrales para Guatemala, uno para flujos de escombros desatados por estallidos intensos de precipitación, y otro para deslizamientos de tierra profundos inducidos por precipitación prolongada.

INTRODUCCIÓN

El Huracán Mitch, uno de los huracanes del Atlántico más fuertes en la historia, comenzó como una depresión tropical al oeste del Mar Caribe el 22 de octubre de 1998, y se convirtió en un huracán dos días después a varios cientos de kilómetros al sur-suroeste de Jamaica. El huracán se

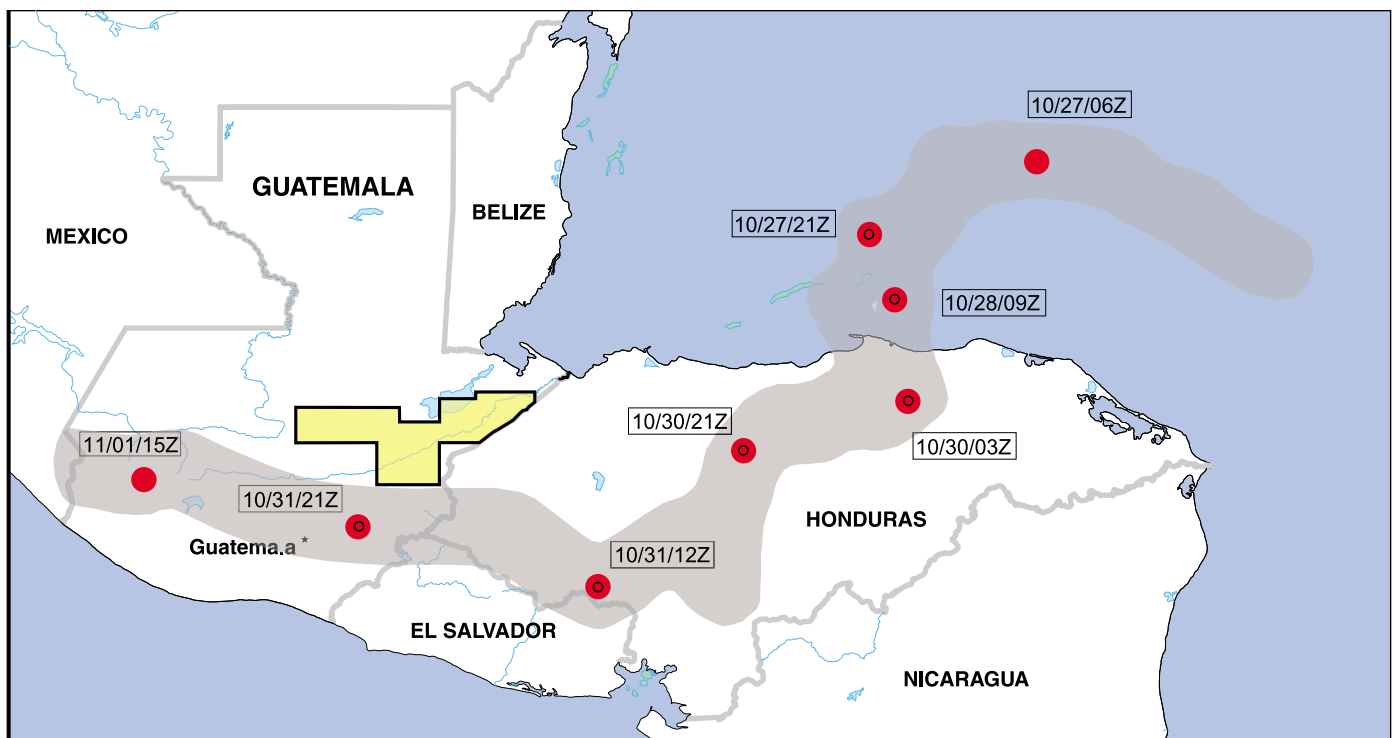


Figura 1. Trayectoria del Huracán Mitch a través del Caribe occidental y Centroamérica, 26 de octubre al 1 de noviembre, 1998 (coordenadas del Centro Nacional de Huracanes). Los círculos rojos grandes muestran lugares de baja presión del ojo del huracán en la fecha y tiempo indicados; el tiempo (Z) es Tiempo Coordinado Universal. El polígono amarillo es el área de este estudio.

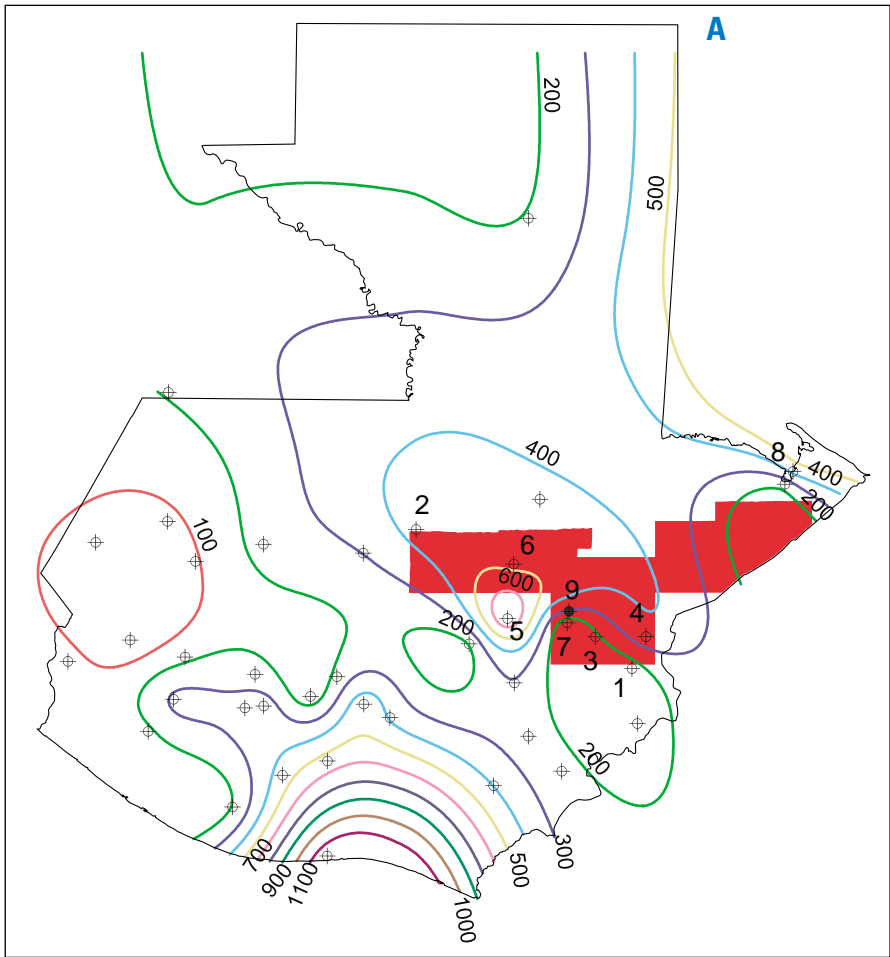
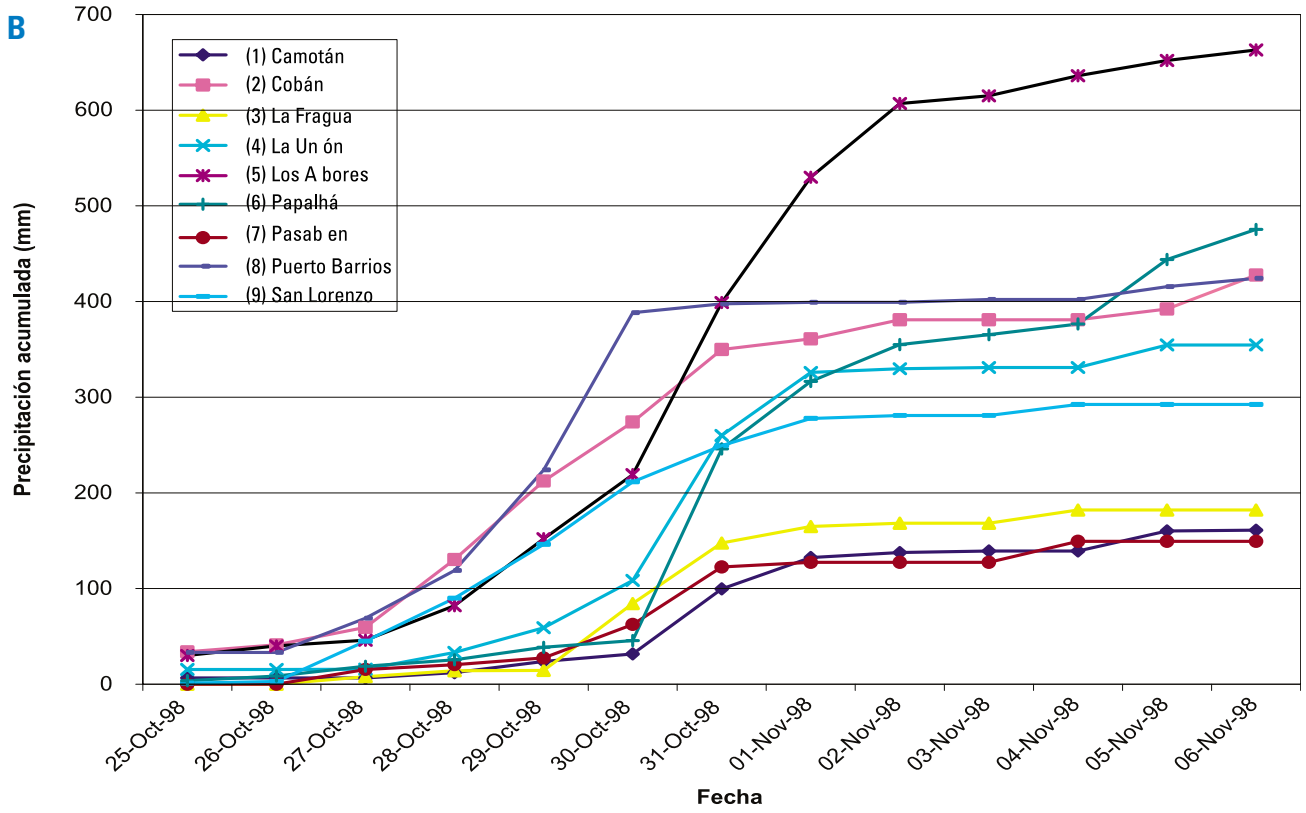


Figura 2.A. Distribución de la precipitación del Huracán Mitch en Guatemala para estaciones de la red meteorológica regional del INSIVUMEH (círculos abiertos con cruces) para el período del 25 de octubre – 6 de noviembre, 1998, y estación San Lorenzo del INDE (círculo sólido con cruz). Los numeros contiguos a los símbolos se refieren a las estaciones mostradas en figura 2B.



B. Precipitación acumulada en estaciones meteorológicas del INSIVUMEH y del INDE en y adyacentes al área de estudio de deslizamientos de tierra-inventarios para el período del 25 de octubre – 6 de noviembre, 1998.

intensificó rápidamente, y para el 26 era un huracán de categoría 5 con velocidades del viento de superficie sostenidas máximas estimadas a 290 km por hora y ráfagas de más de 320 km por hora (Lott y otros, 1999). Para el 27 de octubre, el Huracán Mitch comenzó a debilitarse y tocó tierra en la costa norte de Honduras en la mañana del 29 de octubre, pero la extensa y fuerte precipitación que cayó antes del ojo del huracán (fig. 1) ya había causado extensos daños en Honduras, Nicaragua, Guatemala y El Salvador debido a inundaciones y deslizamientos de tierra. Para el 30 de octubre, el Huracán Mitch se había debilitado a una tormenta tropical, y para el siguiente día se había convertido en una depresión tropical (Guiney y Lawrence, 1998). La precipitación generada por el Huracán Mitch afectó el sur de Guatemala entre el 27 de octubre y el 1 de noviembre (fig. 2). La circulación de la superficie debido a la tormenta se disipó cerca de la frontera Guatemala / México el 1 de noviembre, pero la lluvia intensa local continuó sobre Centroamérica durante los siguientes días (Guiney y Lawrence, 1998).

Las medidas de la cantidad de lluvia que cayó durante la tormenta son escasas, particularmente en altas elevaciones en regiones montañosas donde típicamente estaban ausentes los pluviómetros y los efectos orográficos probablemente incrementaron la cantidad de precipitación. Sin embargo, los registros de redes regionales en Centroamérica muestran cantidades de precipitación de la tormenta tan altas como 1612 mm, registradas entre el 21 y el 31 de octubre, en la región oeste de Nicaragua cerca de la costa Pacífica (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1998). Hellin y Haigh (1999) reportan 896 mm entre el 27 y el 31 de octubre de una estación al sur de Honduras, y en Guatemala, la estación en el Puerto de San José en la Costa Pacífica registró 1069 mm entre el 25 de octubre y el 1 de noviembre, 1998 (fig.2). Las fuertes lluvias al este de Guatemala, iniciaron alrededor del 27 de octubre en asociación con bandas de lluvia a 650 km adelante del ojo del huracán (vea la carátula del informe). La precipitación en Guatemala fue muy

variable; entre el 25 de octubre y el 6 de noviembre, se registró 1069 mm en el Puerto de San José en la costa Pacífico, 633 mm fueron registrados en un sitio en lo alto de la montaña en la Sierra de las Minas, y 182 mm fueron registrados en el Valle del Motagua (fig. 2).

Impactos en Guatemala

Las intensas lluvias del Huracán Mitch produjeron deslizamientos de tierra e inundaciones en Guatemala que causaron daños extensos a infraestructura, y, a pesar de evacuaciones preventivas de más de 100,000 personas en alto riesgo, se estima que ocurrieron 268 fatalidades (Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional, 1999). El daño a la infraestructura incluyó 53 puentes dañados y 68 destruidos, 90 secciones de calles afectadas y 2,293 casas fueron destruidas, y 19,332 fueron dañadas. Hubo daño extenso en áreas agrícolas productivas y en los caminos y senderos que comunicaban a las fincas con los mercados. La agricultura fue impactada fuertemente, con 90,000 hectáreas (ha) de pérdidas en granos básicos, café, vegetales y banano. Las facilidades para pequeñas producciones en el procesamiento de café también fueron seriamente afectadas. El Gobierno de Guatemala y las Naciones Unidas estimaron los costos de rehabilitación y reconstrucción en US\$550 millones.

Mucho del daño de los deslizamientos de tierra a la agricultura y caminos fue en el terreno inclinado que bordea a los Ríos Motagua y Polochic. Sin embargo, incluso meses después del huracán, se sabía o se documentó muy poco sobre la naturaleza y distribución de los deslizamientos de tierra, y muchas áreas permanecen expuestas a deslizamientos de tierra debido a períodos futuros de precipitación fuerte sostenida. Bajo el Programa de Reconstrucción del Huracán Mitch de la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en colaboración con el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) emprendió el

desarrollo de un inventario comprensivo de deslizamientos de tierra por medio de un mapeo a escala moderada de un área grande (20, cuadrángulos a escala 1:50,000) adyacentes a los Ríos Motagua y Polochic (fig. 3). Estos mapas proveen un registro detallado de deslizamientos de tierra sobre una gran área geográfica (como 10,000 km²) de geología, geomorfología, microclimas y vegetación diversa. Si se combinan con datos sobre las propiedades físicas de los materiales de las pendientes, forma de las pendientes y características de la precipitación, estos mapas pueden proveer un fundamento para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra de otras áreas similares.

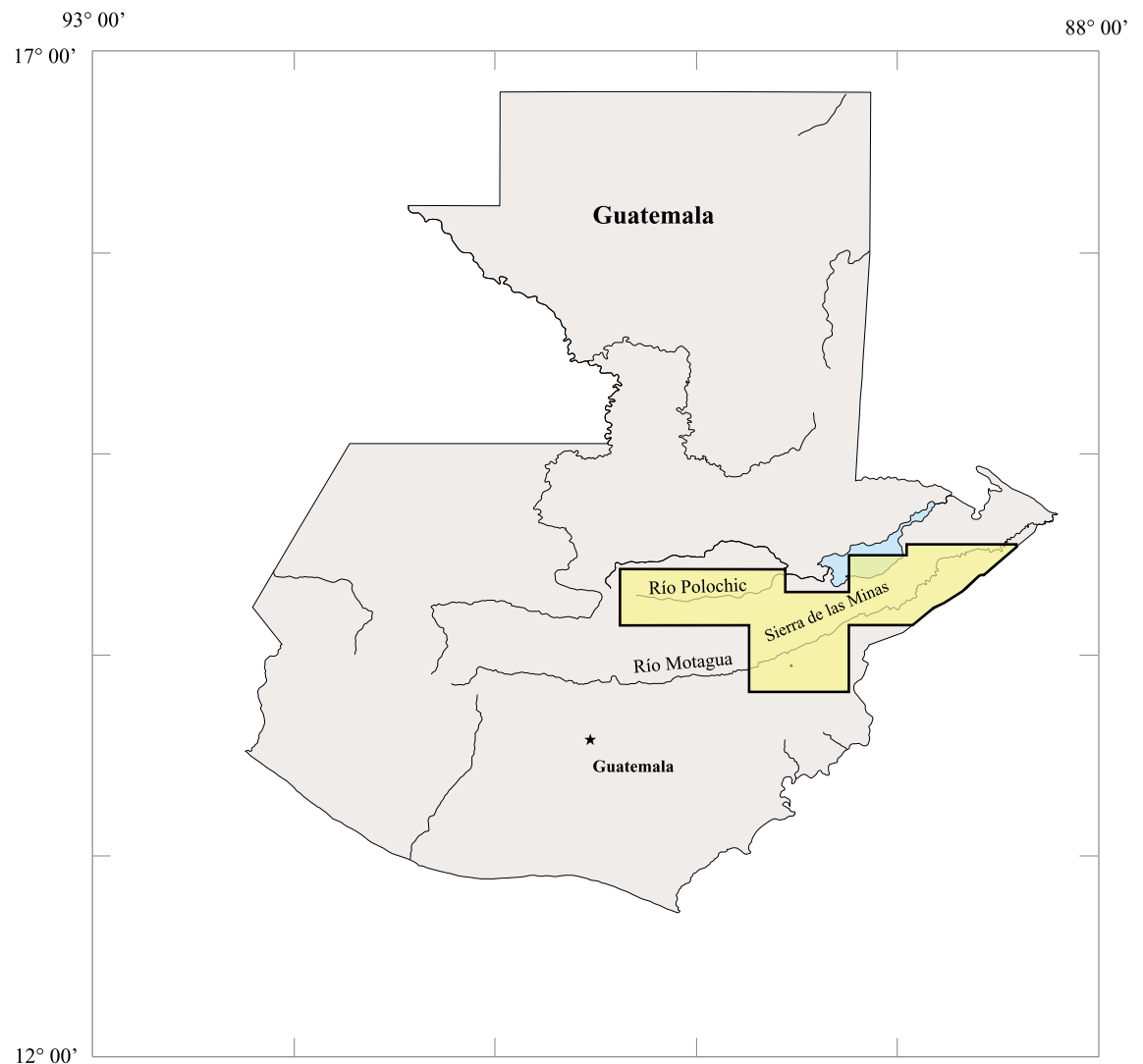
Ambiente Geológico y Geográfico

El área de estudio abarca el terreno montañoso escarpado que bordea los Ríos

Motagua y Polochic en la parte este-central de Guatemala (fig. 3). La Sierra de las Minas con dirección este-nordeste, situada entre los dos ríos se eleva desde una elevación de aproximadamente de 10 m en el Río Polochic y de 200 m en el Río Motagua hasta una elevación de 2948 m en la cresta de la sierra sur del Río Polochic. Hacia el norte del Río Polochic, el terreno se eleva más de 1800 m hasta una planicie cárstica alta con inclinación norte con unos picos esparcidos con elevación hasta de 2540 m.

Los Ríos Polochic y Motagua siguen la tendencia general de los sistemas de fallas del Motagua y del Polochic, dos fallas sub-paralelas laterales izquierdas que marcan el límite entre la placa de Norte América al norte y la placa del Caribe al sur. Las rocas metamórficas paleozoicas son el tipo de roca predominante en la parte central de la

Figura 3. Mapa índice del área de mapeo del inventario de deslizamiento de tierra.



Sierra de las Minas; las rocas clásticas y carbonáticas son el tipo de roca dominante en la parte este de la sierra (Bonis y otros, 1970).

Los centros poblacionales y las carreteras están concentrados en los valles del Motagua y del Polochic. Las dos carreteras más importantes en la región son la CA9 en el valle del Motagua y la Ruta Nacional 7W en el valle del Polochic. Estas dos carreteras con dirección este-oeste unen centros poblacionales y áreas agrícolas con Puerto Barrios, el principal puerto en el Mar Caribe. Ambas carreteras fueron cerradas por deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch, y la carretera CA9 fue cerrada nuevamente por un flujo de escombros en 1999. Los caminos secundarios y los senderos de fincas en los flancos de las sierras que bordean a los Ríos Motagua y Polochic son rutas importantes de comunicación con comunidades pequeñas y para el transporte de productos agrícolas. Los deslizamientos de tierra desatados por Mitch cortaron muchas de estas rutas.

Terminología General de Deslizamientos de Tierra

Utilizamos el término "deslizamiento de tierra" para describir todos los tipos de fallas gravitacionales de ladera: deslizamientos rotacionales y traslacionales, flujos de tierra de movimiento lento, (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996), y flujos de escombros de movimiento rápido compuestos de lodo, grava (hasta grandes bloques de roca) y escombros orgánicos que frecuentemente se movilizan de los deslizamientos de tierra (Ver Pierson y Costa, 1987, para la clasificación de flujos de movimiento rápido). La mayoría de los deslizamientos de tierra cartografiados fueron flujos de escombros. Los flujos de escombros típicamente ocurren en respuesta a períodos de precipitación intensa. Se inician como deslizamientos rotacionales o traslacionales que se movilizan hacia lechadas lodosas, o a partir de una erosión concentrada significativa del material de la superficie debido a la escorrentía superficial.

A medida que viajan por laderas y por canales, las lechadas pueden incrementar

sustancialmente su volumen incorporando adicionalmente coluvión, material del relleno del canal, y agua. La adición de suficientes volúmenes de agua con relación al contenido de sedimento también puede resultar en dilución del flujo de escombros hasta una consistencia normal de flujo de arroyo. Los flujos de escombros pueden ocurrir con poca advertencia y son capaces de transportar escombros gruesos (algunos de 5 m o más en su dimensión más larga) grandes distancias sobre laderas de pendientes relativamente suaves. Los flujos de escombros pueden desarrollar momento así como fuerzas de impacto que pueden causar destrucción considerable. Como resultado de estas características, la reducción de las amenazas por flujos de escombros puede ser más difícil que la reducción de las amenazas por inundaciones.

MÉTODOS

Se utilizaron versiones digitales de mapas topográficos de Guatemala a escala 1:50,000 como mapas base para la compilación fotogramétrica y la presentación de los datos de los deslizamientos de tierra. Los datos digitales para la mayoría de cuadrángulos fueron proveídos por la Agencia Nacional de Imágenes y Mapeo (NIMA, por sus siglas en inglés), que registró digitalmente los mapas topográficos publicados, y las imágenes registradas, se convirtieron a una proyección equirectangular (una proyección no-acorde; vea Snyder, 1987), y combinó las imágenes en mosaicos que fueron proveídos por USGS. Versiones digitales de unos pocos cuadrángulos para los cuales existían mapas base más nuevos que aquellos proveídos por NIMA fueron preparados por USGS o un vendedor comercial registrando las versiones publicadas más recientes de los cuadrángulos y georeferenciando las imágenes registradas a las mismas proyecciones y datos de los mapas publicados.

Los mapas de inventario de deslizamientos de tierra se basan en la interpretación de las fotografías aéreas en blanco y negro a escala 1:40,000 tomadas

Las fotografías aéreas utilizadas en este estudio están disponibles en:

U.S. Geological Survey
EROS Data Center

Attn: Ron Risty
47914 252 Street
Sioux Falls, SD 57198

Telephone:
605 594-6969

E-mail: risty@usgs.gov

<http://mitchnts1.cr.usgs.gov/data/aerial.html>

entre el 14 de enero y el 6 de marzo, 2000. La definición del área cubierta por fotografías aéreas para cartografía se basó en un reconocimiento en helicóptero de la región en septiembre 1999 por el USGS y el INSIVUMEH. Las fotografías aéreas fueron tomadas como parte de un programa de cooperación de revisión de mapas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y NIMA. La cubierta nubosa en las fotografías fue mínima excepto por unas pocas fotografías en las que las nubes cubrían casi 40 por ciento de la imagen. En los mapas donde existen áreas oscurecidas por nubes, se muestra el contorno aproximado del área cubierta.

En áreas en las que la concentración de deslizamientos de tierra fue de moderada a alta, se utilizó un restituidor fotogramétrico Kern PG-2 para cartografiar los deslizamientos de tierra. El restituidor PG-2 es tradicionalmente utilizado para crear mapas topográficos, pero también tiene muchas aplicaciones geológicas (Pillmore, 1989). El restituidor es un instrumento óptico-mecánico de alta resolución que hace posible ver fotografías aéreas estereoscópicamente ampliadas 2, 4 y 8 veces. El restituidor tiene un marcador iluminado que está mecánicamente unido a un lápiz montado en un brazo sobre un mapa base. Las fotografías en el PG-2 son registradas en un mapa base utilizando marcas topográficas o culturales prominentes. Una vez registradas, las características visibles en las fotografías pueden dibujarse en el mapa base trazando las características en el mapa mientras se observa estereoscópicamente el marcador iluminado en las fotografías.

Se cartografiaron los deslizamientos de tierra de las fotografías a escala 1:40,000 sobre una cubierta transparente de poliéster registradas a escala 1:50,000 ó 1:25,000 (mapas base ampliados 2 veces). Las fotografías fueron tomadas entre enero y marzo del 2000; por lo tanto, todos los deslizamientos de tierra localizados en el mapa ocurrieron antes de esta fecha. La escala de la fotografía nos permitió identificar con exactitud y cartografiar

características de deslizamiento de tierra pequeños de hasta aproximadamente 15 m de ancho. Cada deslizamiento de tierra que se muestra incluye un escarpe en la cabeza del deslizamiento de tierra, un sendero de viaje ladera abajo, y los depósitos resultantes. Los deslizamientos de tierra fueron cartografiados como causados por el Huracán Mitch si las características parecen ser frescas, esto es, sin vegetación. Los deslizamientos de tierra del Huracán Mitch típicamente parecen como cicatrices blancas que contrastan fuertemente con la superficie adyacente de tierra más oscura, con vegetación. Los deslizamientos de tierra que fueron significativamente más oscuros en tono y que parecen tener alguna vegetación, pero que todavía parecen ser relativamente frescos, fueron cartografiados como deslizamientos de tierra pre-Huracán Mitch. En el caso del cuadrángulo Río Hondo (hoja 9), se cartografió un grupo de deslizamientos de tierra como post-Huracán Mitch porque un gran flujo de escombros en el drenaje debajo de los deslizamientos de tierra cerró una carretera importante el 17 de septiembre, 1999, casi un año después del Huracán Mitch. En algunos cuadrángulos, también se cartografiaron depósitos frescos de inundaciones a lo largo de ríos y drenajes tributarios principales. En general, el alcance de los depósitos de flujo de escombros corriente abajo, no se conoció, y los efectos de la tormenta cartografiados en los canales tributarios de los ríos son probablemente una mezcla de depósitos de flujo de escombros, áreas de material removido de los canales, y depósitos de inundaciones.

En áreas donde la concentración de deslizamientos de tierra fue escasa, fue más eficiente respecto al tiempo utilizar un estereoscopio de espejo de escritorio para localizar en el mapa los deslizamientos de tierra. Utilizando el estereoscopio, las fotografías fueron vistas estereoscópicamente a una ampliación de 3 veces. Los bosquejos de los deslizamientos de tierra fueron transferidos de las fotografías a los mapas base por inspección visual; esto es, se identificaron los deslizamientos de tierra en las fotografías, se

encontró la localización de los deslizamientos de tierra en el mapa, y manualmente se dibujó el bosquejo de los deslizamientos de tierra en el mapa. Como en el mapeo con el restituidor fotogramétrico, se cartografiaron fotografías a escala 1:40,000 hacia mapas base a escala 1:50,000 o 1:25,000 en acetatos transparentes. En general, solamente los deslizamientos de tierra del Huracán Mitch y los depósitos de inundaciones (según lo definido arriba) fueron localizados en el mapa con el estereoscopio de espejo.

Exactitud

La exactitud de los deslizamientos de tierra cartografiados es comparable con la exactitud de los mapas topográficos a escala 1:50,000 utilizados como mapas base. Cuando se traslada a escala el modelo fotogramétrico a los mapas topográficos, encontramos que algunas características, tales como el curso de algunos arroyos, fueron generalizados o simplificados en los mapas. Debido a que versiones digitales de nuestros mapas de deslizamientos de tierra podrían ser transferibles en el futuro a mapas base revisados y posiblemente más exactos, no modificamos nuestro mapeo para coincidir con desviaciones locales de los mapas topográficos base.

Un ejemplo conspicuo de inexactitud en el mapa base se muestra en el cuadrángulo Juyama (hoja 18) en UTM 294,400 m E, 1,684,600 m N. Lo que se muestra en el mapa base como un arroyo simple en realidad corresponde a dos arroyos separados por una estrecha divisoria de drenaje. El deslizamiento de tierra y sus depósitos río abajo que parecen escalar montaña arriba desde el drenaje, en realidad se mantienen dentro de un drenaje paralelo lateral que no se muestra en el mapa base.

Los mapas muestran con exactitud la forma, tamaño, y localización relativa de los deslizamientos de tierra y los depósitos de canal relacionados ubicados ladera abajo. Sin embargo, en algunos puntos, los depósitos de canal mostrados en el mapa no están bien alineados con los drenajes como se muestra en los mapas base. Esto puede deberse a:

(1) diferencias entre el trazado generalizado de los drenajes en los mapas base y la cartografía detallada de los depósitos de canal de los deslizamientos de tierra (según lo descrito arriba),

(2) cambios en el curso de los arroyos desde el momento en que fueron hechos los mapas base,

(3) control topográfico insuficiente localmente para registrar con exactitud las fotografías aéreas a los mapas base,

(4) mejor exposición del curso de los drenajes en algunas áreas altamente vegetadas limpiando árboles desde que fueron preparados los mapas base..

Considerando todos estos errores potenciales de trazado, estimamos que la localización de los deslizamientos de tierra cartografiados utilizando el restituidor PG-2 son típicamente exactos dentro de 50-100 m. Se estima que la localización de los deslizamientos de tierra que fueron cartografiados utilizando un estereoscopio de espejo son exactos dentro de aproximadamente 200 m.

Procesamiento Digital de Datos

Los datos digitales que comprenden cada mapa están públicamente disponibles como archivos de datos de ArcInfo Export. Los enlaces a los archivos están dados en <http://mitchnts1.cr.usgs.gov/data/landslide.html>. Cada mapa puede tener hasta cuatro capas de datos asociados con él además de la capa que muestra los deslizamientos de tierra desatados por el Huracán Mitch. Los datos adicionales incluyen (1) nubes en las fotografías aéreas que oscurecieron la superficie de la tierra, (2) el límite y el método de mapeo, (3) deslizamientos de tierra interpretados como que ocurrieron antes del Huracán Mitch, (4) deslizamientos de tierra que ocurrieron después del Huracán Mitch en septiembre de 1999, y (5) localización de la iniciación de los deslizamientos de tierra. Los lugares de iniciación de deslizamientos de tierra son puntos que fueron digitalizados en la parte

ladera arriba de cada polígono de deslizamiento de tierra. Se asume que estos puntos son lugares de iniciación de deslizamientos de tierra y a través del informe son llamados así. Cada archivo de datos tiene un nombre de archivo alfanumérico. Los dos caracteres que inician el nombre del archivo indican las características que contiene el archivo (vea

tabla 1), y el código numérico de cinco dígitos corresponde a uno de los 20 cuadrángulos (vea tabla 2). Por ejemplo, el archivo llamado ls22612.e00 contiene los deslizamientos de tierra desatados por el Huracán Mitch ('ls') para el cuadrángulo de Río Hondo ('22612'). El sufijo ('.e00') lo identifica como un archivo ArcInfo Export.

Tabla 1. Información sobre los archivos de datos de ArcInfo disponibles en <http://mitchnts1.cr.usgs.gov/data/landslide.html>. Las columnas individuales son descritas en el texto.

Identificador de archivos	Tipo de Característica	Atributo	Valor
'ls'	Deslizamiento de tierra desatado por el Huracán Mitch	LS	0 ó 1
'ols'	Característica de un deslizamiento de tierra antiguo	LS	0 ó 1
'yls'	Deslizamiento de tierra que ocurrió después del Huracán Mitch	LS	0 ó 1
'ip'	Lugar de iniciación del deslizamiento de tierra	-	-
'cl'	Nubes	-	-
'mm'	Método y límite de mapeo	MM	espejo, restituidor, no localizado en el mapa

Tabla 2. Índice uniendo los nombres de los cuadrángulos y números de hoja a códigos de archivos digitales.

Nombre del Cuadrángulo	Número de hoja	Código numérico	Archivos disponibles
Cobán	1	21623	'ls, ols, ip, mm'
Tactic	2	21614	'ls, ols, ip, mm'
Caquipec	3	21622	'ls, ip, mm'
Tucurú	4	21611	'ls, ip'
Senahú	5	22623	'ls, ols, ip, cl, mm'
La Tinta	6	22614	'ls, ols, ip'
Panzós	7	22622	'ls, ols, ip, mm'
Pueblo Viejo	8	22611	'ls, ols, ip, cl, mm'
Río Hondo	9	22612	'ls, ols, yls, ip'
Zacapa	10	22601	'ls, ip, mm'
Sierra de las Minas	11	23614	'ls, ols, ip, cl, mm'
Gualán	12	23613	'ls, ip, mm'
La Unión	13	23604	'ls, ols, ip, mm'
Mariscos	14	23622	'ls, ip'
Los Amates	15	23611	'ls, ip, cl, mm'
Castillo San Felipe	16	24624	'ls, ols, ip, mm'
Morales	17	24623	'ls, ip'
Juyamá	18	24614	'ls, ip, cl, mm'
Entre Ríos	19	24621	'ls, ols, ip, mm'
Cerro Caral	20	24622	'ls, ip, cl, mm'

Las características trazadas fueron convertidas a datos de vector digital en un Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) ArcInfo ya sea por digitalización manual o por medio de un registrador óptico. Estos datos fueron recortados en la frontera del cuadrángulo y editados manualmente para construir topología y en pocos casos para corregir errores de localización. Las características de los deslizamientos de tierra son representadas como polígonos y llevan un único atributo (LS) indicando si la característica es un deslizamiento de tierra (atributo = 1) o un área dentro del polígono del deslizamiento de tierra que parecía no estar afectado (atributo = 0, vea tabla 1). El método y los límites del mapeo son representados por polígonos que acarrean un único atributo (MM) indicando que las características del deslizamiento de tierra dentro del polígono fueron cartografiadas con un restituidor estéreo (= restituidor) fotogramétrico o con un estereoscopio de espejo (= espejo). Si el límite del área de estudio cae dentro de un cuadrángulo, al polígono que define la parte no cartografiada se le atribuye MM = no cartografiados.

Para preparar los mapas, los datos del vector digital fueron ensamblados en ArcMap 8.1 corriendo en una estación de trabajo Windows y fueron exportados como archivos Postscript Encapsulados (eps). El mapa base para cada hoja es una imagen ópticamente registradas del mapa de papel a escala 1:50,000 publicado que fue georeferenciado a las coordenadas del mapa de cada cuadrángulo. Una imagen georeferenciada mantiene una relación entre las "grillas" de la imagen y las coordenadas de la página del mapa planar. Las imágenes del mapa base fueron corregidas por color y clarificadas utilizando Adobe Photoshop 6.0 corriendo en una Windows Workstation. Las gráficas finales del mapa fueron ensambladas en Adobe Illustrator 9.0 corriendo bajo MacOS 9.0 y están disponibles en línea como archivos Adobe Portable Document (.pdf).

Resolución a escala del mapa

La escala 1:50,000 de los mapas base limita la resolución de nuestro mapeo. Por ejemplo, utilizando una mina de grafito cuidadosamente afilada en el restituidor fotogramétrico para cartografiar el contorno de los deslizamientos de tierra se produce una línea de cómo 0.1 mm de ancho, y a medida que la mina de grafito se gasta, la línea comúnmente incrementa hasta 0.2-0.3 mm de ancho. En un grosor de línea de 0.3 mm, las características de menos de 15m de ancho no pueden mostrarse sin exageración, y esto representa el límite inferior típico del tamaño de las características mostradas en los mapas.

Observaciones de Campo

Conducimos varios reconocimientos de chequeo de campo (tanto aéreas como terrestres) de nuestro mapeo fotográfico aéreo. El propósito de las observaciones de campo era proveer comparaciones entre las características de los deslizamientos de tierra observados en las fotografías aéreas y sus características observadas en niveles más bajos desde el aire y en tierra, para verificar la totalidad y las interpretaciones del mapeo, obtener mediciones de materiales y otras características que no pueden ser obtenidas de las fotografías aéreas, y obtener relatos de testigos de los eventos de deslizamientos de tierra. Las observaciones de campos sobre el terreno, fueron limitadas a alguna docena de sitios remotos de deslizamientos de tierra que tenían áreas de aterrizaje adecuadas para un helicóptero y lugares que tenían acceso cercano por una carretera o por un camino para un vehículo todo terreno.

Entereza

En las áreas que hemos investigado, estimamos que los mapas muestran más de 95 por ciento de los deslizamientos de tierra mayores de 15 m en su dimensión menor, excepto en laderas muy empinadas o en áreas altamente forestadas. En laderas muy empinadas, el ángulo de visión cerca de los márgenes de las fotografías aéreas puede ser casi paralela a la superficie de la tierra, y los deslizamientos de tierra en esos casos

pueden no ser visibles en las fotografías. En áreas altamente reforestadas, los pequeños deslizamientos de tierra, pueden estar oscurecidos por la bóveda forestal, y la habilidad para ver deslizamientos de tierra mayores es una relación compleja entre la geometría de la fotografía aérea, la altura y la densidad de la bóveda forestal, y la dirección y cantidad de gradiente de inclinación de la superficie terrestre. En el punto principal (centro) de una fotografía aérea a escala 1:24,000, Pyles y Froehlich (1987) calcularon que un deslizamiento de tierra necesitaría ser de 30 m de un lado (1 ha) para ser visible. A la orilla de la fotografía, un deslizamiento de tierra en una ladera de pendiente de 39° (80 por ciento) al otro lado del punto principal necesitaría ser de 100 m de un lado (1 ha) para ser igualmente visible. El estudio de Pyles y Froehlich (1987) mostró que sin conocimiento de la verdadera densidad de los deslizamientos de tierra en áreas altamente reforestadas, los mapas de los deslizamientos de tierra no pueden ser utilizados para sacar inferencias sobre el impacto de la limpieza de bosques en la ocurrencia de los deslizamientos de tierra del Huracán Mitch, o por extensión, otros eventos similares de alta precipitación.

PRECIPITACIÓN

La precipitación intensa y/o prolongada es un disparador principal para los flujos de escombros y deslizamientos de tierra. Estudios en ambientes templados y tropicales húmedos han mostrado que hay un umbral en la relación entre la intensidad y la duración de la precipitación para los deslizamientos de tierra desatados por lluvias tormentosas (Caine, 1980; Cannon, 1988; Larsen y Simon, 1993). La precipitación de alta intensidad y corta duración comúnmente desata deslizamientos de tierra someros y flujos de escombros. La precipitación de larga duración y baja intensidad comúnmente produce deslizamientos de tierra grandes y profundos, tales como avalanchas y derrumbes de escombros (Larsen y Simon, 1993). En Guatemala, el Huracán Mitch produjo deslizamientos de tierra típicos

tanto de lluvias de alta intensidad y corta duración, como de precipitación de larga duración y baja intensidad. Los deslizamientos de tierra pequeños cartografiados en este estudio seguramente son el resultado de células de tormenta severa locales que se formaron durante el paso del Huracán Mitch, mientras que los deslizamientos de tierra grandes y profundos fueron el resultado de lluvia prolongada durante el paso aproximado de 6 días del Huracán Mitch a través de Guatemala.

Características Generales de la Precipitación en Guatemala

El área de estudio abarca un amplio rango de precipitación, donde la mayoría cae en la estación lluviosa de mayo a octubre, cuando el área recibe del 80-90 por ciento de su precipitación anual (Portig, 1976). Un mapa regional de precipitación de Centroamérica muestra los totales anuales en el área general de este estudio que abarcan desde menos de 100 mm/año en las elevaciones bajas a lo largo y sur del Río Motagua, al oeste de Zacapa (fig. 3), y de 200-300 mm/año en la parte este de esta área de estudio (Portig, 1976), hasta un estimado mayor a 600mm/año en la Sierra de Santa Cruz al norte del Río Polochic. En el estudio de Portig (1976), faltaban datos de las Sierra de las Minas y pueden resultar efectos orográficos en la precipitación anual total mayores de los que él estimó. Sin embargo, la relación entre elevación y precipitación seguramente es compleja. Por ejemplo, en Costa Rica, los totales grandes de precipitación han sido encontrados concentrados en la punta de montañas de elevación moderada y en las laderas de las sierras altas. Las crestas de las sierras más altas de 2,500 m reciben menos de la mitad de precipitación que en las laderas (Portig, 1976).

Precipitación Durante el Huracán Mitch

Las fuertes tormentas locales durante la época lluviosa en Guatemala periódicamente desatan deslizamientos de tierra cada año, pero la duración y la naturaleza generalizada de lluvias fuertes

del Huracán Mitch proporcionaron las condiciones necesarias para producir deslizamientos de tierra sobre una amplia zona. Adicionalmente, el Huracán Mitch azotó Guatemala al final de la época lluviosa cuando los niveles de humedad en la tierra ya eran altos. Las estaciones meteorológicas, que están amplia pero

escasamente distribuidas por Guatemala, suministraron un panorama general de la precipitación asociada con el Huracán Mitch a través del país, que varió desde 182 mm hasta 1069 mm (fig. 2). Dos estaciones, San Lorenzo y Pasabién (fig. 2), proporcionaron datos adyacentes al área central de mayor densidad de deslizamientos de tierra en un área de alto relieve—la Sierra de las

Minas—que fue fuertemente impactada por deslizamientos de tierra y flujos de escombros por el Huracán Mitch. La estación San Lorenzo, operada por el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), está en el flanco sur de la Sierra de las Minas a una elevación de 1780 m. La cresta de la sierra descansa a 9.5 km al noroeste de la estación a una elevación de 2987 m. La estación Pasabién, operada por INSIVUMEH, está en la base de la sierra a una elevación de 250 m, 6 km al sur de la Estación San Lorenzo.

Los datos de los pluviómetros de San Lorenzo y Pasabién indican que la precipitación durante el Huracán Mitch fue prolongada y de moderada a fuerte, pero no extraordinaria durante ningún día. En la Estación San Lorenzo, que tiene una elevación comparable con la elevación en la que ocurrieron abundantes deslizamientos de tierra en el área circundante, hubo 4 días consecutivos cada uno con más de 40 mm de lluvia (figs. 4A y 5). La precipitación diaria máxima fue de 65 mm el 30 de octubre. La precipitación total acumulada durante el Huracán Mitch (27 de octubre – 1 de noviembre) fue de 275 mm (figs. 4a y 5). En la Estación Pasabién, a una elevación donde no hubo flujo de escombros en pendientes circundantes cercanas (hoja 9), sólo hubo 2 días consecutivos de precipitación arriba de 20 mm (figs. 4b y 5). La precipitación diaria máxima fue de 60 mm el 31 de octubre. La precipitación total acumulada en la Estación Pasabién (27 de octubre – 1 de noviembre) fue de 124.5 mm.

La cantidad de precipitación acumulada en las dos estaciones durante la estación lluviosa de 1998 fue bastante diferente. En la Estación San Lorenzo, la precipitación acumulada antes del

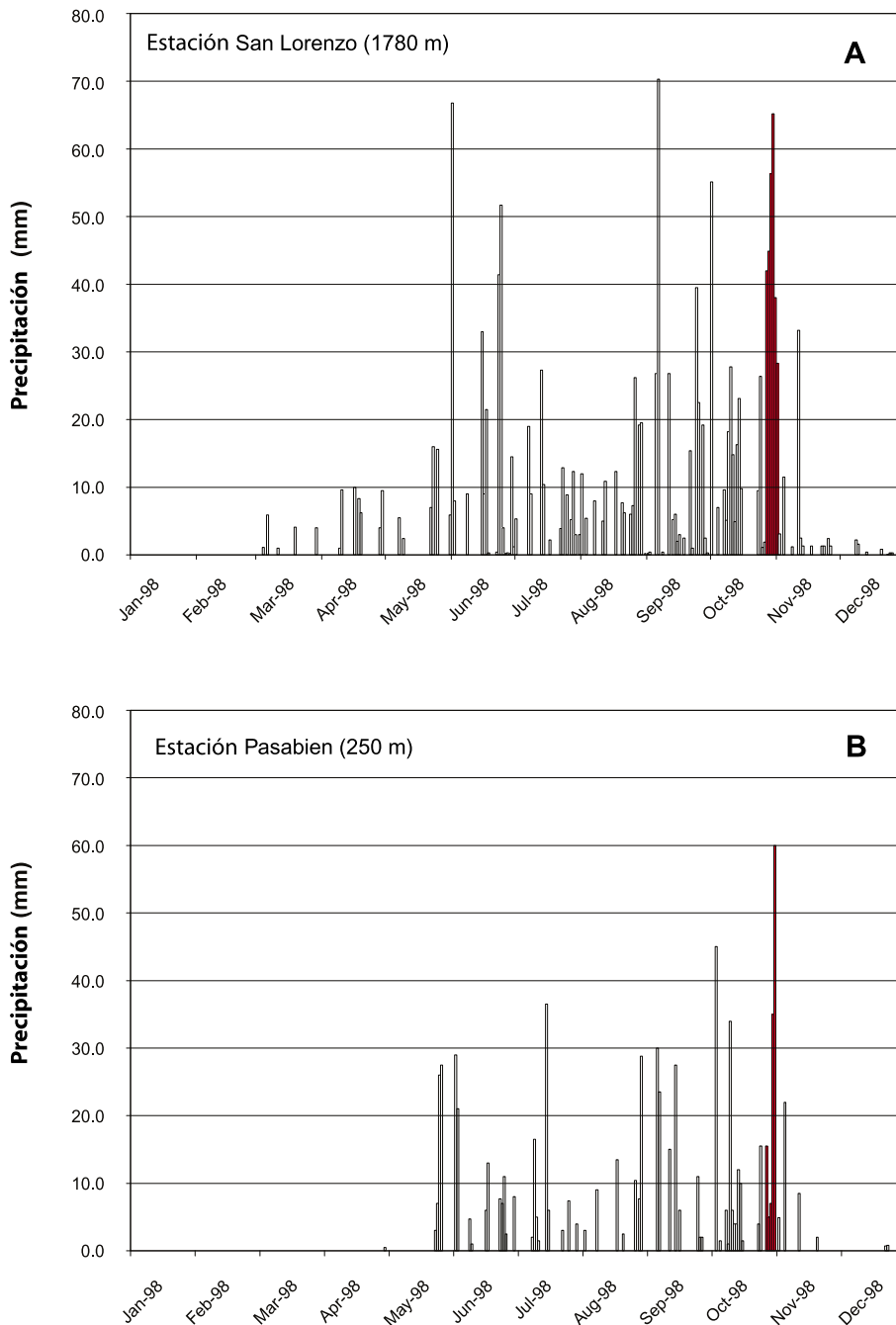


Figura 4. Precipitación durante 1998 en la Sierra de las Minas reportada en las estaciones pluviométricas San Lorenzo (A) y Pasabién (B). Las elevaciones de las estaciones en la esquina superior izquierda de las figuras; precipitaciones diarias durante fuerte lluvia del Huracán Mitch en las estaciones (27 de octubre – 1 de noviembre) mostradas por barras rojas rellenas.

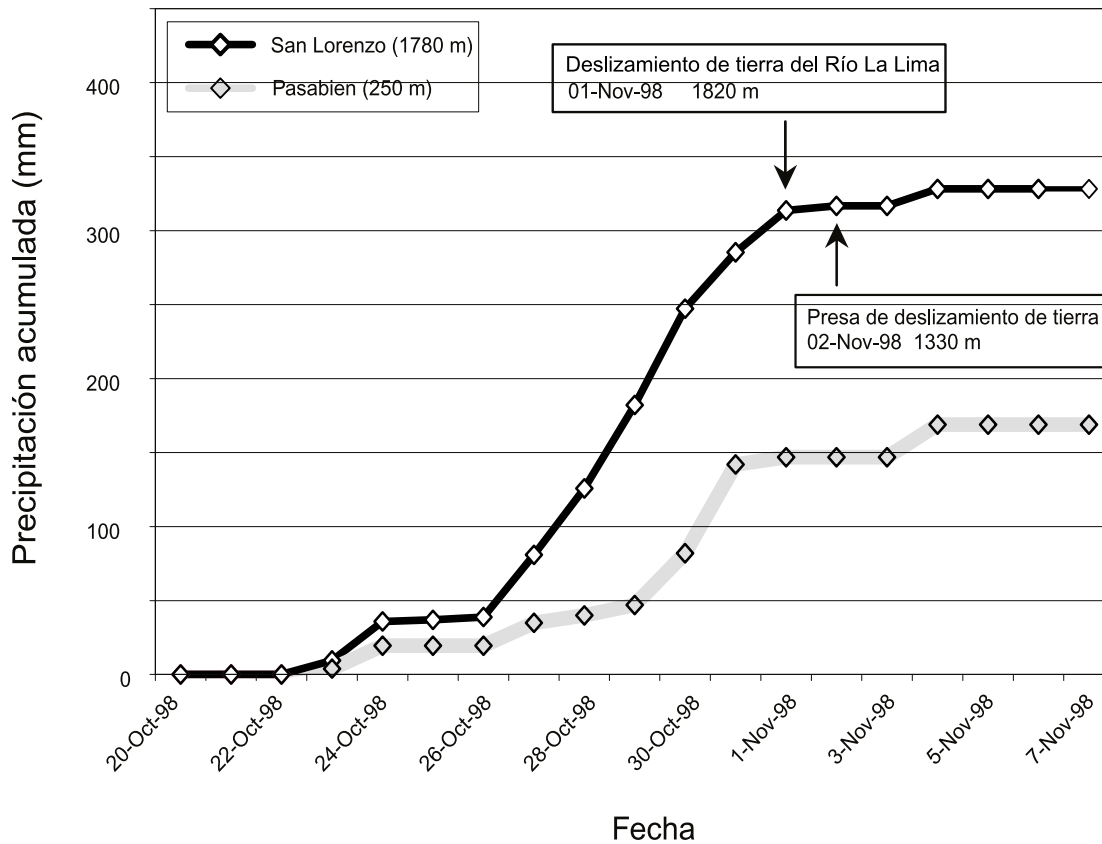


Figura 5. Precipitación acumulada para los registros de la Sierra de las Minas en las estaciones pluviométricas San Lorenzo y Pasabién durante el Huracán Mitch. Las elevaciones de las estaciones dadas en el mapa inserto; la fecha y la elevación del lugar de iniciación de los deslizamientos de tierra para dos grandes deslizamientos de tierra en el Río La Lima dado en los mapas insertos.

Huracán Mitch (1 de marzo – 22 de octubre, 1998) fue de 1,082 mm (fig. 5).

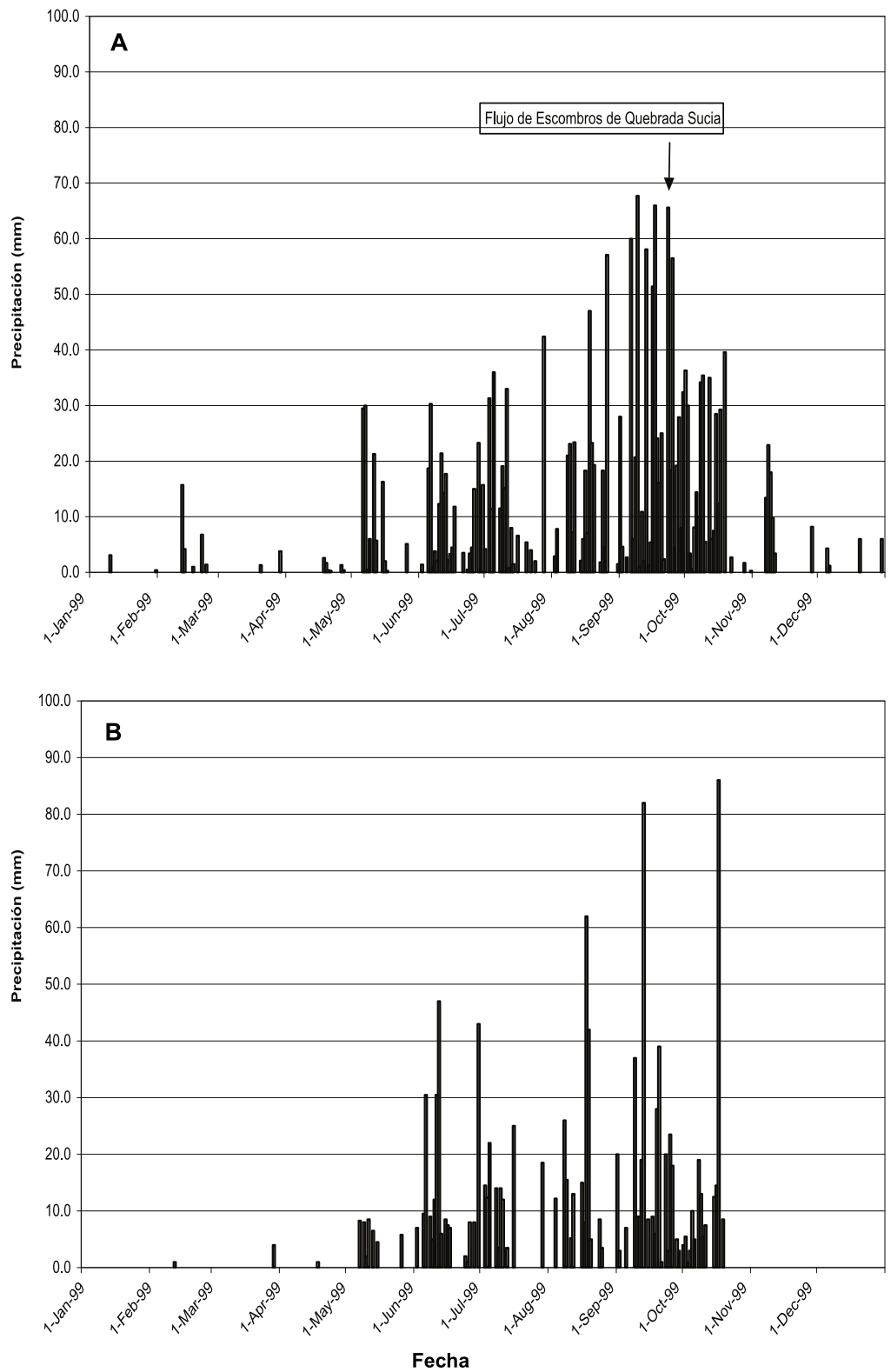
La precipitación diaria en dos días durante este período (67 mm el 1 de junio y 71 mm el 6 de septiembre) fue mayor que la precipitación en cualquier día durante el Huracán Mitch, pero no desató ningún flujo de escombros reportado. Esto indica que, ya sea la humedad anterior de la tierra en estas fechas fue menor de la adecuada para desatar flujos de escombros, o que la precipitación fue muy corta en duración para desatar flujos de escombros. En la estación cercana Pasabién, 1,530 m abajo en elevación, la precipitación acumulada durante el mismo período antes del Huracán Mitch fue de 573 mm (fig. 5). Tanto la precipitación estacional acumulada y la precipitación durante el Huracán Mitch en los dos sitios muestran que la elevación tiene una fuerte influencia sobre la precipitación.

Precipitación en 1999 (Evento Quebrada Sucia)

El 23 de septiembre, 1999, los flujos de escombros en el drenaje Quebrada Sucia en

el cuadrángulo de Río Hondo (hoja 9) cerró la carretera CA9. El evento es descrito en detalle en una sección más adelante en este informe. La precipitación asociada con este evento se muestra en las figuras 6 y 7. El pluviómetro de San Lorenzo está a como 3 km al oeste del área fuente de los flujos de escombros y a una elevación similar, mientras que el pluviómetro de Pasabién está como a 6 km al suroeste y a una elevación menor. Ambos pluviómetros muestran que 1999 fue un año húmedo (figs. 6 y 7). La precipitación anual antes del 23 de septiembre en el pluviómetro de San Lorenzo fue de aproximadamente 1280 mm, que es como 20 mm más que en la precipitación anual en 1998 antes de Mitch. La precipitación el 23 de septiembre en el pluviómetro de San Lorenzo fue de aproximadamente 66 mm, que es alrededor de la misma que la precipitación diaria más fuerte en el pluviómetro durante Mitch (65 mm). Los datos del pluviómetro de San Lorenzo también indican que los flujos de escombros ocurrieron como a la mitad del período de dos semanas más intenso de precipitación en 1999.

Figura 6. Precipitación durante 1999 en la Sierra de las Minas reportada en las estaciones pluviométricas San Lorenzo (A) y Pasabién (B).



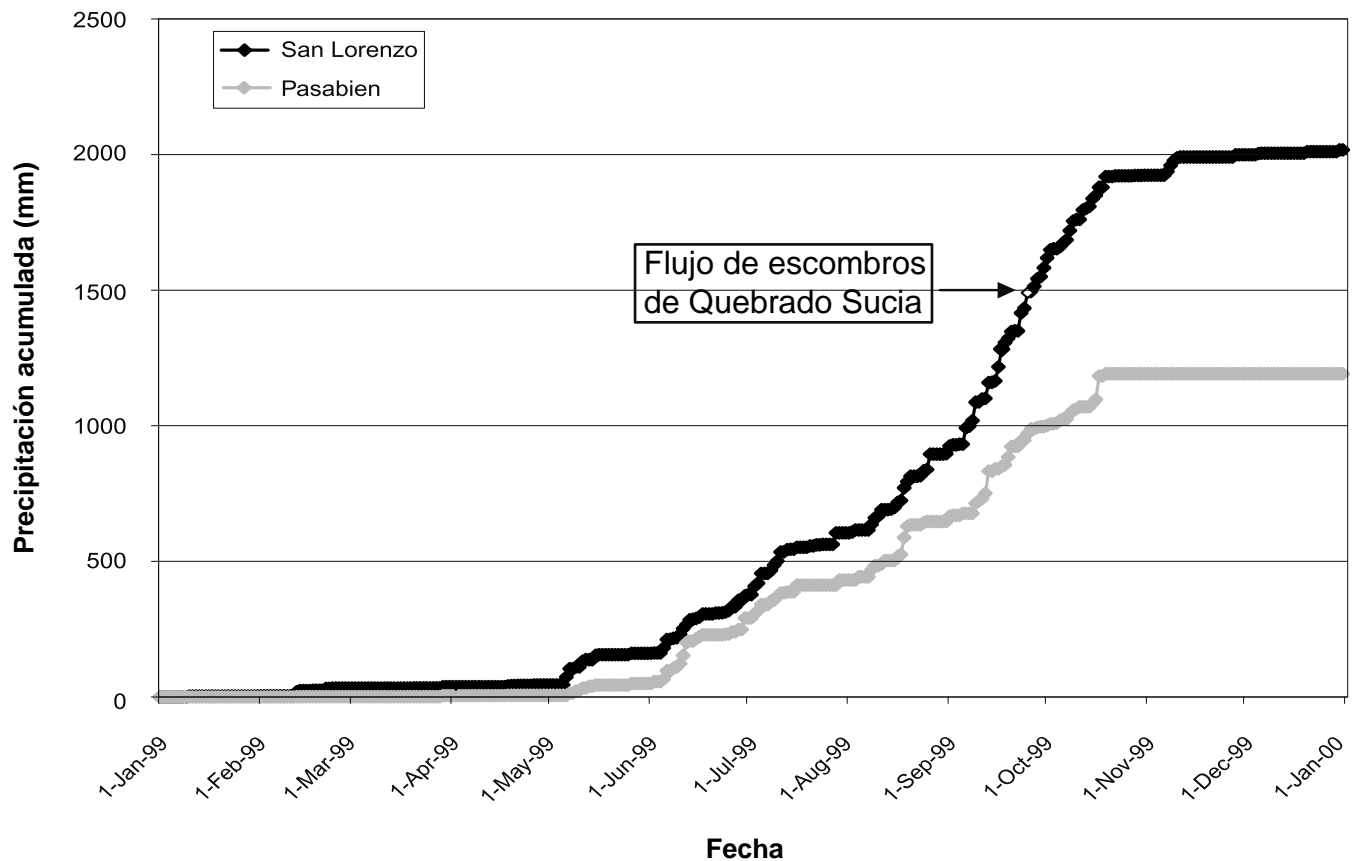


Figura 7. Precipitación acumulada en la Sierra de las Minas para los registros de las estaciones pluviométricas San Lorenzo y Pasabién durante 1999. Valor del día del flujo de escombros de Quebrada Sucia mostrado por símbolo abierto en la serie de datos de San Lorenzo.

RESULTADOS

Visión General de la Variabilidad y Distribución de los Deslizamientos de Tierra dentro del Área de Estudio

Se cartografiaron aproximadamente 11,500 deslizamientos de tierra en el área de estudio (hojas 1-21). En un sentido amplio, los deslizamientos de tierra cartografiados, fueron de dos grandes tipos: relativamente pequeños, deslizamientos de tierra traslacionales y rotacionales que comúnmente se movilizaron hacia flujos de escombros y cubrieron áreas de menos de varias hectáreas (no incluyendo senderos de flujo); y grandes, deslizamientos comúnmente traslacionales, que algunas veces generaron flujos de escombros y cubrieron entre 15 a 25 hectáreas (no incluyendo senderos de flujos). La mayoría de los deslizamientos de tierra cartografiados fueron del primer tipo. Los deslizamientos de tierra pequeños probablemente fueron

desatados durante un intenso estallido de precipitación entre el 27 de octubre y el 1 de noviembre. Para algunos deslizamientos de tierra mayores, fuimos capaces de recolectar información detallada en el momento de la ocurrencia con testigos. Donde tenemos estos datos, hay una increíble coincidencia en las fechas documentadas de la ocurrencia; todas ocurrieron el 1 de noviembre. El deslizamiento de tierra en la parte superior del Río La Lima en el cuadrángulo Río Hondo (hoja 9) fue uno de los mayores deslizamientos de tierra con un tiempo de ocurrencia documentado. El pluviómetro localizado cerca del deslizamiento de tierra (estación meteorológica San Lorenzo) indica que cayeron 275 mm de lluvia en un período de 6 días antes de que ocurriera el deslizamiento de tierra (fig. 5). Si asumimos que las condiciones de humedad anteriores necesarias para que ocurrieran los deslizamientos de tierra habían sido llenados antes de que empezara la precipitación del Huracán Mitch, que es una asunción

razonable debido a que el Huracán Mitch ocurrió al final de la estación lluviosa, entonces como 275 mm en 6 días (un promedio de 46 mm/día) podrían considerarse un estimado de la precipitación desatante para el deslizamiento de tierra de La Lima. Sin embargo, debido a que el deslizamiento de tierra de La Lima ocurrió en un área de precipitación relativamente alta comparada con el resto del área de estudio (donde ocurrieron otros deslizamientos de tierra mayores), el umbral real desatante para la ocurrencia de deslizamientos grandes de tierra fue probablemente menos que 275 mm en 6 días.

Las principales concentraciones de deslizamientos de tierra, sucedieron en laderas de moderadas a inclinadas extendidas sobre unidades geológicas diversas. Para propósitos de describir los deslizamientos de tierra cartografiados, dividimos el área de estudio en cinco regiones precisas basadas en características geológicas y geomórficas diferentes. Estas regiones incluyen el valle superior del Polochic y montañas circundantes, la Sierra de las Minas central, las montañas que rodean La Unión y Zacapa, el lado este de la Sierra de las Minas, y la región fronteriza con Honduras. Todas estas áreas recibieron entre 200 mm y 600 mm de lluvia en un período de 13 días entre el 25 de octubre y el 6 de noviembre (hoja 21). La mayor cantidad de lluvia (400 mm a 600 mm) ocurrió en la parte superior del Valle del Polochic y montañas circundantes y en la Sierra de las Minas central. La menor cantidad de lluvia (200 mm a 400 mm) ocurrió en las montañas que rodean La Unión, el lado este de la Sierra de las Minas y en la región fronteriza con Honduras. En general, la lluvia recibida en estas áreas es burdamente equivalente a la precipitación promedio recibida en el período de un año (ver atrás en sección de precipitación). Abajo, describimos algunos de los deslizamientos de tierra en cada una de las cinco regiones.

Parte Superior del Valle del Polochic y Montañas Circundantes

El Huracán Mitch desató deslizamientos de tierra a lo largo de la parte Superior del Valle del Polochic y las montañas circundantes (hojas 1-5), una de las principales áreas cafetaleras en Guatemala. Esta también es un área de laderas inclinadas, alto relieve, y actividad Cuaternaria de terremotos a lo largo de la falla del Polochic. La erosión a lo largo de la falla del Polochic formó el valle. Las montañas en el lado norte del valle están predominantemente extendidas sobre rocas calizas y se conocen por su espectacular topografía cárstica. Las montañas del lado sur del valle están predominantemente extendidas sobre rocas metamórficas y clásticas sedimentarias. Abajo, discutimos algunos de los deslizamientos de tierra en la región.

Cuadrángulo Cobán (hoja 1)

Deslizamientos de Tierra en las vecindades del Cerro Xalijá

La principal concentración de deslizamientos de tierra en el cuadrángulo de Cobán (hoja 1) está cerca de Cerro Xalijá en la naciente del Río Chilax y el Río Mestelá, como 12 a 17 km al sureste de Cobán. Las aldeas en esta área incluyen Campat, Chitix, y Xucaneb. El área yace sobre rocas carbonáticas Jurasicas y Cretácicas (Bonis y otros, 1970; Paulsen, 1976). Hay alrededor de 150 deslizamientos de tierra en el área del Cerro Xalijá. Las elevaciones de los lugares de iniciación de deslizamientos de tierra varían desde aproximadamente 1,500 a 2,100 m. Estos deslizamientos de tierra son someros (generalmente menos de 3-5 m de profundidad) e incluyen áreas de menos de 1 ha. Muchos se movilizaron hacia flujos de escombros. También hay un flujo de tierra que fue localizado en el mapa en esta área en las coordenadas UTM 793200 m E y 1703100 m N.

Cuadrángulo Tactic (hoja 2)

Deslizamiento de Tierra rotacional cerca de Cuyquel

Los deslizamientos de tierra grandes fueron bastante raros en esta área de estudio. Un ejemplo es el gran deslizamiento rotacional de tierra que se muestra en la Fig. 8 localizado cerca de Cuyquel, como 3.5 km al sureste de Tactic en el cuadrángulo de Tactic (hoja 2). El área está extendida sobre lutitas Carboníferas a Pérmicas, limolitas, areniscas, conglomerados y filitas. Está localizada alrededor de 1 km al sur del trazo en el mapa de la falla del Polochic (Bonis y otros, 1970; Nicolaus y Muller, 1979). El deslizamiento de tierra está en la intersección del Río Frío y el Río Cahabón, al lado este de la carretera CA14. El deslizamiento de tierra tiene aproximadamente 225 m de ancho y 100 m de largo (como 2.5 ha en área) y parcialmente está bloqueando el Río Cahabón. La elevación de la cabeza del deslizamiento es de alrededor 1,530 m. El gradiente de la ladera no deformada sobre el deslizamiento de tierra varía de 20° a 30°. Examinamos el escarpe de la cabecera del deslizamiento de tierra y encontramos un suelo bien desarrollado rico en arcilla,



Figura 8. Gran deslizamiento rotacional cerca de Cuyquel; el deslizamiento de tierra tiene alrededor de 225 m de ancho y 100 m de largo. Vista al nordeste. Coordenadas UTM 887650 m E, 1694000 m N. Fotografía tomada el 4 de enero, 2001.

formado en una limolita brechosa y/o filita. El perfil del suelo incluía, desde la parte superior hasta la base, un horizonte A de color gris a negro con 10-30 cm de espesor, y un horizonte B de 80 cm de espesor que estaba compuesta de una capa roja de 50 cm de espesor y una capa blanco-amarillenta de 30 cm de espesor. La roca brechosa debajo tenía una matriz suave rica en arcilla que parecía jaboncillo. Los bloques de brecha varían alrededor de 10 m por 10 m en dos dimensiones. Observamos antiguas cicatrices de deslizamientos de tierra en la parte este del deslizamiento de tierra y escarpes frescos sobre estas cicatrices. Los escarpes frescos, que atraviesan bloques de deslizamiento de tierra relativamente intactos que "in situ", indican que la parte este de los deslizamientos de tierra es inestable y puede ser susceptible a fallas futuras. La naturaleza brechosa del lecho de roca y las antiguas cicatrices de deslizamientos indican que esta área puede ser especialmente susceptible a deslizamientos futuros comparado con áreas circundantes.

Deslizamientos de tierra en el flanco norte de la Sierra de Chuacús

En el lado sur del Río Polochic, el flanco norte de la Sierra de Chuacús en el cuadrángulo de Tactic (hoja 2) es especialmente susceptible a deslizamientos de tierra comparada con áreas circundantes. El área susceptible está bordeada al oeste por la Hacienda Cumbre de Rocjá y en el este por la Quebrada Muxilija. En esta área y durante nuestro mapeo, notamos numerosas cicatrices y depósitos de antiguos deslizamientos de tierra (Cuaternarios). Dentro del área, cartografiamos alrededor de 50 deslizamientos de tierra desatados por el Huracán Mitch, y tres deslizamientos de tierra previos al Huracán Mitch. La razón por la cual esta área es susceptible a deslizamientos de tierra no está clara. El área está extendida sobre limolitas Pérmicas interestratificadas con caliza y areniscas de grano fino (Nicolás y Muller, 1979), pero así también es la mayoría del área circundante que no tuvo una abundancia de deslizamientos de tierra Cuaternarios. Es necesario un estudio más detallado de las propiedades físicas de la roca basal y del



Figura 9. Deslizamiento de tierra La Concepción cerca de Tukurú; el deslizamiento de tierra tiene alrededor de 700 m de ancho y 250 m de largo. Vista al oeste. Coordenadas UTM 808000 m E, 1690500 m N. Fotografía tomada el 5 de enero, 2001.



Figura 10. Deslizamiento de tierra típico del área noroeste de Senahú; el deslizamiento de tierra tiene alrededor de 70 m de ancho y 400 m de largo. Vista al norte. Coordenadas UTM193850 E, 1711100 N. Fotografía tomada el 6 de enero, 2001.

suelo coluvial en el área, para evaluar con exactitud la razón de la susceptibilidad preferencial.

Cuadrángulo Tukurú (hoja 4)

Deslizamiento de tierra La Concepción

Uno de los deslizamientos de tierra más grandes en la parte Superior del Valle del Polochic está cerca de la Finca La Concepción, como a 3 km al suroeste de Tukurú en el cuadrángulo Tukurú (hoja 4). El deslizamiento de tierra que se muestra en la Fig. 9 es de aproximadamente 700 m de ancho y 250 m de largo (como 18 ha en área) y destruyó varias casas en la aldea Amapola. El movimiento del deslizamiento de tierra parece haber sido predominantemente traslacional. La cabeza del deslizamiento de tierra está a una elevación de cómo 1140 m. Mapeos geológicos existentes (Paulsen, 1980) indican que el deslizamiento de tierra está extendido sobre limolita intercalada con capas de caliza. Testigos indicaron que algún movimiento inicial del deslizamiento de tierra fue desatado por un terremoto que sacudió el área como un año antes del Huracán Mitch, pero que el movimiento catastrófico ocurrió alrededor de 14 días después del comienzo de la precipitación por el Huracán Mitch. Otros testigos declararon que el deslizamiento se movió catastróficamente durante Mitch, y luego se movió nuevamente como 14 días después durante un segundo terremoto. En todos los relatos, el deslizamiento de tierra se movió lo suficientemente lento que los residentes de casas en la masa del deslizamiento de tierra tuvieron tiempo de evacuar.

Cuadrángulo Senahú (hoja 5)

Deslizamientos de tierra al noroeste de Senahú

Una de las principales concentraciones de deslizamientos de tierra en el cuadrángulo de Senahú (hoja 5) es en el nacimiento del Río Seritquiche, Río Sepec, y Quebrada Setzimaj alrededor de 5 a 10 km noroeste de Senahú. Las aldeas y fincas en esta área incluyen Sejacob, Sechich, Secareché, Vado, Finca Semarac y Finca Chirreaj. Las

concentraciones de deslizamientos de tierra más altos están cerca de Sejocob. El área está en y cerca del contacto de falla entre rocas carbonáticas Cretácicas y Pérmicas (Bonis y otros, 1970). La vegetación en el área es bosque o tierra limpia. La elevación del sitio de iniciación de los deslizamientos de tierra varía de 1,000 m hasta 1,400 m. Los deslizamientos de tierra en esta área son típicamente someros (generalmente menos de 3-5 m de profundidad) y abarcan menos de 3 ha (fig. 10). Muchos se movilizaron hacia flujos de escombros.

Deslizamientos de tierra arriba de La Tinta

Otra concentración de deslizamientos de tierra en el cuadrángulo de Senahú (hoja 5) es en el flanco sur de la Montaña Piedras Blancas, arriba de La Tinta. Estos deslizamientos de tierra dañaron cultivos de café y cardamomo y aportaron sedimentos a numerosos arroyos. Inundaciones en seis de los drenajes acarrearón sedimento hacia el Río Polochic (hoja 6). Las inundaciones en dos de los drenajes fluyeron alrededor de las orillas de La Tinta y aparentemente no afectaron el pueblo.

La mayoría de los deslizamientos de tierra están en laderas con pendientes de moderadas a empinadas directamente bajo las laderas más inclinadas en el flanco de la Montaña Piedras Blancas. Los

deslizamientos de tierra iniciaron a elevaciones desde alrededor de 500 a 1,400 m y variaron en área de menos de 1 ha hasta como 16 ha. Las áreas donde iniciaron deslizamientos de tierra están extendidas predominantemente sobre rocas metamórficas Paleozoicas, y en menor grado por rocas carbonáticas Pérmicas (Bonis y otros, 1970). El deslizamiento de tierra más grande (fig. 11) está en una colina con gradientes que varían desde 45° hasta 50°. La falla parece ser en el contacto entre la roca basal y el coluvión a una profundidad variable entre 2 y 10 m bajo la superficie. Declaraciones de testigos indican que el deslizamiento de tierra ocurrió durante un período de 24 horas comenzando en o alrededor del 1 de noviembre.

Escarpes y depresiones alargadas a orillas de la montaña cárstica

Hubo varios rasgos que observamos durante nuestro mapeo y exploración que vale la pena describir a pesar de que no fueron creados por el Huracán Mitch. Uno de los rasgos más interesantes fue una serie de escarpes y depresiones alargadas (fig. 12) localizadas en la esquina suroeste del cuadrángulo de Senahú (hoja 5) en un área extendida sobre rocas carbonáticas Pérmicas (Bonis y otros, 1970). Los rasgos están en o cerca de la orilla de la montaña cárstica, justo sobre el inclinado flanco sur de la Montaña Yalijux y la Montaña Piedras Blancas. Los rasgos corren entre N 20° E y N 90° E, que es paralelo a sub-paralelo al flanco empinado. Algunos de los rasgos más cercanos al flanco empinado parecen ser escarpes bajos del lado superior de la montaña que han creado depresiones alargadas cerradas (fig. 12). Estas características son típicas de rasgos expandidos por gravedad (fosas y zanjas geológicas colectivamente conocidas como "sackungen") que han sido descritos en las montañas de Estados Unidos y Europa (por ejemplo, ver Varnes y otros, 1989). La localización de los escarpes y depresiones es consistente con el ambiente de muchos "sackungen"; esto es, a lo largo de crestas y mesetas limitadas por flancos muy empinados. La diferencia principal es que en los Estados Unidos y en Europa los "sackungen" están típicamente en terreno

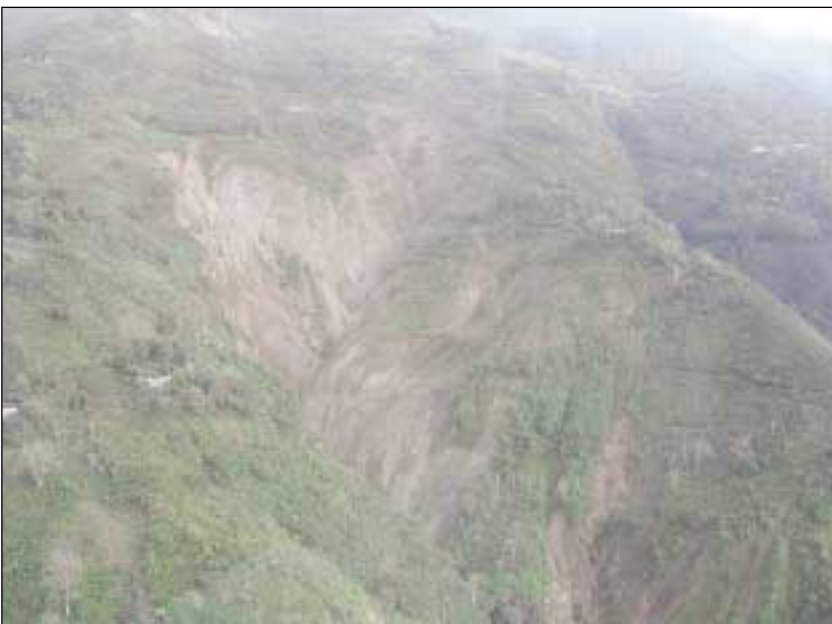


Figura 11. Deslizamiento de tierra en el flanco sur de la Montaña Piedras Blancas sobre La Tinta. Vista al norte. Coordenadas UTM 185200 m E, 1700100 m N. Fotografía tomada el 15 de enero, 2001.



Figura 12. *Depresiones y escarpes alargadas en la orilla sur de la Montaña Yalijux. Vista al noroeste. Coordenadas UTM en el centro aproximado del canal 178350 E, 1698275 N. Fotografía tomada el 6 de enero, 2001.*



Figura 13. *Deslizamiento de tierra típico de la parte central de la Sierra de las Minas a elevaciones entre 1,200 y 1,800 m (hoja 11). Vista al noroeste sobre el Río Mojanal. Centro de la vista en las coordenadas UTM 232100 m E, 1679400 m N.*

que ha sido sobre empinado por glaciación, mientras que este no ha sido el caso en Guatemala. En el cuadrángulo de Senahú, el flanco de la meseta es muy empinado, probablemente debido a un levantamiento y erosión diferencial a lo largo de la falla del Polochic. Otro posible origen para las características es que son simplemente fracturas (posiblemente relacionados a la falla del Polochic) que han sido expandidas por disolución de roca calcárea. Sin embargo, sin un estudio detallado de estos rasgos, se desconocen, tanto su origen exacto, como cualquier peligro asociado.

Sierra de las Minas Central

Las elevaciones medianas a altas de la Sierra de las Minas forma la concentración más grande de deslizamientos de tierra (ver mapa de localización de deslizamientos de tierra, hoja 21) en el área de estudio (hojas 6, 8, 9 y 11). El área es escarpada, con tanto como 2,700 m de relieve desde la cresta de la sierra a 2,948 m al pie de la sierra a alrededor de 200 m. Arriba de aproximadamente 1,000 m, el área es altamente forestada; elevaciones menores tienen cantidades variables de tierra limpia y están cubiertos de maleza. La mayoría del área está extendida sobre rocas metamórficas Paleozoicas, incluyendo filita, esquistos, gneis, mármol, y migmatita. Localmente, se presentan intrusivos de serpentinita y granito y diorita del Terciario hasta del Paleozoico. La lutita, arenisca, conglomerado y filita del Paleozoico Superior flanquean el lado norte de la parte central de la sierra (Bonis y otros, 1970).

La mayoría de los deslizamientos son relativamente someros, típicamente involucrando una capa de coluvión de menos de 5 m de espesor y, debajo, bloques unidos de roca basal. Unos pocos deslizamientos profundamente asentados transportaron bloques de roca basal de hasta casi 20 m de diámetro. Los deslizamientos de tierra forman dos patrones principales en los mapas. Un patrón, mostrado en la Fig. 13 consiste de deslizamientos que son pequeños y aislados típicamente de 20-50 m de ancho y tanto como 100-200 m de largo (0.2-1 ha). El otro patrón consiste de deslizamientos

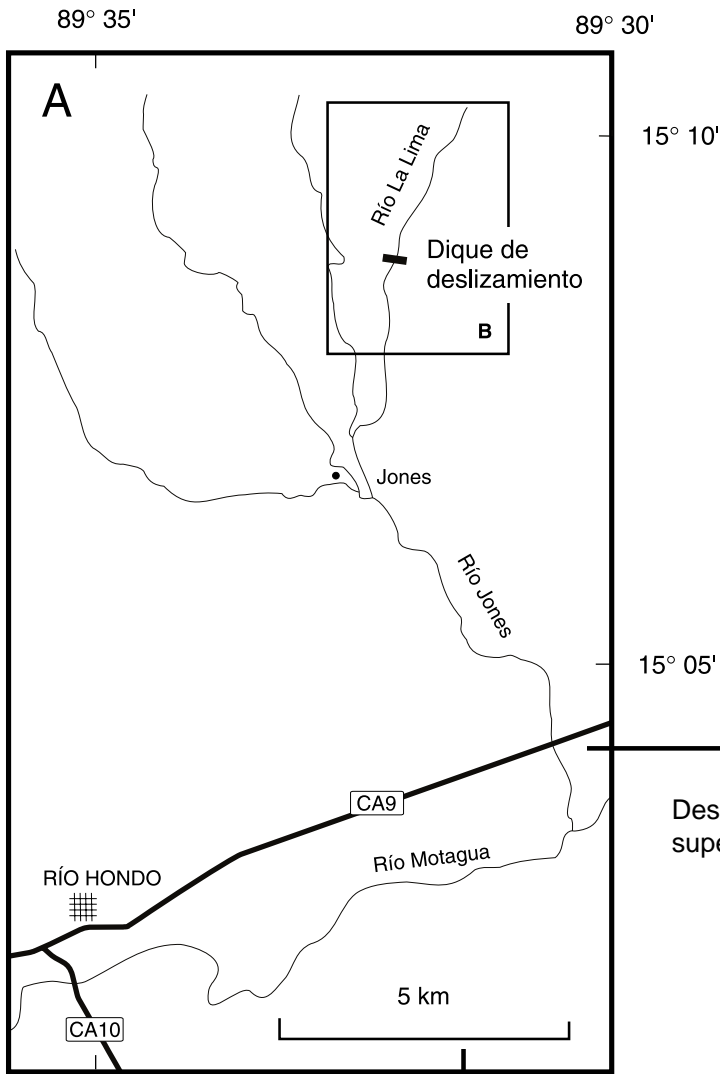


Figura 14. A. Mapa índice del área del dique del deslizamiento de tierra en el Río La Lima.

B. Mapa mostrando áreas (sombreadas) afectadas por deslizamientos de tierra, flujos de escombros, e inundaciones en el drenaje superior del Río La Lima. El sombreado oscuro muestra el complejo de deslizamientos de tierra que produjeron el dique de deslizamiento de tierra. Las flechas muestran los puntos aproximados de fotografías y las direcciones de visión de las figs. 15 y 16.

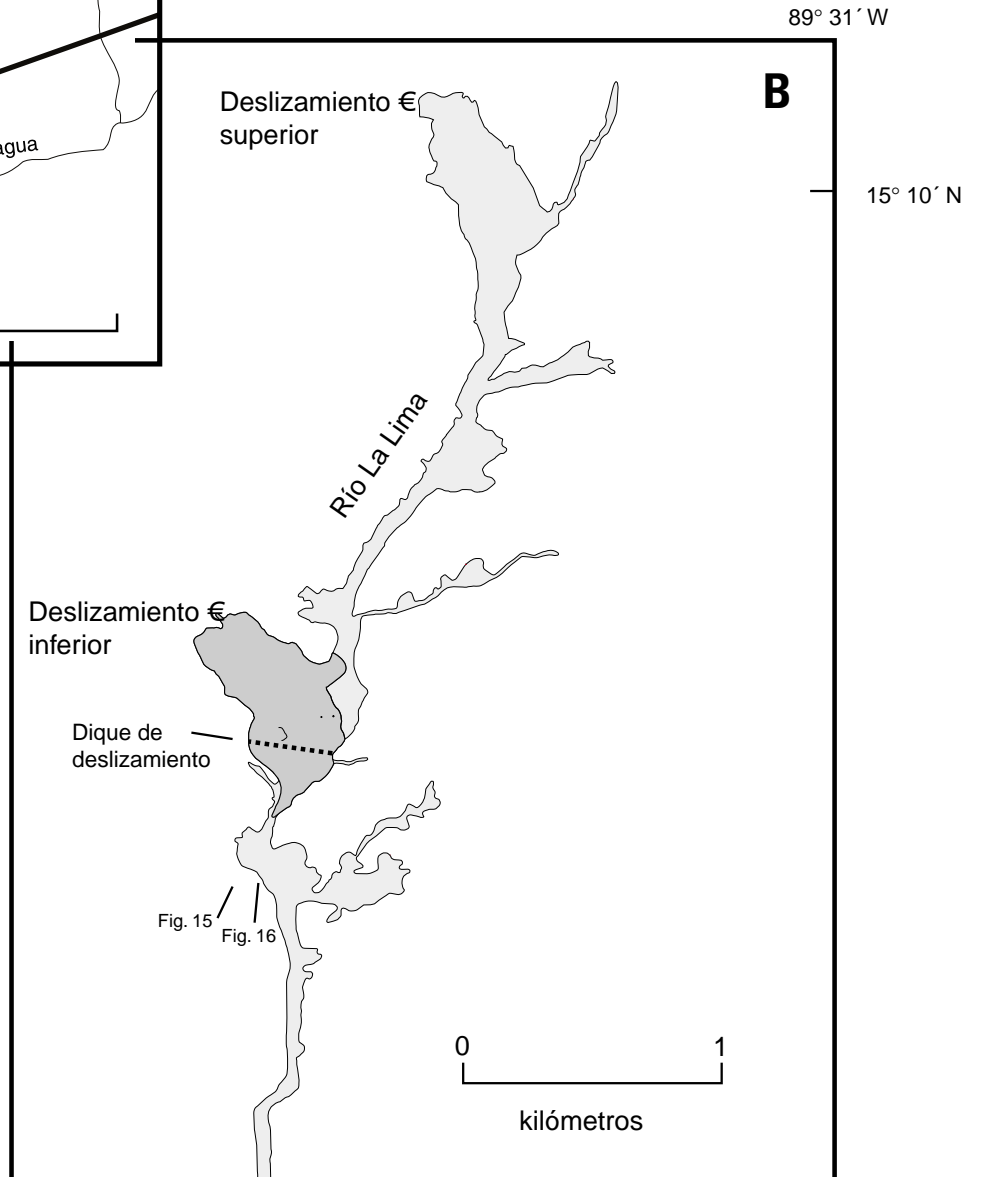




Figura 15. Deslizamiento de tierra en el Río La Lima, vista río arriba (norte) desde un punto a 4 km norte (río arriba) de Jones (vea fig. 14); fotografía tomada el 25 de enero, 2000. El deslizamiento de tierra se originó en la ladera empinada en la esquina superior izquierda de la fotografía. El punto de descarga del río de los escombros que forman el dique es en el punto donde primero es visible el agua en la parte media de la derecha de la fotografía.



Figura 16. Vista aérea oblicua hacia el norte del deslizamiento de tierra que produjo el dique en el Río La Lima; fotografía tomada el 12 de enero del 2001. La superficie lisa de tono uniforme que atraviesa el Río La Lima al pie del deslizamiento de tierra es el relleno de sedimento detrás del dique del deslizamiento de tierra.

más grandes que se movilizaron hacia flujos de escombros y fluyeron hacia los canales de drenajes. Estos forman un patrón dendrítico en los mapas que imita el patrón de drenaje. Los deslizamientos en este grupo son de hasta 25 ha, pero en promedio cubren entre 1 a 5 ha. Los deslizamientos grandes comúnmente se iniciaron en o cerca de la cresta de cerros altos, en los acantilados escapados de cuenca con forma de anfiteatros. Ejemplos prominentes de estos grandes deslizamientos de tierra están en la cabeza del Río La Lima (hoja 9, Carátula) y en la parte este del Cerro Picudo (hoja 11).

En la porción central de la Sierra de las Minas, están ampliamente distribuidas las cicatrices de deslizamientos de tierra generados antes del Huracán Mitch. Estos deslizamientos pre-Huracán Mitch son abundantes en algunos cuadrángulos (ver, por ejemplo, el cuadrángulo de La Tinta, hoja 6). Los deslizamientos de tierra pre-Huracán Mitch son expresados como depresiones topográficas vegetadas similares en contorno y forma a los deslizamientos de tierra del Huracán Mitch, pero con una morfología más suave. La vegetación en los deslizamientos de tierra pre-Huracán Mitch



Figura 17. Canal en área de material removido en el Río La Lima (Coordenadas UTM 227337 m E, 1674690 m N) como a 1 km río abajo desde el dique del deslizamiento de tierra mostrado en las Figuras 15 y 16.



Figura 18. Bloques gruesos en la superficie del abanico aluvial cerca de Piedra de Afilar.

es más pequeña y menos densa que en el terreno adyacente afuera del deslizamiento de tierra. En general, al material transportado ladera abajo por los deslizamientos de tierra pre-Mitch les falta expresión topográfica y no fue cartografiado.

Cuadrángulo de Río Hondo (hoja 9)

Río La Lima

Dos deslizamientos de tierra a lo largo del Río La Lima río arriba del pueblo de Jones (fig. 14A, B) son los deslizamientos de tierra más grandes en la parte central de la Sierra de las Minas. Ambos fallamientos de ladera, fueron deslizamientos de roca y escombros con control estructural sobre laderas empinadas en gneis de granito del Paleozoico Inferior (Newcomb, 1978) a lo largo de la pared oeste del cañón del Río La Lima (Schuster y otros, 2001).

El menor de los deslizamientos (área alrededor de 16 ha; localización de la base del talud alrededor de 4 km al norte del pueblo de Jones) represó el Río La Lima (figs. 15 y 16). El mayor de los deslizamientos, mostrado en la carátula, (área alrededor de 25 ha; localización de la base del talud alrededor de 5.5 km al norte de Jones) se inició en la cabecera del Río La Lima el 1 de noviembre de 1998, y precedió al deslizamiento inferior por un día (Jorge Mario Aldana Ramírez, comunicación personal, enero 2000). La erosión subsiguiente de los depósitos del flujo de escombros movilizado del deslizamiento superior contribuyó mucho al sedimento que llena el embalse detrás del dique del deslizamiento de tierra. El deslizamiento superior se inició a una elevación de 1,820 m, y los depósitos del flujo de escombros, áreas de material removido de los canales (fig. 17), y los depósitos de la inundación son continuos a lo largo del Río La Lima y su continuación, Río Jones, por 14.5 km hasta el Río Motagua a una elevación de alrededor de 150 m. Localmente, el canal del río fue limpiado hasta el lecho de la roca (fig. 17). Estos dos grandes deslizamientos de tierra y sus depósitos relacionados a lo largo del Río La Lima y el Río Jones son claramente visibles en una imagen del Landsat Thematic Mapper del área tomada



Figura 19. Bloques gruesos a lo largo del margen del flujo de escombros en Quebrada Sucia como a 1 km norte de la carretera CA9. Note la línea fuerte cortada en la orilla de la vegetación al lado izquierdo de la fotografía. El bloque grande en el arbusto es de un flujo de escombros previo. La inundación después del flujo de escombros removió la mayoría de la matriz fina escombros-flujo de la parte superior del depósito de bloques. Fotografía tomada el 26 de enero, 2000.

el 4 de diciembre, 1998, a una altitud de 705 km (ID de la imagen LT5019050009833810).

Estudios estratigráficos hechos por Tobisch (1986) muestran que los flujos de escombros a lo largo del piamonte al pie sur de la Sierra de las Minas han sido un proceso continuo en la mayoría del tiempo Cuaternario (más de 1.8 millones de años). Los drenajes mayores de las Sierra de las Minas en el Valle del Motagua central tienen terrazas bien preservadas localmente cubiertas por bloques y extendidos sobre sedimento característico de flujos de escombros. Bloques grandes cubren extensas áreas de la superficie del abanico aluvial asociado con el drenaje del Río Jones; campos de estos bloques son conspicuos a lo largo de la carretera CA9 en la vecindad de Piedra de Afilas (fig. 18), como a 6 km este-nordeste de Río Hondo. Al final de su desarrollo, el Río Jones fue capturado por un drenaje oriental cercano a su canal anterior cerca de Mal Paso, dejando a gran parte del abanico sin una fuente de deposición continua. Canales relictos angostos de entre 2 y 3 m de ancho y con diques característicos de flujos de

escombros, están bien preservados en la superficie antigua del abanico sugiriendo que el abanico fue abandonado recientemente, tal vez dentro de los últimos miles de años. A pesar de que los grandes flujos de escombros en el área, y que están asociados al Huracán Mitch, son históricamente únicos, el registro geológico muestra que son parte de un proceso a largo plazo.

Quebrada Sucia

La estación lluviosa de 1999 fue inusualmente húmeda, y el 17 de septiembre, 1999, una serie de flujos de escombros se iniciaron en el anfiteatro de acantilado escarpado de Quebrada Sucia, 7 km noroeste de Río Hondo (hoja 9) y conglutinados en el canal de Quebrada Sucia. El flujo de escombros cruzó la carretera CA9, sumergiendo a varios vehículos. Bloques de 3-4 m de diámetro fueron comunes en los depósitos del flujo de escombros (fig. 19), y la velocidad del flujo de escombros fue lo suficientemente grande para elevar depósitos en la parte externa de algunas curvas hasta 2-3 más altos que los depósitos en la parte interna de la curva.

Un residente local cuya finca colinda con Quebrada Sucia norte de la carretera CA9 dijo que no estaba lloviendo en su casa en el momento del flujo de escombros, pero que creía que había una gran tormenta en las montañas a la cabeza de Quebrada Sucia. Reportó que el primer escombros en venirse abajo por el drenaje fue una mezcla de troncos, rocas, y lodo, con grandes bloques siendo depositados en el momento. Eso fue seguido como 2 horas después por una inundación de agua (comunicación oral con Sergio Antonio Aparicio, enero 2000).

Debido a las fotografías aéreas utilizadas para cartografiar los depósitos de flujo de escombros mostrados en la hoja 9 fueron tomadas en algún momento entre enero y marzo 2000, no podemos excluir la posibilidad de que algunos de los deslizamientos de tierra mostrados en el drenaje de Quebrada Sucia no fueron desatados por el Huracán Mitch. De hecho, los residentes del área no observaron ningún flujo de escombros en el drenaje durante el



Figura 20. Deslizamientos de tierra en el cuadrángulo de La Unión. El prominente deslizamiento de tierra está en las coordenadas UTM 243175 E, 1648650 N.



Figura 21. Gran deslizamiento de tierra en el cuadrángulo de La Unión en coordenadas UTM 245000 E, 1647700 N.

Huracán Mitch, y el alto volumen de escombros transportados por el flujo de escombros de 1999 sugiere que los deslizamientos mostrados en el drenaje se originaron en septiembre 1999.

Cuadrángulo de la Sierra de las Minas (hoja 11)

Desaparición del drenaje en el área del Río Zarquito

El sedimento de un deslizamiento de tierra en el cuadrángulo nordeste del cuadrángulo de la Sierra de las Minas (hoja 11) sigue un drenaje sin nombre hacia el norte-nordeste por alrededor de 3 km hacia un final abrupto en una depresión cerrada en una barrera natural en el drenaje (UTM 247600 m E, 1693600 m N). No hay estancamiento o acumulación de sedimento en la depresión. El área tiene morfología cárstica, y la barrera fue probablemente causada por subsidencia sobre una caverna. El canal de un drenaje que se origina al pie de una colina empinada 1.7 km al norte-noroeste está llena de sedimento fresco sin ninguna fuente aparente. Inferimos que el sedimento fue transportado bajo tierra desde donde el sedimento desaparece en la depresión cerrada en el canal al sur-sureste.

Cuadrángulos de La Unión y Zacapa (hojas 10 y 13)

Hubieron varias áreas de concentraciones moderadas a densas de deslizamientos de tierra en las montañas que rodean La Unión y Zacapa (hojas 10 y 13). Las montañas son generalmente moderadas en inclinación y alcanzan una elevación máxima de alrededor de 1,800 m cerca del centro del cuadrángulo de La Unión. En general, en elevaciones de más de 1,000 m, el área está altamente forestada, mientras que en elevaciones menores hay cantidades variables de vegetación más pequeña y menos densa o de tierras limpias. El área está extendida sobre rocas metamórficas Paleozoicas, rocas intrusivas pre-Pérmicas a Terciarias, y volcánicas Terciarias y Cuaternarias (Bonis y otros, 1970). La mayoría de los deslizamientos de tierra ocurrieron en el cuadrángulo de La Unión en pendientes

extendidas sobre rocas metamórficas. Según los residentes de La Unión, los deslizamientos de tierra cerraron la carretera en ambos lados de la ciudad la noche el 30 de octubre o temprano en la mañana del 31 de octubre. El pueblo entonces quedó aislado por aproximadamente un mes mientras fueron limpiados los deslizamientos de tierra de la carretera. Abajo, describimos las cuatro principales concentraciones de deslizamientos de tierra, tres en el cuadrángulo de La Unión y uno en el cuadrángulo de Zacapa.

La primera concentración de deslizamientos de tierra y flujos de escombros es en la empinada topografía en los nacimientos del Río Timushán y la Quebrada Colorado, como a 3-7 km al sur de La Unión (hoja 13). Los deslizamientos de tierra se iniciaron de un área extendida sobre rocas metamórficas a elevaciones entre aproximadamente 1,100 m y 1,500 m. La mayoría probablemente fueron de menos de 3 m de profundidad y cubrieron menos de 1 ha. El material de los deslizamientos de tierra y flujos de escombros fue depositado en canales río abajo. La inundación y socavación a lo largo de estos canales contribuyó a la iniciación de varios deslizamientos grandes de tierra a lo largo de las orillas de los canales. Varios caminos que cruzaban estos canales fueron destruidas por la inundación.

La segunda concentración de deslizamientos de tierra es en una topografía empinada en y cerca de los pueblos de Talquezal y Volcán (hoja 13). La mayoría de la actividad de deslizamiento de tierra fue de 1 a 7 km al oeste de los pueblos, pero también observamos varios deslizamientos de tierra cerca de los pueblos que destruyeron campos de café y carreteras. La mayoría de los deslizamientos de tierra en estas áreas fueron similares a aquellos cerca de La Unión, según lo descrito arriba; esto es, fueron someros y pequeños en topografía empinada extendidos sobre rocas metamórficas a elevaciones de más de 1,000 m (fig. 20). La principal excepción a esta observación es un gran deslizamiento de tierra traslacional como a 1.5 km al suroeste del pueblo de Talquezal (fig. 21). Este

deslizamiento de tierra es de cómo 350 m de largo y tanto como 150 m de ancho (como 5 ha). Este deslizamiento depositó sedimento en áreas río abajo, pero aparentemente no causó daño a campos o residencias en las laderas. Hasta que este deslizamiento se llene de vegetación, continuará siendo una fuente de sedimento para áreas río abajo. Según residentes de Talquezal, este deslizamiento falló rápidamente alrededor de las 10 a.m. el 1 de noviembre, 1998.

La tercera concentración de deslizamientos de tierra es a lo largo del Río Grande o Jocotán en la esquina suroeste del cuadrángulo de La Unión. Esta concentración consistió principalmente de flujos de escombros con largos senderos de flujo (comúnmente de más de 700 m de largo) que terminaron en el río. La mayoría de los flujos de escombros se originó de un área extendida sobre roca intrusiva de lo que parecen ser las laderas más empinadas en el cuadrángulo de La Unión. Las elevaciones de los lugares de iniciación de los deslizamientos de tierra varían de 500 m a 1,100 m. Los flujos de escombros formaron abanicos en el canal del Río Grande o Jocotán. Sobre su intersección con la Quebrada de Lanchor, el canal parece haber sido limpiado hasta la roca basal por la inundación. Río abajo de la intersección, la deposición y la erosión lateral fueron los procesos dominantes. Los rieles de tren cerca de la intersección del Río Grande o Jocotán y el Río Grande de Zacapa fueron dañados por erosión lateral durante las inundaciones.

La cuarta concentración de deslizamientos de tierra está como a 3 km suroeste de El Conacaste en el cuadrángulo de Zacapa (hoja 10). Estos deslizamientos de tierra están en laderas moderadamente empinadas extendidos sobre rocas volcánicas Cuaternarias a elevaciones entre 1,100 m y 1,200 m. Los deslizamientos de tierra se iniciaron de antiguas cicatrices de deslizamientos de tierra y depósitos formados en las rocas volcánicas. Los deslizamientos de tierra probablemente tuvieron menos de 3-5 m de profundidad y generalmente cubrieron menos de 3 ha, pero contribuyeron con una gran cantidad de

sedimento a los canales río abajo. Debido a que hay muy pocos deslizamientos de tierra en áreas adyacentes más empinadas extendidos sobre rocas intrusivas y metamórficas, parece que la localización de los deslizamientos de tierra fue fuertemente controlado por las propiedades físicas del manto del suelo coluvial en las rocas volcánicas Cuaternarias; eso es, la geología hizo el área más susceptible a la ocurrencia de un deslizamiento de tierra.

Sierra de las Minas del Este y Montañas del Mico

La Sierra de Las Minas del este (hojas 14, 15 y 17), y su extensión este, las Montañas del Mico (hojas 16 y 19), forman una sierra de montañas alargadas relativamente angostas que ocupa una posición sur y este del Lago de Izabal y norte del Río Motagua. Las elevaciones son bajas comparadas con la parte central de la Sierra de las Minas; alcanzan un máximo de alrededor de 940 m en el cuadrángulo de Los Amates (hoja 15) y generalmente decrecen hacia el este. Contrario a la Sierra de Las Minas, que está predominantemente extendida sobre roca metamórfica, la Sierra de las Minas del este, está sobre una variedad de rocas incluyendo serpentinita de edad desconocida, roca carbonática Pérmica a Cretácica, roca

metamórfica Paleozoica, y lutita, arenisca, conglomerado y filita Carboníferos a Pérmicos (Bonis y otros, 1970; Muller, 1977). Las concentraciones más altas de deslizamientos de tierra están localizadas en los cuadrángulos de Los Amates (hoja 15), Mariscos (hoja 14), Castillo San Felipe (hoja 16) y Entre Ríos (hoja 19),

Cuadrángulo de Mariscos (hoja 14)

Deslizamientos de tierra al sur de Mariscos

La concentración principal de deslizamientos de tierra en el cuadrángulo de Mariscos (hoja 14) está en los flancos de varios picos sin nombre en un área inhabitada alrededor de 4-9 km al sur de Mariscos. Uno de los picos más altos en el área se identifica como hito "Cachirul" (elevación 844 m). Las pendientes en el área son de moderadas a empinadas. El área está forestada al lado este del Río Carcaguatalilla, y cubierto de grama (deforestada) al lado oeste del Río Carcaguatalilla. El área es justo al norte (0-4 km) de uno de los trazos localizados en el mapa de la falla del Motagua (Bonis y otros, 1970). La litología de rocas en el área es diversa y consiste de serpentinita de edad desconocida, carbonato Cretácico y lutita, arenisca, conglomerados y filita Carboníferos a Pérmicos. Los deslizamientos de tierra se iniciaron a elevaciones desde alrededor de 300 m a 800 m y variaron en área de menos de 1 ha hasta como 3 ha. Muchos deslizamientos de tierra se movilizaron hacia flujos de escombros. También hay varios flujos de tierra en el área, principalmente en las colinas cubiertas de grama al lado oeste del Río Carcaguatalilla. Uno de estos flujos de tierra se describe en la sección siguiente.

Flujo de Tierra de Piedra Parada

Varios flujos de tierra están en las montañas cubiertas de grama en la Finca Piedra Parada al lado oeste del Río Carcaguatalilla. Examinamos uno de estos flujos de tierra en el campo e informalmente lo hemos nombrado el flujo de tierra de Piedra Parada. El flujo de tierra de Piedra Parada (fig. 22) es como de 250 m de largo, 50 m de ancho, y 1m hasta 2 m de profundidad. La cabeza del flujo de tierra



Figura 22 Flujo de tierra de Piedra Parada. Vista al oeste. Coordenadas UTM 273100 E, 1698725 N.

está a una elevación de alrededor de 490 m. El flujo de tierra ocupa una posición al fondo de un pequeño drenaje en la pendiente que mira al nordeste. La superficie basal del deslizamiento del flujo de tierra está hasta arriba de la serpentinita que forma la roca basal, que ha sido pulida y estriada debido al movimiento del flujo de tierra. El material del flujo de tierra está compuesto de una matriz roja coluvión-suelo que contiene un número moderado de clastos de serpentinita de tamaños desde guijarros hasta bloques. La parte más alta del flujo de tierra incluye varios escarpes extencionales internos. Las porciones de en medio y bajas tienen varios escarpes compresionales (corrimiento).

Este flujo de tierra parece haberse movido en al menos dos fases. La primera fase del movimiento involucró suelo coluvial en la parte inferior del canal de drenaje. Este material se movió directamente hacia abajo del canal y luego al sur a medida que limpiaba el frente de la pendiente. La segunda fase del movimiento involucró suelo coluvial en las porciones superiores e inferiores del drenaje. Este material fluyó hacia abajo del canal y al norte a medida que limpiaba el frente de la pendiente. Dentro del canal, el movimiento fue traslacional encima de la superficie de la roca basal. Más allá del frente de la ladera, el flujo de tierra empujó, y fluyó sobre, suelos coluviales al pie de la ladera, el aluvión del canal, y posiblemente sobre antiguos depósitos de deslizamientos de tierra.

Una porción de la colina que falló como un deslizamiento de escombros está expuesta en el lado del flanco norte del flujo de tierra, en la parte superior del canal. La falla ocurrió durante y después del movimiento de la parte superior del flujo de tierra. La exposición revela que la roca basal corresponde a una serpentinita triturada y disgregada. En la base de esta exposición está el depósito del deslizamiento de escombros, que descansa dentro y encima del material del flujo de tierra.

Entrevistas con ayudantes de la finca y el dueño de la Finca Piedra Parada indican que el área que rodea el flujo de tierra fue deforestada alrededor de 1995. Un peón de

la finca que había trabajado en la finca por 35 años indicó que no había observado ninguna actividad de deslizamientos de tierra en el área antes del Huracán Mitch, incluyendo 1974, cuando dijo que hubo precipitación similar a aquella durante el Huracán Mitch, y en 1976, durante el terremoto $M=7.5$ en la falla del Motagua (vea Harp y otros, 1981). Estas observaciones sugieren que el área fue menos susceptible a la actividad de deslizamientos de tierra antes de la explotación forestal.

Cuadrángulo Los Amates (hoja 15)

Deslizamientos de tierra al noroeste de Los Amates

Una zona hacia el nordeste, prominente en deslizamientos de tierra, aproximadamente a 9 km al noroeste de Los Amates fue fuertemente controlada por la geología del área. Los deslizamientos de tierra en la zona se formaron sobre filita y esquisto Paleozoicos en el flanco empinado sureste de la Montaña de Colombia a elevaciones entre 400 m y 900 m. Una disminución abrupta en la densidad de deslizamientos de tierra al sureste de la zona coincide con el límite de la falla de corrimiento entre la filita y el esquisto hacia el noroeste donde la densidad de los deslizamientos de tierra es alto y la serpentinita hacia el sureste (Muller, 1977), donde la densidad de los deslizamientos de tierra es bajo.

Cuadrángulos del Castillo de San Felipe y Entre Ríos (hojas 16 y 19)

Hay varias concentraciones de deslizamientos de tierra de moderadas a densas cerca del límite del área de estudio en los cuadrángulos del Castillo de San Felipe (hoja 16) y Entre Ríos (hoja 19). La posición de los deslizamientos de tierra cerca de la frontera indica que pueden haber deslizamientos de tierra adicionales no localizados en el mapa en las montañas al norte de la frontera. La mayoría de los deslizamientos de tierra en el cuadrángulo del Castillo de San Felipe están en laderas de pendiente moderada a escarpada cerca

del Río San Marcos y de 4 km a 10 km al nordeste de la carretera CA 13. Los deslizamientos en el cuadrángulo de Entre Ríos están en laderas de pendiente moderada a empinada, 2 a 6 km norte de la carretera CA9. Deslizamientos de tierra individuales en ambos cuadrángulos generalmente cubren menos de 1 ha e inician a elevaciones desde 200 m hasta 600 m. Ambos cuadrángulos están extendidos sobre carbonatos Cretáceos y lutita, arenisca, conglomerados y filita del Carbonífero al Pérmico. Un gran deslizamiento de tierra en el cuadrángulo Entre Ríos hizo un dique en un tributario del Río Tenedores (vea dique de deslizamiento de tierra en UTM 321200 E, 1723200 N). No sabemos si este dique natural está reteniendo agua río arriba.

Región Fronteriza Guatemala-Honduras

En general, la densidad de los deslizamientos de tierra parece incrementar hacia el sureste en las vecindades de la frontera Guatemala-Honduras en la parte este de Guatemala (por ejemplo, cuadrángulo Cerro Caral, hoja 20). También observamos, pero no localizamos en el mapa, una alta densidad de deslizamientos de tierra en Honduras por medio de la restitución digital de fotografías aéreas de líneas de vuelo este-oeste que se extienden hacia Honduras.

Cuadrángulo Juyamá (hoja 18)

En la parte montañosa del cuadrángulo de Juyamá (hoja 18), no hubo fotografías aéreas por parte de la misión de mapeo IGN-NIMA utilizadas en otras partes en este estudio. Sin embargo, obtuvimos fotografías aéreas a escala 1:30,000 tomadas en marzo de 1999 por parte de Aerofoto Centroamericana, S.A. para parte del área y las utilizamos para localizar en el mapa un área cerca de la frontera Guatemala-Honduras. La densidad de los deslizamientos de tierra en parte del área del mapa es la más alta vista en nuestro estudio, con tantos como 120 deslizamientos de tierra localizados en el mapa en un área de 1 km². Mucha del área del mapa ha sido limpiada de árboles; los deslizamientos en

las áreas limpias comúnmente involucran sólo una capa superficial de vegetación y una capa inferior de coluvión y roca basal intemperizada debajo (rocas metamórficas Paleozoicas; Bonis y otros, 1970); hasta de 1-2 m de espesor. La mayoría de los deslizamientos de tierra están en elevaciones entre 500 a 1,000 m. Al momento de nuestra visita de campo al área en enero 2001, las cicatrices de los deslizamientos de tierra estaban revegetados excepto por escarpas empinadas a la cabeza de algunos deslizamientos.

Un finquero que vive en la parte central del área (UTM 291 583E, 1 686 039N) reportó que después de como 8 días de lluvia, hubo una tormenta intensa que duró como 3 horas. Cuando paró la tormenta todos los deslizamientos de tierra en los alrededores de su finca ocurrieron en un lapso de casi 1/2 hora después de la tormenta. En un deslizamiento de tierra en su finca, sus hijos estaban trabajando el terreno sobre el deslizamiento y corrieron fuera del campo a medida que la colina comenzaba a fallar. La falla de la colina se llevó a cabo dentro de un período de aproximadamente 5 minutos.

Mapeo de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra en los Cuadrángulos Pueblo Viejo y Río Hondo

Los cuadrángulos de Pueblo Viejo (hoja 8) y Río Hondo (hoja 9) fueron seleccionados para demostrar la utilidad de la cartografía de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra, porque incluyen abundantes deslizamientos de tierra disparados antes, durante y después del Huracán Mitch que se iniciaron en una variedad de gradientes de laderas e impactaron el ambiente de construcción. Adicionalmente, el deslizamiento de La Lima, que es modelado en una sección más adelante en este informe, está en el cuadrángulo de Río Hondo. Se cartografiaron 2951 deslizamientos de tierra disparados por el Huracán Mitch en estos dos cuadrángulos. Hemos utilizado los deslizamientos del Huracán Mitch para desarrollar un mapa de susceptibilidad a

deslizamientos de tierra para la precipitación prolongada controlada por la elevación asociada con el Huracán Mitch. Hemos utilizado los deslizamientos de tierra pre- y post- Huracán Mitch para evaluar el mapa de susceptibilidad.

La susceptibilidad a deslizamientos de tierra puede derivarse utilizando una cantidad de diferentes métodos dependiendo de los datos disponibles (Soeters y van Westen, 1996). En muchos métodos, las propiedades físicas de los materiales de la ladera de montaña, así como también los valores de gradiente de un modelo de elevación digital (DEM), son utilizados en un modelo de estabilidad de pendiente para estimar niveles variantes de susceptibilidad. En los cuadrángulos de Pueblo Viejo y Río Hondo, el mapeo geológico está incompleto y no se dispone de datos acerca de las propiedades físicas del suelo. Por lo tanto, los mapas de susceptibilidad que creamos estuvieron basados solamente en la localización de los deslizamientos de tierra y en los datos derivados de un DEM. Para poder determinar los factores que contribuyen a la susceptibilidad del deslizamiento de tierra, utilizamos el DEM para determinar la elevación, gradiente (inclinación de la superficie), curvatura topográfica y aspecto (dirección de la pendiente de la ladera) en cada lugar de iniciación del deslizamiento de tierra. Generamos distribuciones de frecuencia para cada grupo de datos donde la frecuencia es expresada como el porcentaje del número total de lugares de iniciación de los deslizamientos de tierra. La distribución de la frecuencia de cada grupo de datos de deslizamiento de tierra-iniciación (para este ejemplo, los gradientes de lugares de deslizamiento de tierra-iniciación), luego es comparada con la distribución de frecuencia de toda la población de datos dentro de los dos cuadrángulos (para este ejemplo, los gradientes de todas las celdas de 10 m dentro del área de estudio). Finalmente, se computó la relación entre la distribución de frecuencia por cada grupo de datos deslizamiento de tierra-iniciación y la distribución de frecuencia por datos de población correspondiente (ver Wieczorek y otros, 1988; y Coe y Godt, 2001, para otros

ejemplos de este enfoque). La lógica detrás de esta comparación es que cada grupo de datos deslizamiento de tierra-iniciación es un subgrupo del grupo de datos de la población correspondiente y que los valores de la relación que sean superiores a uno identifican áreas dentro de las distribuciones de frecuencia que fueron preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el evento desatante. Abajo, primero describimos cómo fue creado nuestro DEM, luego seguimos con una descripción y análisis de elevación, gradiente, curvatura y aspecto, y finalmente presentamos un mapa de susceptibilidad basado en resultados de nuestros análisis.

Creación del DEM

Utilizamos un DEM de 10 m de resolución que fue generado de contornos de 20 m en los cuadrángulos a escala 1:50,000. El DEM fue creado utilizando un algoritmo de drenaje-forzado, cuadrado-inverso, pesado-promedio. El algoritmo asigna valores de elevación a células DEM en base a su proximidad a las líneas de contorno, esto es, mientras más cerca está una celda a la línea de contorno, más cerca el valor de la celda al valor del contorno. El algoritmo también utiliza líneas interrumpidas (líneas que incluyen valores de elevación variables) a lo largo de cerros y drenajes, para asegurar que el DEM es hidrológicamente correcto. El algoritmo produce un DEM que es ideal para el modelaje de flujo (ver modelaje utilizando el programa LAHARZ en la siguiente sección) pero introduce cambios abruptos en elevaciones entre las celdas del DEM cerca de las líneas de contorno. Cuando el DEM es visto como un mapa de relieve sombreado, los cambios abruptos en elevación son visibles como gradas o terrazas en la superficie de DEM. Debido a que estas gradas y terrazas pueden afectar adversamente nuestro análisis de gradiente, procesamos el DEM utilizado para el análisis de gradiente, de la forma siguiente. Primero, creamos una cuadrícula de gradiente utilizando la función de *pendiente* en ArcInfo. La función de *pendiente* computa un gradiente en cada celda de la cuadrícula basado en el cambio máximo en

elevación a partir de las ocho celdas que lo rodean. Media vez fue creada la cuadrícula de gradiente, filtramos la cuadrícula utilizando la función "focalmean" en ArcInfo. La función "focalmean" computa un valor medio en cada celda de la cuadrícula basada en los valores de las celdas vecinas. Utilizamos un radio de 7 celdas (70 m) para definir las celdas vecinas utilizadas en el cómputo de la media. Encontramos que el procesamiento removía la mayoría de los artefactos de gradas y terrazas. El DEM original fue utilizado para análisis de elevación, curvatura topográfica, y aspecto.

Análisis de Elevación

Para cada deslizamiento de tierra cartografiado, se determinó una elevación digitalmente sobreponiendo la localización de los deslizamientos de tierra-iniciación en el DEM y registrando la elevación de la celda del DEM que fue coincidente con cada lugar de iniciación del deslizamiento de tierra. Alrededor del 96 por ciento de los deslizamientos de tierra se iniciaron en elevaciones entre 500 m y 2,500 m (fig. 23 y hoja 22). Cuando se tabula la frecuencia de los deslizamientos de tierra para cada cambio en elevación de 100 m, el mayor porcentaje de deslizamientos de tierra (como 11.7 por ciento del total) ocurrieron entre 2,000 y 2,100 m. Toda la población de elevaciones a celdas DEM de 10 m en los

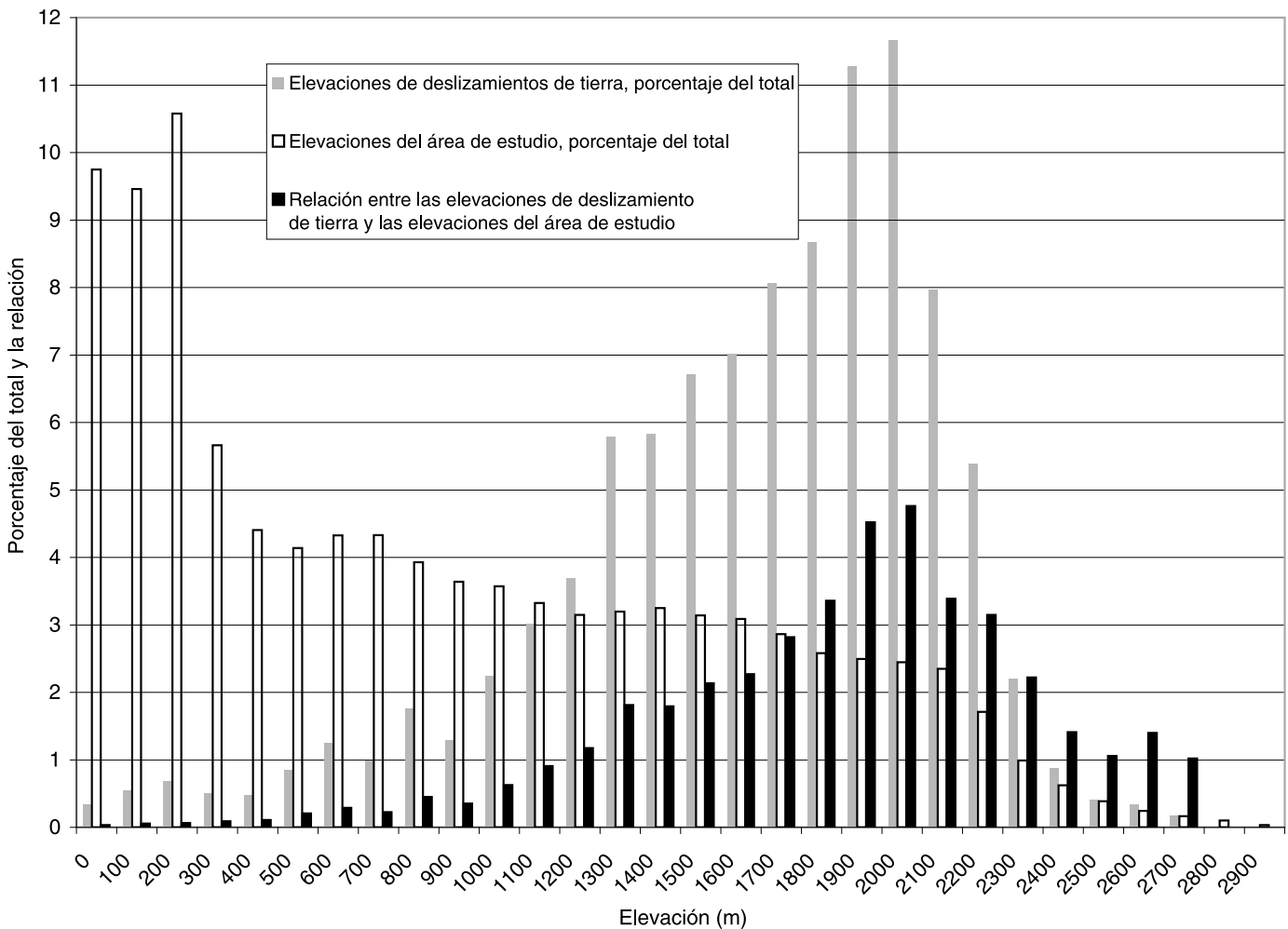


Figura 23. Histogramas de elevaciones medidas del DEM de 10 m. El número de celdas de 10 m en el área de estudio es de 10 millones. El número de deslizamientos de tierra es 2,951. La relación fue computada dividiendo el porcentaje de elevaciones de deslizamientos de tierra por el porcentaje de elevaciones en el área de estudio para cada categoría del

dos cuadrángulos varía de 1 m hasta casi 2,990 m (fig. 23). El mayor porcentaje de estas elevaciones (como 10.6 por ciento del total) ocurre entre 200 m y 300m. La relación entre los gradientes de deslizamiento de tierra-iniciación y toda la población de gradientes (fig. 23) indica que las áreas con elevaciones entre 1,200 m y 2,800 m, donde la relación es mayor de 1, fueron preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. Los datos de precipitación disponibles indican que estas áreas fueron probablemente preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra debido a que recibieron más cantidad de precipitación que áreas a elevaciones menores. A pesar de que sólo hubo dos pluviómetros operando en los dos cuadrángulos durante el Huracán Mitch, los datos de estos pluviómetros muestran

que casi el doble de lluvia cayó a 1,800 m (pluviómetro de San Lorenzo) que a 260 m (pluviómetro de Pasabién). Las diferencias en la densidad y en las especies de vegetación (alta densidad, especies tropicales a elevaciones mayores; baja densidad, especies semi-áridas a elevaciones menores) sugieren que este patrón de precipitación es típico para la región. La abundancia de deslizamientos de tierra a elevaciones mayores (hojas 8 y 9) indican que la precipitación del Huracán Mitch a elevaciones mayores fue excepcional para la región.

Análisis del Gradiente

Para cada deslizamiento de tierra cartografiado, se determinó una elevación, digitalmente sobreponiendo los lugares de

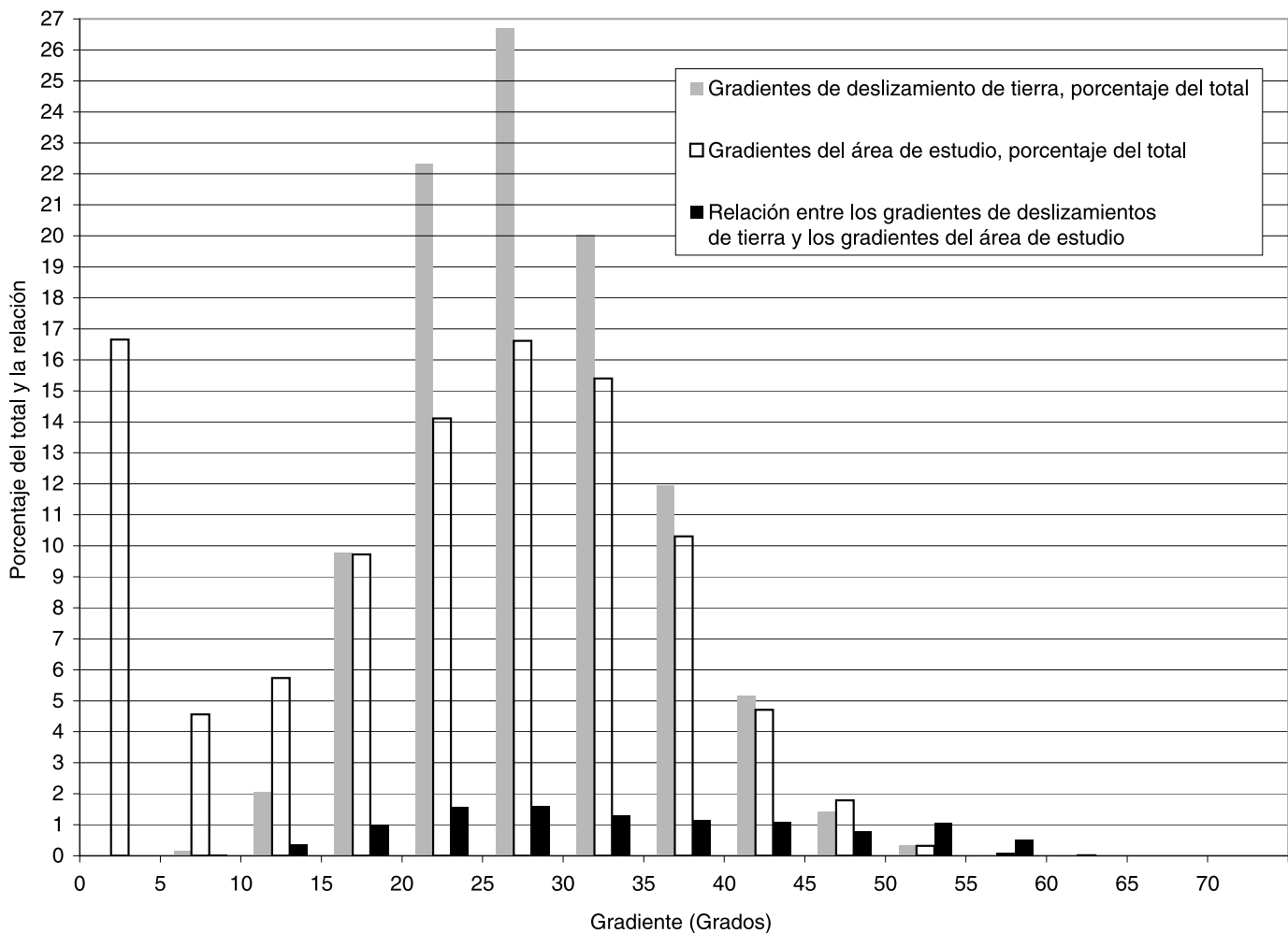


Figura 24. Histogramas de gradientes medidos de la cuadrícula de gradiente. Vea el título de la figura 23 para el número total de celdas de 10 m y el número de deslizamientos de tierra. La relación fue computada dividiendo el porcentaje de gradientes de deslizamientos de tierra por el porcentaje de gradientes en el área de estudio para cada categoría del

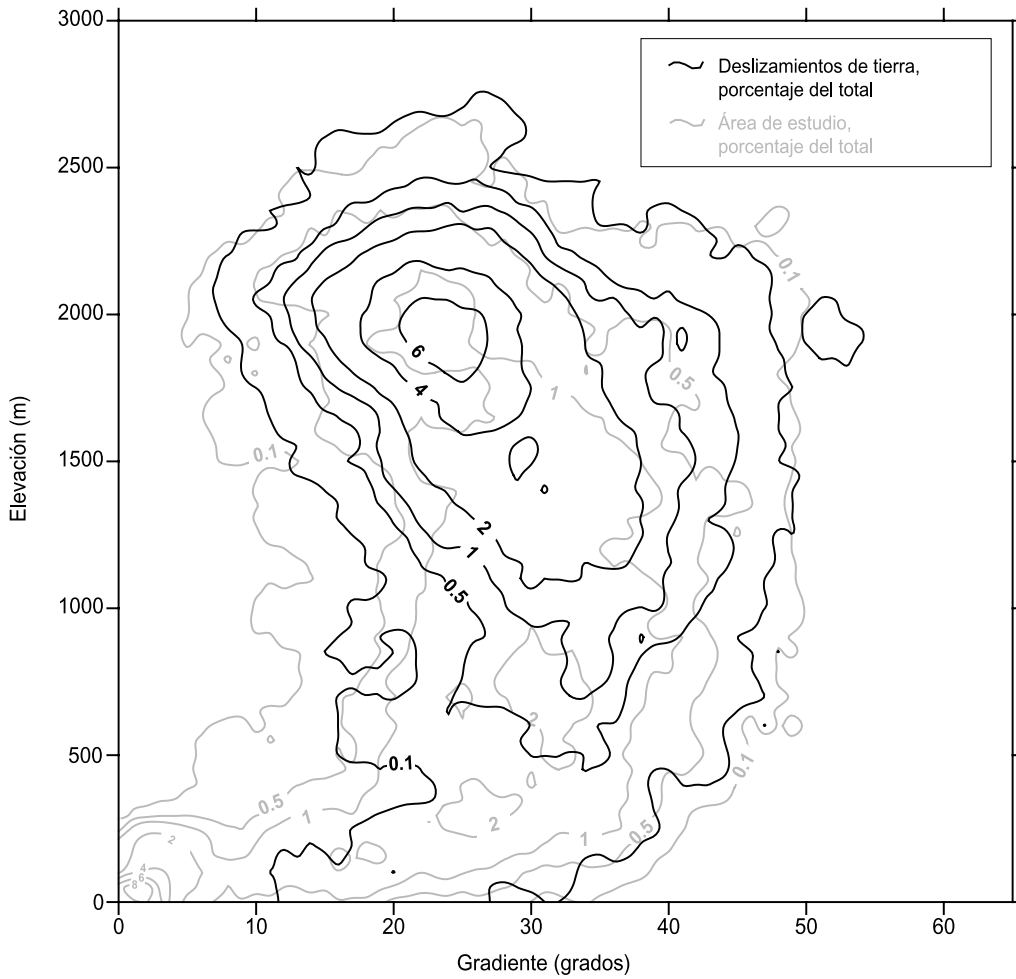


Figura 25. Diagrama mostrando la elevación de deslizamientos de tierra y las celdas del área de estudio con respecto a los gradientes correspondientes. Los datos del área de estudios son del muestreo al azar de la población total de celdas de 10 m. Los porcentajes fueron obtenidos utilizando el programa PTCOUNT (Savage y otros, 2001). PTCOUNT utiliza metodología de movimiento de conteo de círculos para contar puntos de datos. Utilizamos un tamaño de conteo de círculo de 2.5 unidades (elevación y gradiente) y un espaciamiento en la cuadrícula de 1 unidad. Después de contar, los puntos contados fueron convertidos a un porcentaje del total. El número total de puntos de muestra al azar fue de 3299. El número de deslizamientos de tierra es 2951.

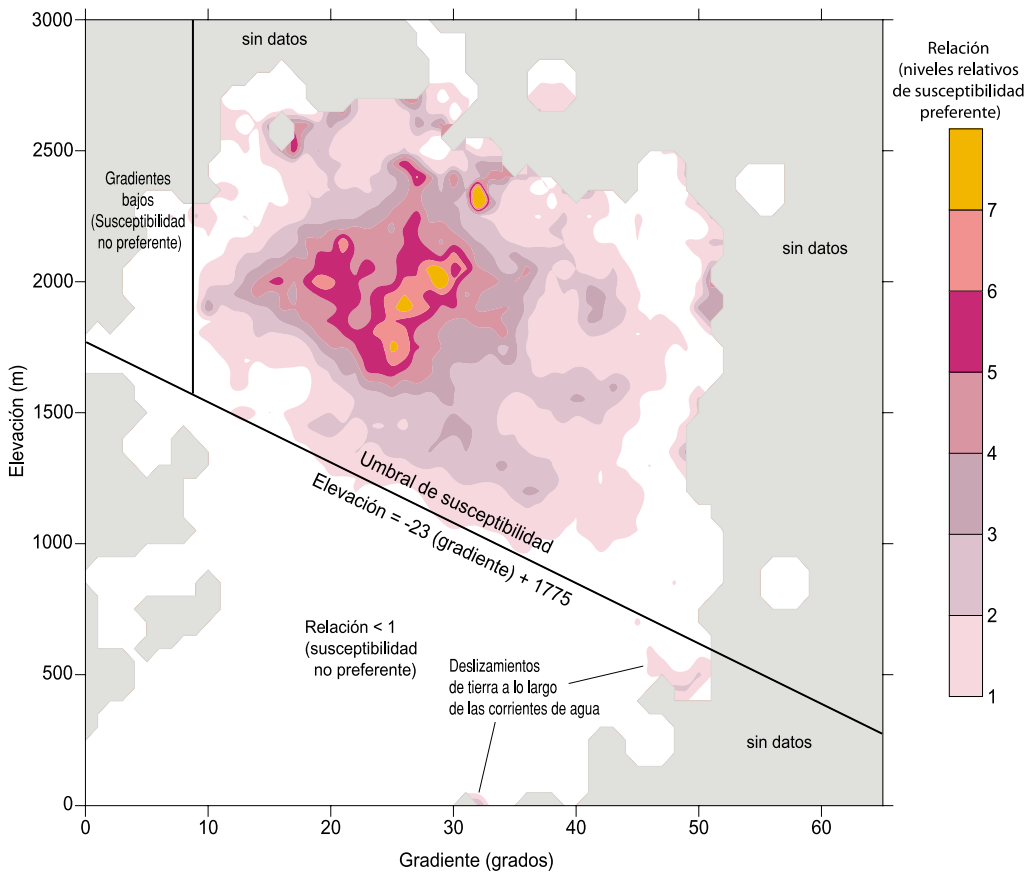


Figura 26. Diagrama mostrando la relación entre los datos de los deslizamientos de tierra y los datos del área de estudio como se muestra en la figura 25. Las relaciones mayores que uno son preferentemente susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Las áreas sin datos son lugares donde no hubo puntos de muestra en el área de estudio escogidos al azar pero sí hubo puntos de deslizamientos de tierra.

iniciación del deslizamiento de tierra en la cuadrícula de filtro de gradiente y registrando el gradiente de la celda de la cuadrícula que fue coincidente con cada lugar de iniciación del deslizamiento de tierra. Alrededor del 96 por ciento de los deslizamientos de tierra se iniciaron en gradientes entre 15° y 45° (fig. 24). Cuando la frecuencia de deslizamientos de tierra es tabulada para cada cambio de 5° en el gradiente, el mayor porcentaje de deslizamientos de tierra (como 26.7 por ciento del total) ocurrió entre 25° y 30°. Toda la población de gradientes en celdas DEM de 10 m en los dos cuadrángulos varía hasta en 75°. El mayor porcentaje de gradientes (como 16.6 por ciento del total) ocurre entre 0° y 5° y entre 25° y 30° (fig. 24). La relación de gradientes deslizamiento de tierra-iniciación con el total de población de gradientes (fig. 24) indica que la mayoría de las áreas con gradientes entre 15° y 55°, donde la relación es mayor de 1, fueron preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. No hay una correlación positiva fuerte entre la relación y el gradiente. Tal correlación indicaría que la incidencia de deslizamientos de tierra incrementaría a medida que incrementa el gradiente. Nuestros datos parecen indicar que todas las áreas con gradientes arriba de 15° fueron casi igualmente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. Sin embargo, esta observación no toma en cuenta la distribución de gradientes con respecto a la precipitación.

Un análisis de gradiente con respecto a la elevación, un sustituto para la precipitación, provee un discernimiento adicional hacia la susceptibilidad a deslizamientos de tierra. La figura 25 muestra los porcentajes relativos de gradientes y elevaciones de los lugares de iniciación de deslizamientos de tierra y para una muestra al azar de celdas de población. Utilizamos una muestra al azar de celdas de población, en oposición a todas las celdas de población, debido a que el gran número de celdas de población (como 10 millones) hacía difícil de analizar todos los datos de la población. Una relación de estos dos grupos de datos (fig. 26) muestra un grupo preciso

de preferente susceptibilidad durante el Huracán Mitch. El límite (bound) menor del grupo forma una línea relativamente recta que puede ser moldeada utilizando la ecuación $y = -23x + 1775$, en la que y es elevación y x es gradiente. Esta línea define un umbral de susceptibilidad, esto es, las elevaciones sobre esta línea tuvieron una susceptibilidad preferente a deslizamientos de tierra durante Mitch, y aquellas debajo de la línea no tuvieron una susceptibilidad preferente. La orilla izquierda del grupo define una línea de gradiente de corte, esto es, los gradientes a la izquierda del corte ($< 9^\circ$) no tuvieron una susceptibilidad preferencial, mientras que los gradientes a la derecha del corte ($\geq 9^\circ$) fueron preferentemente susceptibles. El umbral de susceptibilidad hace un sentido intuitivo debido a que indica que a medida que incrementa el gradiente, la elevación decrece, esto es, porque la elevación es un sustituto para la precipitación del Huracán Mitch, la cantidad de lluvia requerida para hacer que fallen gradientes empinados es menor que la requerida para hacer que fallen gradientes someros.

Análisis de la curvatura topográfica

Los índices de curvatura topográfica son frecuentemente utilizados para inferir la dirección y concentración del flujo de agua sobre una superficie topográfica y pueden ser utilizados para delinear formas de relieve en unidades geomórficas tales como crestas y canales (por ejemplo, vea Gallant y Wilson, 2000). Se ha mostrado que la curvatura topográfica controla el transporte de suelos coluviales pendiente abajo, la afluencia de la superficie, y el flujo somero sub-superficie en pendientes con manto coluvial (Dietrich y otros, 1995). La curvatura topográfica está comúnmente computada de las elevaciones de celdas en un DEM. La curvatura puede ser computada para toda la superficie que rodea cada celda de DEM, o la curvatura de la superficie en una dirección particular. En este estudio, utilizamos la función de la curvatura en ArcInfo para computar la curvatura de la superficie de DEM perpendicular al aspecto (dirección de inclinación de la superficie de

tierra) para cada celda en el DEM original. ArcInfo se refiere a este tipo de curvatura como una curvatura vista desde arriba. La función de curvatura computa la curvatura vista desde arriba encajando un polinomio de cuarto orden a nueve elevaciones contenidas en una ventana de celdas 3x3 donde la celda del centro es la celda para la cual está siendo computada la curvatura. Las unidades de la curvatura vistas desde arriba son 1/100 m. Los valores negativos indican topografía cóncava hacia arriba y los valores positivos indican topografía convexa hacia arriba. Las superficies planas tienen una curvatura de 0. Los materiales transportados por procesos coluviales y la afluencia de la superficie tienden a acumularse en áreas cóncavas. Como resultado, el coluvión, suelos coluviales, y sedimentos tienden a ser más gruesos en áreas cóncavas. Algunos estudios sugieren que las áreas cóncavas son más susceptibles a la iniciación de deslizamientos de tierra someros (Dietrich y otros, 1986).

Determinamos un valor de curvatura vista desde arriba para cada deslizamiento de tierra cartografiado por medio de sobreponer digitalmente los lugares de iniciación de deslizamientos de tierra en la cuadrícula de celdas de curvatura y registrando la curvatura de la celda de la cuadrícula que coincidiera con cada lugar de iniciación de deslizamiento de tierra. Noventa y nueve por ciento de los deslizamientos de tierra se iniciaron de áreas que tenían curvaturas vistas desde arriba entre **-4 y +4** (fig. 27). El mayor porcentaje de deslizamientos de tierra (como 10.1 por ciento del total) tenían valores de curvatura cero (fig. 27) y la curvatura de los deslizamientos de tierra fue aproximadamente normalmente distribuida alrededor de cero. Como con las curvaturas de los deslizamientos de tierra, 99 por ciento de toda la población de las celdas DEM de 10 m tenían curvaturas que variaron desde **-4 y +4** (fig. 27). El mayor porcentaje de estas curvaturas (como 17.7 por ciento del total) tenían valores de cero y las curvaturas fueron aproximadamente normalmente distribuida alrededor de cero. La relación de curvaturas deslizamiento de tierra-iniciación con la población total de

curvaturas (fig. 27) revela que ambas áreas, cóncava (curvaturas menos de cero) y convexas (curvaturas mayores de cero) fueron igualmente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch.

Análisis del aspecto

Utilizamos el DEM original para crear un cuadrícula de aspecto (dirección de inclinación de la superficie) utilizando la función *aspecto* de ArcInfo. La función *aspecto* determina el aspecto de cada celda DEM identificando la dirección pendiente debajo del ritmo máximo de cambio en elevación entre la celda DEM y sus celdas vecinas. Los valores de aspecto varían desde 0° hasta 359°. Un aspecto fue determinado por cada deslizamiento de tierra cartografiado, sobreponiendo digitalmente los lugares de iniciación de los deslizamientos de tierra en la cuadrícula de aspecto y registrando el aspecto en la celda de la cuadrícula coincidente con cada lugar de iniciación de deslizamiento de tierra. Cuando la frecuencia del deslizamiento de tierra es tabulado por cada 10° de cambio en aspecto, el mayor porcentaje de deslizamiento de tierra (como 6.8 por ciento del total) ocurrió entre 90° y 100°. El mayor porcentaje de toda la población de aspectos para todas las celdas de 10 m en los dos cuadrángulos (como 4.5 por ciento del total) también ocurre entre 90° y 100°. La relación de los aspectos de iniciación a la población entera de aspectos (fig. 28) indica que las pendientes que miran al este, al sureste, y al sur (aspectos entre 70° y 220°, en la Fig. 28) fueron preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. La razón por esta preferencia no está clara. Sin embargo, una posible explicación es que la preferencia está relacionada con la posición y la dirección del movimiento del Huracán Mitch. Entre octubre 30 y noviembre 1, 1998, cuando cayeron las lluvias más fuertes en Guatemala, el ojo del Huracán Mitch estaba al sur de los dos cuadrángulos y la dirección de los movimientos era de este a oeste (fig. 1). La dirección del movimiento y la posición del Huracán Mitch pudieron haber causado que

las pendientes que ven de este a sur recibieran más lluvia que las pendientes que ven de oeste a norte.

Mapas de Susceptibilidad

Como lo indicamos arriba, producimos un mapa mostrando la susceptibilidad de deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. Este mapa muestra la susceptibilidad para la ocurrencia de deslizamientos de tierra, pero no muestra los senderos del flujo o el riesgo asociado con los deslizamientos de tierra potenciales.

El mapa de susceptibilidad para el Huracán Mitch (hoja 23) fue creado utilizando el umbral de susceptibilidad desarrollado utilizando datos de gradiente y

elevación (fig. 26). Todas las áreas con gradientes de 9° o mayores y elevaciones superiores a la línea del umbral se muestran como susceptibles a deslizamientos de tierra. Los datos de la curvatura vista desde arriba no fueron utilizados para crear el mapa porque nuestro análisis de curvatura mostró que los deslizamientos de tierra ocurrieron en aproximadamente igual número tanto en pendientes cóncavas como convexas. Además, no utilizamos los datos de aspecto porque no estábamos seguros de cómo interpretar estos datos. Estos datos mostraron que las pendientes que ven del este al sur fueron preferiblemente susceptibles a deslizamientos de tierra. Los usuarios del mapa de susceptibilidad deberán estar conscientes que esta preferencia existió para

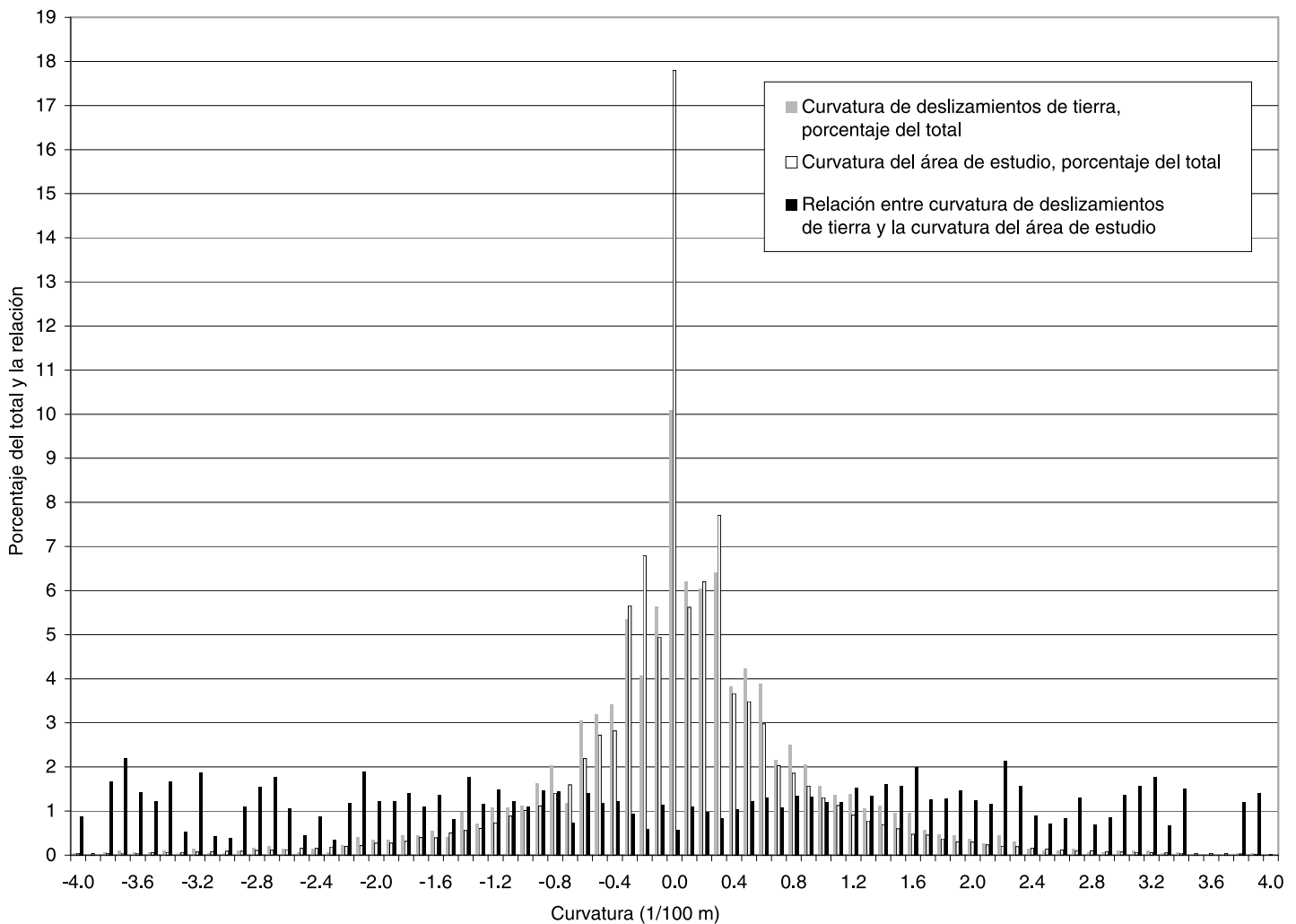


Figura 27. Histogramas de curvaturas medidas desde la cuadrícula de curvatura vista desde arriba. Vea el título de la figura 23 para el número total de celdas de 10 m y el número de deslizamientos de tierra. La relación fue computada dividiendo el porcentaje de curvaturas de deslizamientos de tierra por el porcentaje de curvaturas en el área de estudio para cada categoría del histograma.

el Huracán Mitch y que puede existir durante tormentas futuras similares al Huracán Mitch. También puede observarse que a pesar de que algunas áreas donde el gradiente es muy empinado (mayor que 50°) se muestran como susceptibles, la figura 24 indica que el porcentaje de deslizamientos de tierra que realmente ocurrieron en estos gradientes es muy bajo (como 0.5 por ciento del total). Adicionalmente, obsérvese que los gradientes muy empinados a los que les falta manto de suelo coluvial pueden ser susceptibles a deslizamientos de tierra profundamente asentados, que involucran lechos de roca, pero no son susceptibles a deslizamientos de tierra someros coluviales.

Noventa por ciento de los deslizamientos de tierra localizados en el mapa que fueron

desatados por el Huracán Mitch están dentro de la zona de susceptibilidad mostrada en el mapa. Ochenta y seis por ciento de los deslizamientos de tierra pre Huracán Mitch, y todos los deslizamientos de tierra post Huracán Mitch, están dentro de la zona de susceptibilidad. El alto porcentaje de deslizamientos de tierra pre y post Mitch que caen dentro de la zona de susceptibilidad sugiere que la correlación positiva entre la elevación y la precipitación, que fue observada durante el Huracán Mitch, también puede aplicarse para otras tormentas. Si estudios futuros confirman esta hipótesis, entonces el mapa de susceptibilidad del Huracán Mitch puede aplicarse para predecir susceptibilidades a deslizamientos de tierra durante tormentas que ocurren más comúnmente.

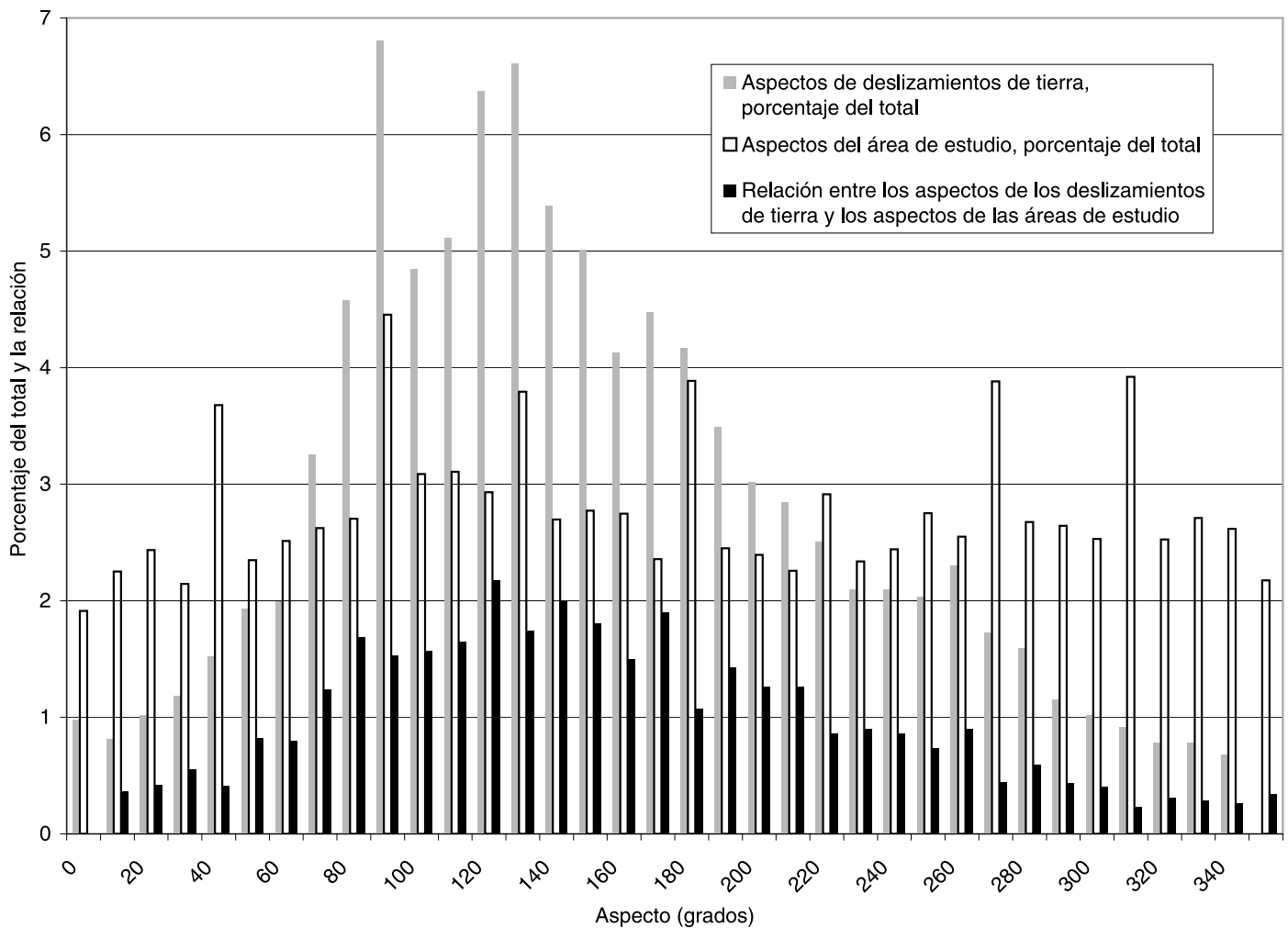


Figura 28. Histogramas de aspectos medidos desde la cuadrícula de aspecto. Vea el título de la Figura 23 para el número total de celdas de 10 m y el número de deslizamientos de tierra. La relación fue computada dividiendo el porcentaje de aspectos de deslizamientos de tierra con el porcentaje de aspectos en el área de estudio para cada categoría del histograma.

Una manera adicional como podría evaluarse esta hipótesis sería localizar en el mapa todas las cicatrices de los deslizamientos de tierra Cuaternarios y depósitos en los dos cuadrángulos (no sólo los recientes como en este estudio). Si las características de estos deslizamientos de tierra están dentro de la zona de susceptibilidad definida en este estudio, entonces esto sería una evidencia muy fuerte de que el mapa de susceptibilidad del Huracán Mitch aplica a todas las tormentas. Otra manera de evaluar esta hipótesis sería estudiar las características de la precipitación a largo término a partir de pluviómetros a varias elevaciones. Tal estudio podría ayudar a determinar un umbral de precipitación que desate deslizamientos de tierra, así como determinar si tal umbral puede alguna vez

excederse a elevaciones más bajas, y que tan frecuentemente es excedido a elevaciones mayores. Los datos históricos existentes de deslizamientos de tierra serían particularmente útiles en el desarrollo de un umbral de precipitación que desate deslizamientos de tierra.

Falla simulada del dique del deslizamiento de tierra en el Río La Lima

Dos grandes deslizamientos de tierra desatados por el Huracán Mitch afectaron el Río La Lima como 4 km río arriba del pueblo de Jones en el cuadrángulo de Río Hondo (hoja 9). El deslizamiento de tierra inferior hizo un dique en el río. El dique del deslizamiento de tierra tiene un volumen estimado de 500,000 m³ y embalsa unos 200,000 m³ de agua y sedimento derivados del deslizamiento de tierra superior. La probabilidad de falla de los 700,000 m³ totales es considerada pequeña, pero en el evento de un terremoto fuerte, una tormenta severa, o una combinación de las dos, una falla catastrófica es posible (Schuster y otros, 2001). Para evaluar la amenaza potencial debido a la falla catastrófica en el dique del deslizamiento de tierra, aplicamos una simulación basada en GIS utilizando el programa LAHARZ (Schilling, 1998) para estimar el área planimétrica y de cruce seccional inundada por el flujo de escombros resultante. LAHARZ está escrito en el Lenguaje de ArcInfo (AML) que corre dentro del módulo GRID de ArcInfo y delimita áreas de inundación potencial de grandes flujos de escombros o "lahares" que se originan en los flancos de los volcanes. El programa utiliza un modelo de elevación digital (DEM) y los resultados de un análisis de escala y estadístico de 27 "lahares" de nueve volcanes para estimar las áreas de inundación de cruce seccional y planimétricas como una función de los volúmenes de deslizamientos de tierra (Iverson y otros, 1998; Schilling, 1998). El análisis de Iverson y otros (1998) y el programa LAHARZ derivado no fue específicamente intencionado para la predicción de áreas inundadas debido a fallas catastróficas de diques de deslizamiento de tierra. Sin embargo, las

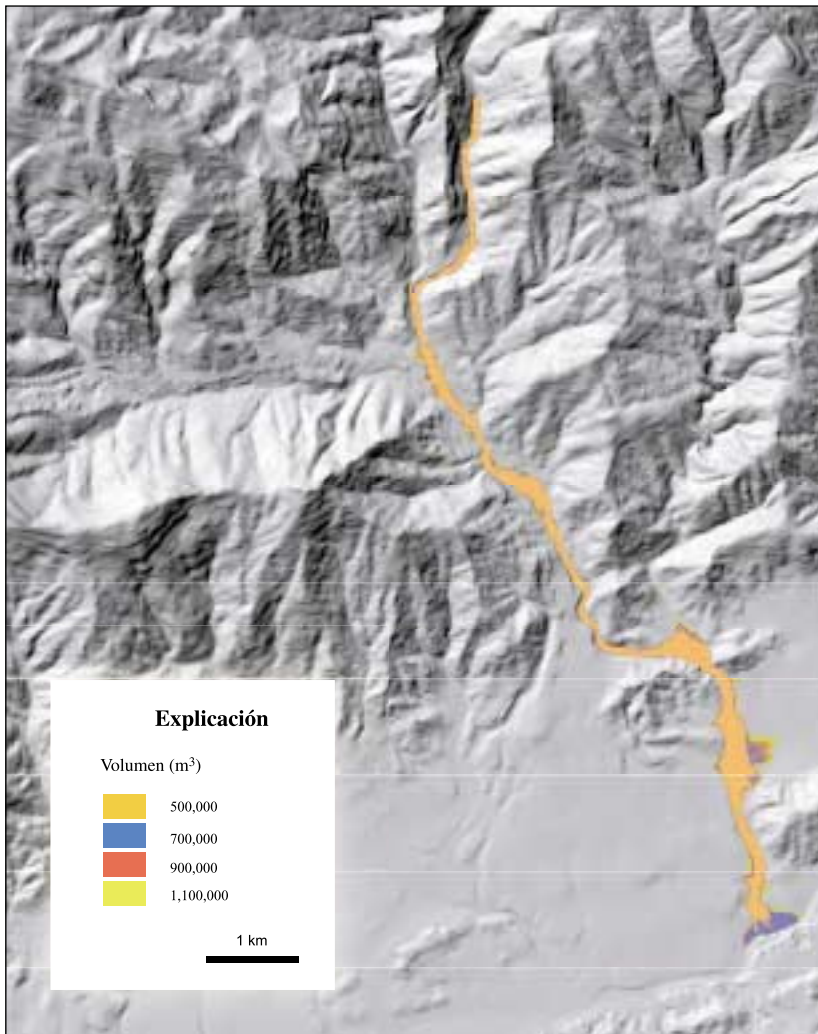


Figura 29. Áreas de inundación del modelaje de LAHARZ del DEM para los volúmenes dados en la explicación.

condiciones en el sitio de La Lima son muy similares a aquellas a las que el modelo fue diseñado para simular, esto es, el volumen potencial de flujo de escombros es grande y razonablemente bien constreñido, y el flujo de escombros estaría bastante confinado al canal del Río La Lima.

Se corrieron cuatro simulaciones de volúmenes de flujo de escombros de 500,000 m³, 700,000 m³, 900,000 m³, y 1,100,000 m³. Este rango representa la falla del dique del deslizamiento de tierra (500,000 m³), el sedimento embalsado y el arrastre de material adicional del deslizamiento de tierra superior (1,100,000 m³). Los resultados muestran que las simulaciones de LAHARZ claramente definen zonas de amenaza en áreas de pendiente baja adyacentes al canal del Río La Lima (fig. 29). La extensión de estas zonas de peligro no pudo ser delimitada por la inspección de un mapa topográfico solamente, demostrando entonces la utilidad de este enfoque. La comparación de la simulación con el alcance del depósito localizado en el mapa que resultó del flujo de escombros durante el Huracán Mitch muestra un buen acuerdo con la inundación predicha por un volumen de flujo de escombros de 700,000 m³ (fig. 29 y hoja 9). Este resultado sugiere que el volumen del flujo de escombros desatado por el Huracán Mitch en el drenaje del Río La Lima fue de al menos 700,000 m³.

RESUMEN

El Huracán Mitch desató alrededor de 11,500 deslizamientos de tierra en un área de 10,000 km² del este-central de Guatemala. En promedio, esto es como un deslizamiento de tierra/km² hasta tantos como 120 deslizamientos de tierra/km². La precipitación por el Huracán Mitch fue excepcional porque estuvo geográficamente esparcida, se prolongó por un período de como una semana, con intensidad de moderada a fuerte, y ocurrió al final de la estación lluviosa cuando el suelo ya tenía un contenido alto de humedad. Según se documentó en este informe, este tipo de precipitación, en tierra saturada o casi saturada, tiene la capacidad de desatar tanto

deslizamientos de tierra someros como profundos sobre un área grande. Los deslizamientos de tierra documentados en este estudio probablemente pudieron haber sido menos extensos si el Huracán Mitch hubiese ocurrido antes durante la estación lluviosa.

Hemos realizado pocas observaciones limitadas respecto a la cantidad de precipitación necesaria para desatar deslizamientos de tierra. Específicamente, los relatos de testigos en tres de los deslizamientos de tierra profundos más grandes indicaron que los tres ocurrieron el 1 de noviembre, 1998, cerca del final de la precipitación del Huracán Mitch. Datos de pluviómetro recolectados cerca de uno de los deslizamientos de tierra indican que el deslizamiento ocurrió después de 6 días de lluvia que promediaron como 46 mm/día. También fuimos capaces de documentar cantidades de precipitación que desataron deslizamientos de tierra someros que se movilaron hacia flujos de escombros. No obstante, estos datos vienen de flujos de escombros que ocurrieron en septiembre de 1999, pero que fueron útiles. En este caso, los flujos de escombros fueron desatados durante un período de precipitación fuerte precedido por 1,280 mm de precipitación anterior durante 1999. La precipitación en el día del flujo de escombros fue de 66 mm, que fue comparable con la precipitación diaria más fuerte durante el Huracán Mitch.

Las áreas afectadas por los deslizamientos de tierra fueron típicamente pendientes de moderadas a empinadas con manto de suelo coluvial. En varias áreas, la geología interna jugó un papel, haciendo las pendientes preferentemente susceptibles a deslizamientos de tierra. Las unidades geológicas en estas áreas fueron limolitas Pérmicas, rocas volcánicas Cuaternarias, así como filita y esquisto Paleozoico. Muchos deslizamientos de tierra someros típicamente se movilaron a flujos de escombros y afectaron áreas ladera abajo, incluyendo pendientes menos empinadas y drenajes. Una vez los escombros de los flujos estaban en los drenajes, frecuentemente eran acarreados por grandes distancias río abajo (hasta casi 14 km) por inundaciones o por flujos más grandes de escombros unidos.

Estos flujos frecuentemente acarrearán escombros desde frentes de montañas o sobre sus laderas hacia ríos mayores. En particular, los escombros de los deslizamientos de tierra y los flujos de escombros contribuyeron al menos con una cantidad moderada de sedimento al Río Motagua y sus tributarios principales. Las áreas afectadas por grandes deslizamientos de tierra fueron similares a las áreas de deslizamientos de tierra someros, pero frecuentemente involucraban grandes fragmentos de roca basal. Debido al gran volumen de material involucrado y la falla relativamente rápida de estos grandes deslizamientos de tierra, tendieron a tener un efecto más inmediato y catastrófico en áreas río abajo. Además, los grandes deslizamientos de tierra tienden a permanecer como amenazas por deslizamientos de tierra, esto es, sus áreas fuente permanecen inestables y tienen el potencial para contribuir con moderados a grandes volúmenes de sedimento en lugares río abajo al menos hasta que se vuelven a reforestar.

Utilizamos DEMs de 10 m generados de contornos de dos cuadrángulos en la Sierra de las Minas central para crear un mapa mostrando la susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Para crear el mapa de susceptibilidad del Huracán Mitch, desarrollamos una ecuación de umbral de susceptibilidad basada en la elevación y el gradiente. El análisis indica que en al menos uno de estos dos cuadrángulos, los gradientes menores de 9° no fueron susceptibles a deslizamientos de tierra durante el Huracán Mitch. Debido a que podemos mostrar que la elevación fue un sustituto para la precipitación en estos dos cuadrángulos, la pendiente de la línea definida por la ecuación del umbral de susceptibilidad indica que se requería de menos precipitación para iniciar deslizamientos de tierra en gradientes empinados que en gradientes someros.

Utilizamos el programa LAHARZ para modelar el área potencial río abajo afectada por escombros si llegara a fallar un gran dique de deslizamiento de tierra en el Río La Lima. El modelo muestra que el área afectada sería similar al área que fue

afectada por el flujo de escombros que se movilizó de un gran deslizamiento de tierra a lo largo del Río La Lima durante el Huracán Mitch. El programa LAHARZ provee una herramienta poderosa para la planificación del escenario de un peligro a lo largo de drenajes.

IMPLICACIONES PARA LAS AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

Las características de los deslizamientos de tierra desatados por precipitación descritos en este informe pueden ser utilizados como una guía parcial para futuras actividades de deslizamientos de tierra desatados por tormentas de lluvia. En base a los datos existentes, las áreas peligrosas incluyen: laderas de montaña con pendientes moderadas a empinadas y áreas menos empinadas directamente debajo de estas laderas, canales de drenaje ladera abajo de laderas de montaña con tendencia a deslizamientos de tierra, y abanicos aluviales en las bocas de drenajes a lo largo de frentes de montañas o de sus laderas. La evidencia de para, y la frecuencia de, deslizamientos de tierra pasados en lugares individuales pueden ser utilizados para determinar el nivel de una futura amenaza (por ejemplo, vea Coe y otros, 2000). Esto es, uno de los mejores indicadores de actividad futura de deslizamientos de tierra es la evidencia de actividad pasada de deslizamientos de tierra. Por esta razón, los mapas de inventario de los deslizamientos de tierra que muestran deslizamientos de tierra Cuaternarios, históricos y modernos, son de importancia crítica. Las áreas susceptibles a deslizamientos de tierra desatados por precipitación no son necesariamente las mismas que aquellas susceptibles a deslizamientos de tierra desatados por terremotos. Se refiere al lector a Harp y otros (1981) para información en deslizamientos de tierra desatados por el terremoto de 1976 $M_w = 7.6$ en Guatemala..

RECOMENDACIONES

Deberán hacerse intentos para prevenir el desarrollo de caseríos e infraestructura en áreas potencialmente peligrosas (dado en la

sección previa). Para identificar específicamente estas áreas, deberá continuarse haciendo los inventarios de deslizamientos de tierra después de tormentas locales y esparcidas. Además, tanto como sea posible, deberá compilarse información de propiedades físicas de los suelos coluviales. Como se establece en la sección de susceptibilidad de este informe, los datos de propiedades físicas pueden ser combinados con datos DEM para producir mapas de susceptibilidad de deslizamientos de tierra. La siguiente etapa después de los mapas de susceptibilidad, serían mapas de amenazas que incluyan áreas ladera abajo que descansen en senderos usados para el flujo de los deslizamientos de tierra. La creación de mapas de amenaza requerirá de un mapeo adicional de deslizamientos de tierra y depósitos de flujo de escombros Cuaternarios e históricos.

En áreas peligrosas ya habitadas, puede desarrollarse un método para predecir y dar advertencias sobre deslizamientos de tierra. Una de las formas más fáciles y más exactas para predecir el momento oportuno de los deslizamientos de tierra desatados por precipitación es utilizar el umbral de precipitación. Cuando tal umbral ha sido excedido, o se espera que se exceda por una tormenta que se aproxima, puede darse una advertencia de deslizamiento de tierra para áreas peligrosas. Los datos para desarrollar un umbral preliminar de precipitación pueden ya existir. Deberán desarrollarse dos umbrales, uno para flujos de escombros que comúnmente se movilizan de deslizamientos de tierra someros durante intensos estallidos de precipitación, y uno para deslizamientos de tierra asentados profundamente que son usualmente desatados por precipitación prolongada. Los datos principales necesarios para desarrollar un umbral de precipitación son los tiempos de ocurrencia de los deslizamientos de tierra y los datos de precipitación de pluviómetros cercanos. Además, de casi igual importancia, son las cantidades de precipitación que no desatan deslizamientos de tierra. Debido a que la mayoría de los tipos peligrosos de deslizamientos de tierra son típicamente flujos de escombros, los datos de los pluviómetros utilizados para desarrollar un

umbral para flujos de escombros (deslizamientos de tierra someros) deberán tener al menos una resolución por cada hora. Para ejemplos de umbrales de precipitación vea los informes por Caine (1980), Cannon (1988), y Larsen y Simon (1993).

REFERENCIAS CITADAS

- Bonis, S., Bohnenberger, O.H., and Dengo, G., compilers, 1970, Mapa geológico de la Republica de Guatemala: Guatemala, Instituto Geográfico Nacional, scale 1:500,000.
- Caine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: *Geografiska Annaler*, ser. A, v. 62, p. 23-27.
- Cannon, S.H., 1988, Regional rainfall-threshold conditions for abundant debris-flow activity, *in* Ellen, S.D., and Wieczorek, G.F. eds., *Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1434, p. 35-42.
- Coe, J.A., and Godt, J.W., 2001, Debris flows triggered by the El Niño rainstorm of February 2-3, 1998, Walpert Ridge and vicinity, Alameda County, California: U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-2384.
- Coe, J.A., Michael, J.A., Crovelli, R.A., and Savage, W.Z., 2000, Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-303, 25 p. pamphlet, scale 1:25,000, <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-00-0303/>.
- Cruden, D.M., and Varnes, D.J., 1996, Landslide types and processes, *in* Turner, A.K., and Schuster, R.L. eds., *Landslides, investigation and mitigation*: Washington, D.C., National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36-75.

- Dietrich, W.E., Reiss, R., Hsu, M.-L., and Montgomery, D.R., 1995, A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data: *Hydrological Processes*, v. 9, p. 383-400.
- Dietrich, W.E., Wilson, C.J., and Reneau, S.L., 1986, Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes, *in* Abrahams, A.D. ed., *Hillslope processes*: Boston, Allen and Unwin, p. 361-388.
- Gallant, J.C., and Wilson, J.P., 2000, Primary topographic attributes, *in* Wilson, J.P., and Gallant, J.C. eds., *Terrain analysis—Principles and applications*: New York, Wiley, p. 51-76.
- Guiney, J.L., and Lawrence, M.B., 1998, Preliminary report, Hurricane Mitch, 22 October–05 November 1998: <http://www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html>.
- Harp, E.L., Wilson, R.C., and Wieczorek, G.F., 1981, Landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake: U.S. Geological Survey Professional Paper 1204-A, 35 p.
- Hellin, J., and Haigh, M.J., 1999, Rainfall in Honduras during Hurricane Mitch: *Weather*, v. 54, p. 350-359.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1998, *Las lluvias del siglo en Nicaragua*: Managua, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER, 159 p.
- Iverson, R.P., Schilling, S.P., and Vallance, J.W., 1998, Objective delineation of lahar-inundation hazard zones: *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, p. 972-984.
- Larsen, M.C., and Simon, A., 1993, A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico: *Geografiska Annaler*, v. 75 A, p. 13-23.
- Lott, N., McCown, S., Graumann, A., and Ross, T., 1999, Mitch—The deadliest Atlantic hurricane since 1780: <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/reports/mitch/mitch.html>.
- Muller, P.D., compiler, 1977, *Mapa geológico de Guatemala, Los Amates: Guatemala, Instituto Geográfico Militar, Mapa Geológico de Guatemala, Hoja 2361 I-G, scale 1:50,000.*
- Newcomb, W.E., compiler, 1978, *Geologic map of Guatemala, Río Hondo: Guatemala, Instituto Geográfico Nacional, Mapa Geológico de Guatemala, Hoja 2261 II G.*
- Nicolaus, H.J., and Muller, A., compilers, 1979, *Geologic map of Guatemala, Tactic: Guatemala, Instituto Geográfico Nacional, Mapa Geológico de Guatemala, Hoja 2161 IV G, scale 1:50,000.*
- Paulsen, S., compiler, 1976, *Geologic map of Guatemala, Cobán: Guatemala, Instituto Geográfico Nacional, Mapa Geológico de Guatemala, Hoja 2162 III G, scale 1:50,000.*
- Paulsen, S., compiler, 1980, *Geologic map of Guatemala, Tucurú: Guatemala, Instituto Geográfico Nacional, Mapa Geológico de Guatemala Hoja 2161 I G, scale 1:50,000.*
- Pierson, T.C., and Costa, J.E., 1987, A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, *in* Costa, J.E., and Wieczorek, G.F. eds., *Debris flows /avalanches: process recognition, and mitigation*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, v. 7, p. 1-12.
- Pillmore, C.L., 1989, *Geologic photogrammetry in the U.S. Geological Survey: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, p. 1,185-1,189.
- Portig, W.H., 1976, *The climate of Central America, in* Schwerdtfeger, W. ed., *Climates of Central and South America*: New York, Elsevier, *World survey of climatology*, v. 12, p. 405-478.
- Pyles, M.R., and Froehlich, H.A., 1987, Rates of landsliding as impacted by timber management activities in northwestern California—discussion: *Association of Engineering Geologists Bulletin*, v. 24, p. 425-431.

- Savage, W.Z., Coe, J.A., and Sweeney, R.E., 2001, PTCOUNT—A Fortran-77 computer program to calculate the areal distribution of mapped data points using count-circle methodology: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-0002, 10 p., <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-01-0002/>.
- Schilling, S.P., 1998, LAHARZ—GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80 p.
- Schuster, R.L., Bucknam, R.C., and Mota, M.A., 2001, Stability assessment of a Hurricane Mitch-induced landslide dam on the Río la Lima, Sierra de las Minas, eastern Guatemala: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-120, 7 p.
- Snyder, J.P., 1987, Map projections—A working manual: U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, 383 p.
- Soeters, R., and van Westen, C.J., 1996, Slope instability recognition, analysis, and zonation, *in* Turner, A.K., and Schuster, R.L. eds., *Landslides—Investigation and mitigation*: Washington, D.C., National Academy Press, National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, p. 129-177.
- Tobisch, M.K., 1986, Part I, late Cenozoic geology of the central Motagua Valley, Guatemala—Part II, uplift rates, deformation and neotectonics of Holocene marine terraces from Point Delgado to Cape Mendocino, California: Santa Cruz, University of California, Santa Cruz, Ph.D. thesis, 364 p.
- U.S. Agency for International Development, 1999, USAID/Guatemala Hurricane Mitch Special Objective: <http://hurricane.info.usaid.gov/spogua7.html>.
- Varnes, D.J., 1978, Slope movement types and processes, *in* Schuster, R.L., and Krizek, R.J. eds., *Landslides, analysis and control*: Washington, D.C., National Academy of Sciences, National Research Council, Transportation Research Board Special Report 176, p. 12-33.
- Varnes, D.J., Radbruch-Hall, D.H., and Savage, W.Z., 1989, Topographic and structural conditions in areas of gravitational spreading of ridges in the western United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1496, 32 p.
- Wieczorek, G.G., Harp, E.L., Mark, R.K., and Bhattacharyya, A.K., 1988, Debris flows and other landslides in San Mateo, Santa Cruz, Contra Costa, Alameda, Napa, Solano, Sonoma, Lake, and Yolo counties, and factors influencing debris-flow distribution, *in* Ellen, S.D., and Wieczorek, G.F. eds., *Landslides, floods, and marine effects of the Storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1434, p. 133-162.