

Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México

Hugo Fernando Murcia* y José Luis Macías

*Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04510 México D.F., México.*

** hugofmurcia@gmail.com*

RESUMEN

El 4 de octubre de 2005, la ciudad de Tapachula sufrió el peor desastre de su historia como consecuencia de lluvias prolongadas e intensas asociadas al huracán Stan. En esta ocasión, el nivel del agua del río Coatán, que drena el sector occidental de la ciudad, aumentó paulatinamente hasta su desbordamiento. Los efectos fueron devastadores, cuantificando ~2,000 casas desaparecidas, cerca de 100,000 personas damnificadas, y cuatro puentes y la vía del ferrocarril destruidos. Los días anteriores al desastre, desde el 1 hasta el 3 de octubre, la precipitación en la zona montañosa cercana al Complejo Volcánico Tacaná fue de 143 mm, mientras que sólo el día 4 fue de 60 mm más (242 mm), alcanzándose periodos de retorno de 20 años. En esta ocasión la inundación ocupó la llanura aluvial, las terrazas más bajas y, en algunos sectores, erosionó la base de otras terrazas más altas produciendo su colapso. En la zona montañosa, la precipitación se mantuvo hasta el día 6 alcanzando periodos de retorno de 100 años.

El aumento de la descarga del río Coatán erosionó las márgenes del valle exponiendo depósitos de inundaciones antiguas. El registro estratigráfico evidenció al menos 10 depósitos emplazados durante los últimos 680 años, de los cuales al menos siete han ocurrido en los últimos 105 años. Algunos de estos depósitos jóvenes contienen fragmentos de plástico, tela, vidrio y alambre. Adicionalmente, el registro geológico indica que, en el abanico aluvial donde se encuentra establecida la ciudad de Tapachula, el río Coatán ha mantenido el curso actual durante al menos 1,330 años.

A lo largo del río Coatán, en el sector occidental de Tapachula, existen aún sectores urbanizados en las terrazas más bajas dentro del valle que fueron parcialmente erosionadas en octubre de 2005. Posteriormente a la inundación, medidas importantes fueron emprendidas con la creación de un sistema de alerta temprana para monitorear un posible nuevo flujo por el río Coatán y con la canalización antrópica para controlar futuros flujos compuestos de agua y sedimento.

Palabras clave: lluvias extremas, inundación, desastres, flujos compuestos de agua y sedimento, huracán Stan, Tapachula, Chiapas, México.

ABSTRACT

On October 4th, 2005, the city of Tapachula suffered the worst disaster in historic times as consequence of intense rainfall associated with hurricane Stan. Flooding occurred as the water level of the Coatán river, which drains the western skirts of the city, gradually increased. The flood destroyed ~2,000 houses, four bridges, and the railroad track. About 100,000 inhabitants were affected, although among inhabitants there were no deceased victims. The rainfall record in the highlands around the Tacaná Volcanic Complex was 143 mm from October 1st to 3rd and almost 60 mm more only on October 4th (242 mm). The cumulative rain on that day reached a return period of 20 years. By that time, the flow

discharge of the Coatán river started to flood the alluvial plain and the lower terraces, and to erode the base of the higher terraces producing their collapse in some sectors. Continuous precipitation on the highlands until October 6th reached a return period of 100 years.

The intense erosion produced by the flood exposed old flood deposits on the margins of the Coatán river valley. The stratigraphic record on the new uncovered walls showed at least 10 deposits related to water and sediment flow events that took place during the past 680 years, and at least seven of them occurred during the last 105 years. Some of these young deposits contain fragments of plastic, cloth, glass and wire. The stratigraphic record also indicates that the Coatán river in the Tapachula region has maintained its course during at least 1,330 years.

In the western skirts of Tapachula, along the Coatán river, important urban settlements are still located on old terraces that were partially flooded in 2005. After the flooding event, an alert system to monitor possible future floods was established, and a man-made channel was constructed.

Key words: extreme rainfall, flood, disaster, water and sediment flow, hurricane Stan, Tapachula, Chiapas, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Durante los primeros días de octubre de 2005, una tormenta tropical que posteriormente se convirtió en huracán afectó Centroamérica y el sur de México. La precipitación intensa de este evento denominado huracán Stan, causó centenas de deslizamientos en las zonas montañosas de Guatemala, El Salvador y algunos estados de México. En México, los estados más afectados fueron Veracruz, Oaxaca y Chiapas. La lluvia provocó deslizamientos en las zonas montañosas e inundaciones posteriores en las zonas bajas. En Chiapas, las ciudades más afectadas fueron Tapachula y Motozintla. En Tapachula, el crecimiento del cauce del río Coatán afectó aproximadamente a 100,000 personas, convirtiéndose en el peor desastre en la historia de la ciudad. La inundación erosionó los canales y terrazas del valle del río Coatán y, de esta forma, expuso depósitos antiguos asociados a flujos compuestos de agua y sedimento.

En este trabajo se presenta el registro estratigráfico detallado de esta secuencia de depósitos con base en la integración de información obtenida de 76 estaciones ubicadas sobre el valle del río Coatán, de cinco fechamientos con el método de ^{14}C , del relato de pobladores y de documentación histórica de la región. Asimismo, se presenta un análisis de lo ocurrido el 4 de octubre de 2005 y un análisis de periodos de retorno de la precipitación a partir de una base de datos de 45 años. Finalmente, se discute el peligro futuro de esta clase de eventos para la ciudad.

LOCALIZACIÓN

La ciudad de Tapachula se ubica 30 km al suroeste del Complejo Volcánico Tacaná (CVT) con una elevación promedio de 170 m s.n.m. (Figura 1). La ciudad está burdamente limitada por los cauces de los ríos Coatán al oeste y Cahuacán al este (Figura 1). Tapachula es la segunda ciudad más importante de Chiapas, capital eco-

nómica del estado y principal centro poblado de la región conocida como Soconusco (una de las ocho provincias socioeconómicas en las que se divide el Estado de Chiapas). Tapachula es accesible por el noroeste a través de la carretera federal 200 y por el norte a través de la carretera federal 190 (Figura 1). La población total del Municipio de Tapachula es de 282,420 habitantes de los cuales 189 991 viven en la cabecera municipal (INEGI, 2005).

El río Coatán (en náhuatl "Río de las Serpientes") es la conexión principal entre la zona montañosa y la ciudad de Tapachula de Córdoba y Ordóñez como fue nombrada en 1997 (Figura 1). Este río, que tiene su origen en la República de Guatemala, recoge las aguas de diversos arroyos provenientes del CVT y de otras pequeñas cuencas durante su recorrido, para cruzar la porción oeste de la ciudad de Tapachula y descargar sus aguas en el Océano Pacífico, en el municipio de Mazatán.

La temperatura media anual en la zona montañosa cercana al CVT varía entre 10 y 20 °C con un clima semicálido húmedo y una precipitación anual entre 4500 y 5000 mm. La temperatura media anual en la ciudad de Tapachula es de 26 °C con un clima cálido-húmedo y una precipitación anual de 2500 mm, de acuerdo con el Ayuntamiento Municipal de Tapachula.

TERMINOLOGÍA

Para definir flujos subaéreos compuestos de agua y sedimento, fue considerado el término flujo de detritos como un flujo con una concentración de sedimentos mayor a 80% en peso o 60% en volumen, y el término flujo hiperconcentrado como un flujo con una concentración de sedimentos entre 40 y 80% en peso o entre 20 y 60% en volumen (Beverage y Culbertson, 1964; Pierson y Costa, 1987). Flujos con menor concentración de sedimento fueron considerados como flujos de corriente (Beverage y Culbertson, 1964; Pierson y Costa, 1987). En este trabajo

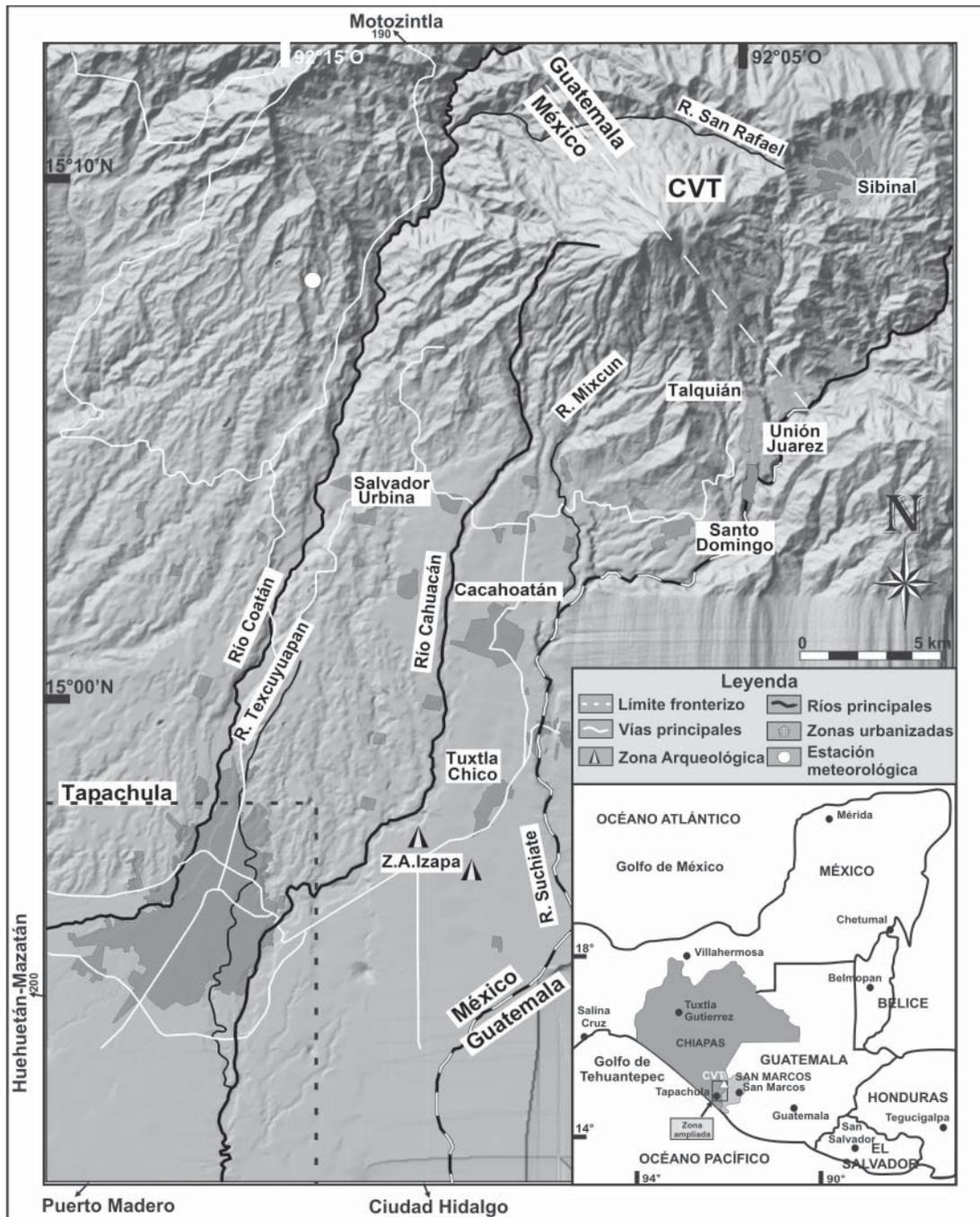


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. CVT: Complejo Volcánico Tacaná. El área punteada alrededor de Tapachula marca la localización de la Figura 3a.

se utilizan los términos facies de flujo de detritos, facies de flujo hiperconcentrado y facies de flujo de corriente, para definir los depósitos encontrados que fueron originados por flujos compuestos de agua y sedimento. Los flujos de detritos asociados a remoción de material volcánico característicamente generan depósitos masivos, con gradación que va de inversa a normal, muy mal seleccionados, y están compuestos por clastos gruesos en una matriz de grano más

fino (Pierson y Scott, 1985, 1999; Smith y Lowe, 1991; Vallance, 2000). Los flujos hiperconcentrados generan depósitos con estratificación plana débil y gruesa, y ausencia de estratificación cruzada, pobremente seleccionados, lentes de grava en una matriz arenosa y, en ocasiones, superficies estratificadas de materia orgánica (Pierson y Scott, 1985, 1999; Smith y Lowe, 1991; Vallance, 2000). Los depósitos de flujos de corriente tienen estratificación plana y cruzada,

ondulitas, estructuras de arrastre, van de moderados a bien seleccionados, presentan lentes de grava, y estratos delgados de arena, además de imbricación de clastos (Pierson y Scott, 1985; Smith y Lowe, 1991; Miall, 1996). Es importante tener en cuenta que las facies proporcionan una clasificación local de los depósitos tal como se presentan en el afloramiento sin tener implicaciones genéticas; igualmente, que los depósitos fueron agrupados en unidades que hacen referencias a unidades de acumulación. Para este trabajo el término matriz se utiliza para denominar fragmentos menores a 2 mm de diámetro tales como arcilla <0.004 mm, limo entre 0.004 y 0.0625 mm, y arena entre 0.0625 y 2 mm, y el término grava para fragmentos mayores o iguales a 2 mm de diámetro.

El término ciclón tropical se utiliza para definir un sistema de baja presión que se forma generalmente en los trópicos y que está acompañado de fuertes vientos, lluvias y descargas eléctricas. El término depresión tropical se utiliza para ciclones con velocidad de vientos menor a 39 mph (~63 km/h), el término tormenta tropical para ciclones con velocidad de vientos entre 40 y 73 mph (~64 y 118 km/h) y el término huracán para ciclones con velocidad de vientos mayor o igual a 74 mph (~119 km/h). La velocidad de los vientos para huracanes de grado 1 no supera las 95 mph (~153 km/h) mientras que velocidades mayores pueden generar huracanes hasta de grado 5 (NHC, 2007a, 2007b).

GEOLOGÍA DEL AREA

De acuerdo con la descripción de García-Palomo *et al.* (2006), el basamento de la zona corresponde a rocas metamórficas Mesozoicas de bajo grado (esquistos verdes claros y oscuros, y gneises con bandas verdes y blancas). Éstas fueron afectadas por dos fases de intrusión, la primera entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano (granitos y granodioritas; Mugica, 1987), y la segunda entre el Mioceno Temprano y el Mioceno Medio (granodioritas y tonalitas gnéisicas; Mugica, 1987). Estas rocas están cubiertas discordantemente por rocas volcánicas pertenecientes a la secuencia de calderas San Rafael-Chanjale, con edades de 2 Ma para la caldera San Rafael, 1 Ma para la caldera Chanjale y una edad desconocida para la caldera Sibinal. Las rocas más jóvenes de la región pertenecen al CVT, el cual se emplazó durante el Pleistoceno tardío-Holoceno dentro de la caldera San Rafael. El CVT está formado por cuatro centros eruptivos denominados Chichuj, Tacaná, Las Ardillas y San Antonio que han evolucionado en dirección NE-SO en los últimos 100,000 años o menos (Macías, 2005).

La ciudad de Tapachula está asentada sobre un abanico aluvial formado por depósitos de flujos compuestos de agua y sedimento asociados a erupciones del CVT o derivados de lluvias torrenciales. Este abanico, denominado en este trabajo como "Abanico de Tapachula" (A3 en Figura 2), tiene una longitud de 13 km con una diferencia en altura de 200 m y un ancho en su porción más amplia de 8 km.

El abanico de Tapachula se encuentra burdamente limitado al oeste por el río Coatán y al este por el río Cahuacán. Los depósitos que lo forman tienen edades que varían de >23,000 a ~1,330 años Antes del Presente (AP). Los depósitos más recientes son producto de la dinámica actual del río Coatán (terrazza más reciente) (Murcia, 2008). El abanico de Tapachula yace cerca del ápice de otro abanico más antiguo, denominado A2, que tiene una longitud de 50 km con una diferencia en altura de 500 m y un ancho máximo de 40 km. Los depósitos de A2, están asociados a los primeros periodos de evolución del CVT, con excepción del depósito de flujo piroclástico Mixcun, que tiene una edad de 1,950 AP y que se encuentra ubicado en el ápice del abanico sobre el costado oriental (Macías *et al.*, 2000). El abanico A2 está limitado al oeste por el río Coatán, al este por el río Suchiate y se extiende hasta el Océano Pacífico (A2 en Figura 2). Un abanico más antiguo, denominado A1, con 30 km de longitud, una diferencia en altura de 1,000 m y 20 km de ancho, se encuentra infrayaciendo los dos abanicos anteriores. (Figura 2). Este último fue derivado de la remoción de los depósitos de la caldera Chanjale construida hace 1 Ma aproximadamente.

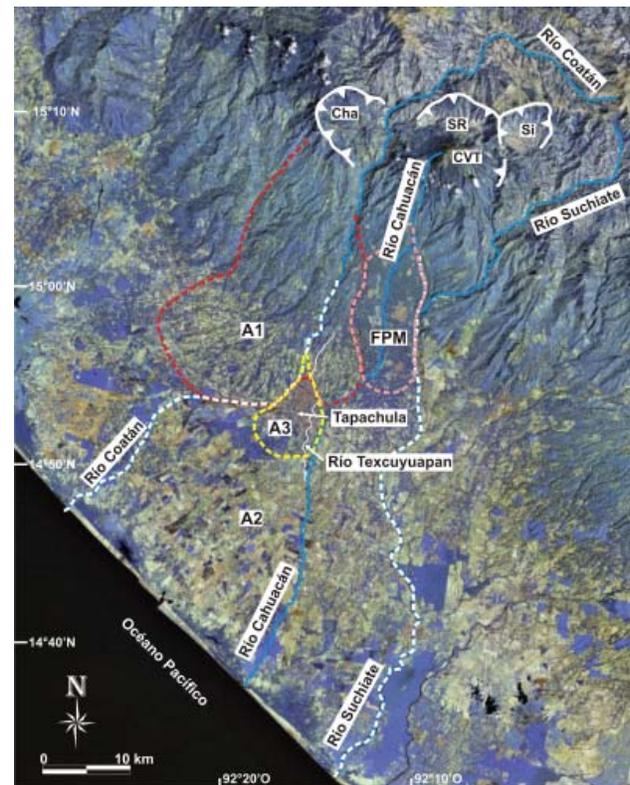


Figura 2. Imagen satelital que ilustra la distribución de los abanicos aluviales asociados a la formación de la caldera Chanjale y del Complejo Volcánico Tacaná, además del flujo piroclástico Mixcun. Cha: Caldera Chanjale; SR: Caldera San Rafael; Si: Caldera Sibinal; CVT: Complejo Volcánico Tacaná A1: Abanico aluvial 1; A2: Abanico aluvial 2; A3: Abanico aluvial 3 o abanico de Tapachula; FPM: Flujo Piroclástico Mixcun. Imagen base tomada del programa World Wind de la NASA disponible en <<http://worldwind.arc.nasa.gov/>>.

HIDROGRAFÍA

El abanico de Tapachula se encuentra poco disectado por una red de drenaje que se restringe a tres ríos únicamente: el río Coatán al oeste, el río Cahuacán al este y un pequeño cauce llamado Texcuyuan en el centro, que es tributario del río Cahuacán (Figura 1). El río Coatán tiene su origen 13 km al noroeste del CVT. Este río, drena la porción noroeste y oeste del complejo volcánico con una dirección NNE-SSO. Su cauce se desarrolla sobre rocas metamórficas del Mesozoico, granodioritas y tonalitas del Terciario, depósitos de las calderas San Rafael-Chanjale y depósitos volcánoclasticos originados en el CVT hasta desembocar en el Océano Pacífico. La zona de depósito principal del río es el abanico de Tapachula y la porción oeste del abanico A2. El río Cahuacán tiene su origen directamente en las laderas del CVT, drenando en dirección NNE-SSO. Su cauce se desarrolla sobre depósitos piroclásticos y de lahar asociados al CVT hasta desembocar en el Océano Pacífico. La zona de depósito principal del río Cahuacán se encuentra en el sector este tanto del abanico de Tapachula como del abanico A2. El río Texcuyuan se origina en el abanico A1 y se incorpora en dirección casi N-S al abanico de Tapachula muy cerca de su ápice. Su cauce, que actualmente se encuentra canalizado, se desarrolla sobre estos abanicos hasta unirse con el río Cahuacán (Figuras 1 y 2).

Un poco más al este del abanico de Tapachula se encuentra el río Suchiate, el cual constituye el límite internacional entre México y Guatemala. Este río recorre el sector suroriental del CVT para finalmente desembocar en el Océano Pacífico (Figuras 1 y 2).

REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DE EVENTOS PASADOS

Para este trabajo se realizó la descripción detallada de 76 secciones estratigráficas (estaciones) a lo largo del cauce del río Coatán en el abanico de Tapachula (Figura 3). En esta región, el valle del río Coatán consiste de una serie de terrazas ubicadas a diferentes alturas (Figuras 3, 4 y 5). Las terrazas que conforman el abanico fueron formadas desde hace más de 24,000 AP por al menos 16 lahares provenientes de la cuenca del río Coatán, muy probablemente del CVT (Murcia, 2008). La terraza más reciente fue formada por la dinámica actual del río Coatán que comenzó probablemente durante los últimos 1,320 a 1,330 años (Figura 4), y está conformada por un mínimo de 11 unidades (Figuras 6, 7 y 8) incluyendo la caída de ceniza de la erupción pliniana del volcán Santa María, ocurrida el 24 de octubre de 1902 (Williams y Self, 1983; Mercado y Rose, 1992). Este depósito de caída de ceniza se encuentra ampliamente expuesto en la ciudad de Tapachula y ha sido utilizado en la región como marcador estratigráfico (Macías *et al.*, 2000; Caballero *et al.*, 2006). Exceptuando ésta última, todas las unidades son discontinuas, con cambios en el espesor y algunas con

cambios de facies en pocos metros. La edad de las unidades fue determinada mediante fechamientos con el método de ^{14}C teniendo en cuenta que las edades obtenidas por carbón indican una edad máxima para la unidad (Tabla 1). A continuación se describen las unidades de la más antigua a la más reciente.

Unidad 1

Depósito masivo, heterolitológico, deleznable, muy mal seleccionado, soportado por clastos, aunque localmente suele ser soportado por una matriz de arena de color gris. Los fragmentos, con tamaño de grava, son redondeados, de rocas volcánicas, plutónicas (principalmente granito) y metamórficas (esquistos verdes y gneis) de hasta 1.5 m de diámetro. En algunos afloramientos aparece en la parte superior una concentración de partículas con tamaño de arena. Su espesor máximo es de 2.5 m en la estación L-36. Esta unidad cubre a un paleosuelo de color café claro (TL-10-P) de 12 cm de espesor que fue fechado en $1,320 \pm 75$ AP.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito de acumulación fluvial de lecho de río y/o llanura de inundación asociado a la remoción de material volcánico y del basamento metamórfico y granítico de la zona. Este depósito representa el antiguo lecho del río Coatán. Su origen está relacionado con la dinámica fluvial del abanico de Tapachula que disecta la margen oeste del mismo desde hace al menos $1,320 \pm 75$ AP.

Unidad 2

Depósito masivo, con gradación inversa, heterolitológico, deleznable, bien seleccionado, de color gris en su base y café en la cima. Está constituido por fragmentos con tamaño de limo y arena, formados por cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita, así como por líticos volcánicos de color negro y rojo, y por granitos y esquistos de color verde. El espesor máximo observado es de 40 cm en la estación TL-03. Este depósito pasa transicionalmente a un paleosuelo (TL-03-P) de color café claro de 10 cm de espesor en la parte superior, el cual fue fechado en 680 ± 45 AP.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente asociado a la remoción de material volcánico. Este depósito se encuentra sobre el antiguo lecho del río Coatán.

Unidad 3

Depósito masivo, deleznable, heterolitológico, bien seleccionado, de color gris, constituido por fragmentos subangulares y subredondeados con tamaño de arena, formados por cristales de cuarzo y anfíbol, así como por líticos

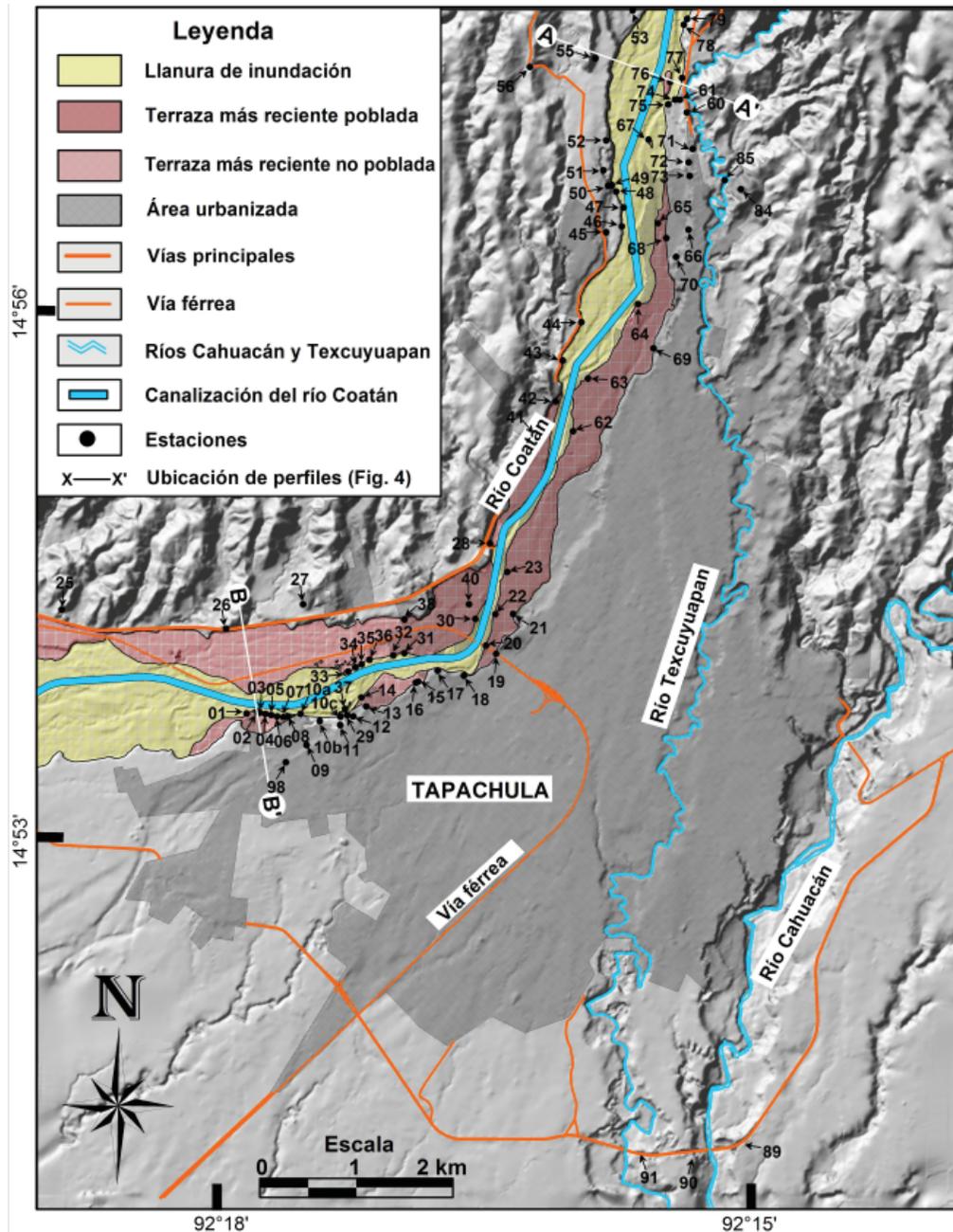


Figura 3. Mapa de distribución de la llanura de inundación y la terraza más reciente del río Coatán en el abanico de Tapachula. La canalización del río se llevó a cabo a raíz del desastre ocurrido el 4 de octubre de 2005.

volcánicos de color negro y gris. Este depósito contiene fragmentos de carbón y desarrolla paleosuelo en la parte superior. El espesor máximo observado es de 60 cm en la estación TL-34. El carbón contenido arrojó una edad de 300 ± 105 /-100 AP.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente asociado a la remoción de material volcánico. Este depósito puede estar relacionado con una erupción descrita para el CVT con una edad de 280 ± 45 AP. (Ordaz, 2006).

Unidad 4

Depósito masivo, deleznable, heterolitológico, bien seleccionado, de color gris, constituido por fragmentos subangulares y subredondeados, con tamaño de arena, formados por cristales de cuarzo y anfíbol, así como por líticos volcánicos de color negro y gris. Este depósito presenta lentes de paleosuelo y coloraciones diferentes, además contiene fragmentos de carbón y desarrolla paleosuelo en la parte superior. El espesor máximo

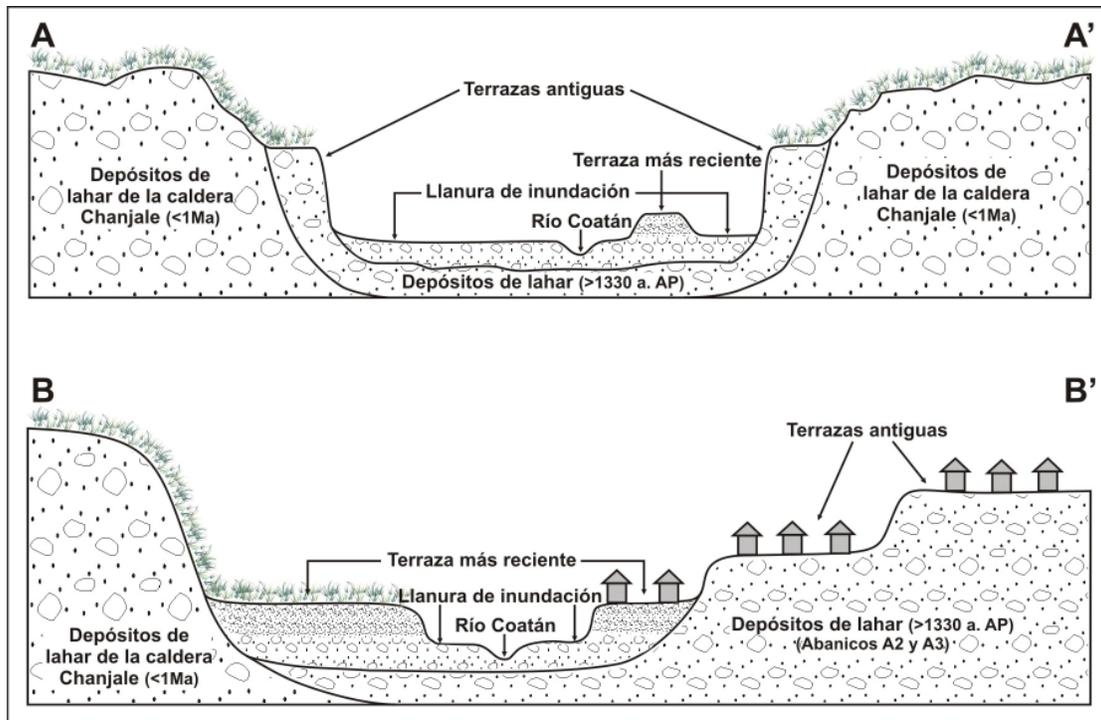


Figura 4. Perfiles geológicos esquemáticos (no a escala) que ilustran la distribución de las terrazas en Tapachula, la llanura de inundación y la canalización actual del río Coatán (para ubicación ver Figura 9). Los depósitos de lahar antiguos fueron producidos por actividad del Complejo Volcánico Tacaná. El basamento de la zona es un antiguo abanico aluvial que fue producido por la remoción de depósitos asociados a la secuencia San Rafael-Chanjale formada hace 1 y 2 Ma (ver García-Palomo *et al.*, 2006).

observado es de 1.5 m en la estación TL-10. El carbón contenido dió una edad de 115 ± 45 AP y el paleosuelo suprayacente de color café oscuro de 20 cm de espesor una edad más reciente que 1945 DC.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente asociado a la remoción de material volcánico.

Unidad 5

Conformada por dos depósitos separados por un contacto transicional. De abajo a arriba se encuentra: 1) Depósito masivo, deleznable, muy bien seleccionado, de color blanco, constituido por fragmentos angulares y subangulares, con tamaño de limo, de cuarzo y plagioclasa,

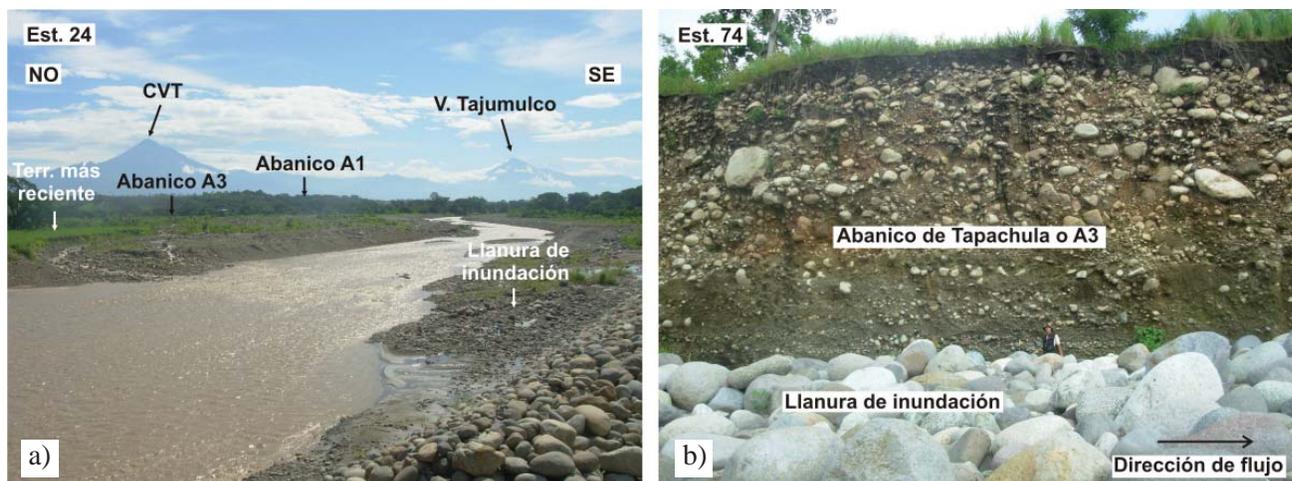
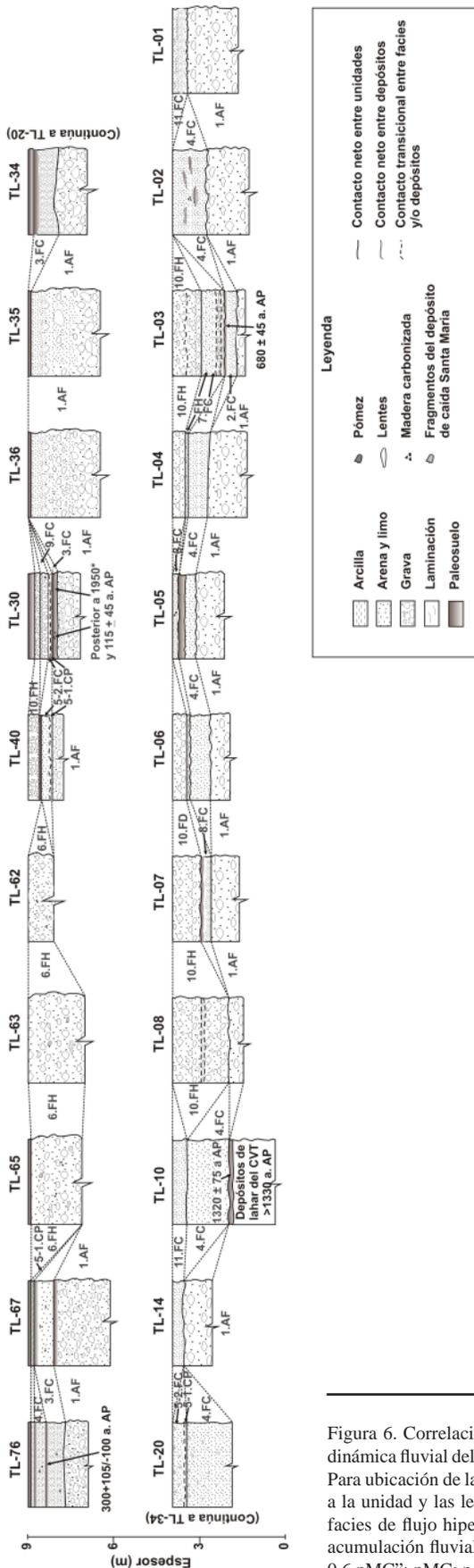


Figura 5. Fotografías que ilustran la llanura de inundación del río Coatán. a: Vista panorámica de la llanura de inundación desde la parte distal del abanico de Tapachula. Obsérvese al NO el CVT y al SE el volcán Tajumulco en Guatemala. b: Detalle de los fragmentos mayores de la llanura de inundación. Obsérvese la imbricación de los mismos en la dirección de flujo.



así como por líticos volcánicos de color gris. El espesor máximo observado es de 12 cm en la estación TL-20. 2) Depósito masivo, deleznable, bien seleccionado, de color gris, constituido por fragmentos subangulares y subredondeados, con tamaños de arena gruesa y media, de cristales de cuarzo y biotita, así como de líticos volcánicos de color negro y rojo, y metamórficos de color verde. Este depósito presenta algunos fragmentos líticos menores a 1 cm y abundantes fragmentos de un depósito de caída. El espesor máximo observado es de 40 cm en la estación TL-20.

Interpretación: La subunidad inferior corresponde a un depósito de caída piroclástica y la subunidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente. Estos depósitos están asociados a un evento volcánico, siendo el inferior el depósito directo de la tefra producida durante la erupción del volcán Santa María en 1902 y el superior la remoción fluvial de este mismo depósito de caída.

Unidad 6

Depósito masivo, deleznable, mal seleccionado, heterolitológico, soportado por una matriz con tamaños de limo y arcilla, de color café, envolviendo fragmentos volcánicos con diferentes grados de alteración y fragmentos de granito y esquistos de color verde de hasta 15 cm, subredondeados y redondeados. Este depósito presenta plástico degradado, carbón y fragmentos de un depósito de caída. El espesor máximo observado es de 2 m en la estación TL-63.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo hiperconcentrado asociado a la remoción de material volcánico. En esta unidad los fragmentos del depósito de caída son del depósito infrayacente producido por la erupción del volcán Santa María en 1902, lo cual es una evidencia de que éste fue uno de los primeros flujos que ocurrieron después de tal erupción. Una evidencia más de la antigüedad del depósito está dada por el plástico degradado que tiene un tiempo de degradación de aproximadamente 100 años, y que fue creado como tal en 1933.

Unidad 7

Depósito pobremente estratificado y en ocasiones masivo, deleznable, mal seleccionado, heterolitológico, soportado por una matriz, con tamaños de limo y arcilla, de color gris y en ocasiones amarillenta. La matriz envuelve

Figura 6. Correlación de columnas estratigráficas descritas en la terraza más reciente asociada a la última dinámica fluvial del río Coatán. En la parte superior de cada columna se encuentra la estación correspondiente. Para ubicación de las mismas ver la Figura 3. Entre los depósitos ilustrados, el número inicial hace referencia a la unidad y las letras siguientes a la facies que presenta el depósito. FD: Facies de flujo de detritos; FH: facies de flujo hiperconcentrado; FC: facies de flujo de corriente; CP: depósito de caída piroclástica; AF: acumulación fluvial de lecho de río y/o llanura de inundación. * El dato reportado fue "Post bomb, 111.4 ± 0.6 pMC"; pMC: porcentaje de carbón moderno, por sus siglas en inglés.

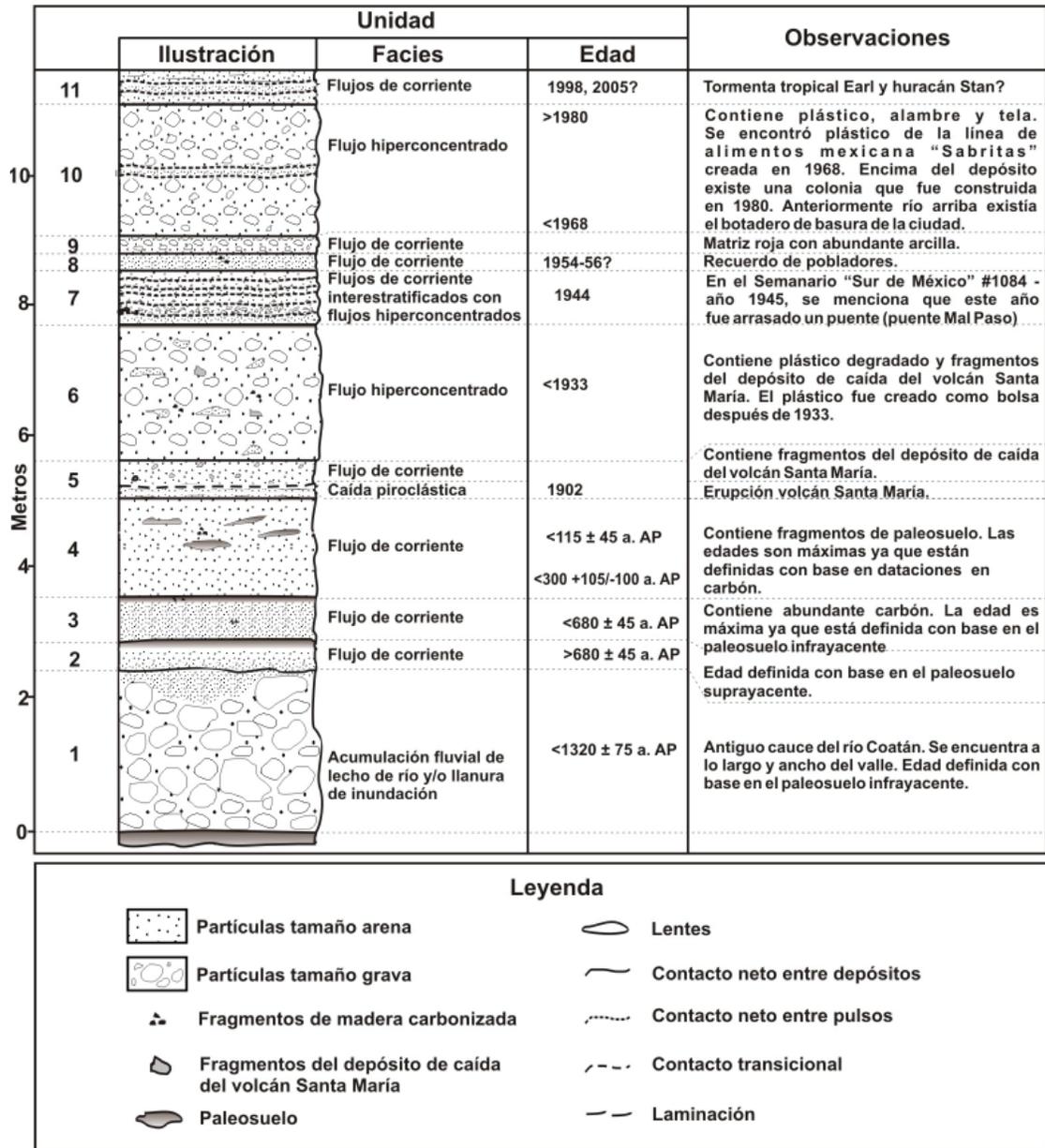


Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de los depósitos que conforman la terraza más reciente asociada al río Coatán.

fragmentos volcánicos subredondeados y redondeados de hasta 12 cm de diámetro. Este depósito presenta internamente contactos planos que separan capas no mayores a 20 cm con leve variación granulométrica y de coloración en la matriz. El espesor máximo observado es de 80 cm en la estación TL-03.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo hiperconcentrado y de corriente asociado a un evento ocurrido en 1944 cuando fuertes lluvias produjeron deslizamientos río arriba del río Coatán. Estos flujos alcanzaron la ciudad de Tapachula derrumbando el puente conocido como puente Mal Paso, según el periódico Sur de México, #1084, año 1945. La existencia de contactos planos

en el depósito son interpretados como evidencia de pulsos durante el evento o agradación durante el depósito.

Unidad 8

Depósito masivo, deleznable, bien seleccionado, de color café amarillento, constituido por fragmentos subangulares y subredondeados, con tamaños de arena gruesa y media, formados por cristales de cuarzo y biotita, así como por líticos volcánicos de color negro y rojo, y metamórficos de color verde. Este depósito presenta fragmentos de carbón. El espesor máximo observado es de 25 cm en la



Figura 8. Imágenes que muestran algunos de los depósitos que conforman la terraza más reciente asociada al río Coatán.

estación TL-07.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente asociado a la remoción de material volcánico. Este depósito es asociado a un evento que recuerdan los pobladores de la región entre los años 1954 y 1956; sin embargo no se encontraron registros históricos.

Unidad 9

Depósito masivo, deleznable, moderadamente seleccionado, soportado por una matriz con tamaños de limo y arcilla, de color rojo, envolviendo fragmentos volcánicos subangulares y subredondeados muy alterados de hasta 4 cm de diámetro. El depósito es plástico al tacto. El espesor máximo observado es de 30 cm en la estación TL-30.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo de corriente asociado a la remoción de material muy alterado perteneciente al abanico antiguo asociado a la caldera Chanjale.

Unidad 10

Depósito masivo a pobremente estratificado, endurecido, mal seleccionado, heterolitológico, soportado por una matriz limo-arcillosa de color café, envolviendo fragmentos volcánicos redondeados y subredondeados de hasta 30 cm de diámetro con diferentes grados de alteración y fragmentos de un depósito de arena de cuarzo y líticos volcánicos. Este depósito contiene tela, plástico de bolsas de papas marca "Sabritas", vidrio y troncos de árboles, con contactos internos irregulares. El espesor máximo observado es de 2 m en la estación TL-08.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito con facies de flujo hiperconcentrado asociado a la remoción de un depósito de basura antiguo río arriba del Coatán. Internamente se encontró plástico correspondiente a la marca de papas mencionada, que fue creada en 1968, evidenciando que este depósito se generó después de esta fecha. El depósito infrayace directamente a la colonia Democracia que comenzó a construirse en 1980, lo que limita la edad de la inundación entre 1968 y 1980. La existencia de contactos

Tabla 1. Edades radiométricas obtenidas de los depósitos más recientes del abanico de Tapachula.

Ubicación	Edad (AP)	$\delta^{13}\text{C}$	Lab. No.	Muestra	Latitud	Longitud
Paleosuelo sobre unidad 3	Posterior a 1950 DC*	-23.6	A-14419	TL-30-P2	14°54'18.8"	96°16'30.7"
Carbón dentro de unidad 4	115 ± 45	-25.9	A-14411	TL-03-C2	14°54'19.0"	96°17'45.6"
Carbón dentro de unidad 3	300 +105/-100	-28.7	A-14414	TL-76-C1	14°57'20.1"	96°15'22.4"
Paleosuelo sobre unidad 2	680 ± 45	-23.9	A-14416	TL-03-P	14°54'19.0"	96°17'45.6"
Paleosuelo bajo unidad 1	1,320 ± 75	-24.9	A-14417	TL-10-P	14°53'44.5"	96°17'25.0"

*El dato reportado fue "Post bomb, 111.4 ± 0.6 pMC", donde pMC es el porcentaje de carbón moderno, por sus siglas en inglés. En el número de laboratorio, la letra A indica edades obtenidas por el método convencional. En el código de muestra los dos primeros números indican el número de estación; la letra P indica edad determinada en paleosuelo y la C edad determinada en carbón. Para ubicación ver estaciones en la Figura 3. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Radiocarbono, Universidad de Arizona, Tucson, por C.J. Eastoe.

internos en el depósito es interpretada como la ocurrencia de pulsos durante el evento.

Unidad 11

Depósito con laminación plana y cruzada, deleznable, heterolitológico, muy bien seleccionado, de color gris, constituido por fragmentos subangulares y subredondeados con tamaños de arena y limo formados por cristales de cuarzo y biotita, así como de líticos volcánicos de color negro y gris, y metamórficos de color verde. El espesor máximo observado es de 50 cm en la estación TL-01.

Interpretación: La unidad corresponde a un depósito de flujo de corriente asociado al evento de septiembre de 1998 y/o al evento de octubre de 2005. El depósito se encuentra con incipiente desarrollo de suelo o en ocasiones expuesto en la superficie.

HURACÁN STAN Y LA CIUDAD DE TAPACHULA

Evolución del huracán Stan

Según el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC, por sus siglas en inglés), el huracán Stan inició como corriente tropical en la costa africana el 17 de septiembre de 2005 manteniéndose por varios días sobre el Atlántico tropical oriental y central. Posteriormente avanzó hacia el occidente y, el día 25 de septiembre, alcanzó la parte oriental del mar Caribe. Para el 27 de septiembre la convección se fortaleció y la corriente alcanzó el sector occidental del mismo. Fue hasta al primero de octubre cuando la corriente se convirtió en depresión tropical cerca de la costa de la península de Yucatán alcanzando vientos superiores a las 28 mph (~46 km/h). De esta forma, el sistema de baja presión Stan tocó tierra el 2 de octubre convertido en tormenta tropical a través de la península de Yucatán y parte de la bahía de Campeche hasta convertirse en huracán grado 1, el día 4 de octubre. Este mismo día y por efectos de la zona montañosa, disminuyó a tormenta tropical y el día 5 de octubre de 2005 se desvaneció (Tabla 2; Figura 9).

Efectos sobre la ciudad de Tapachula

En septiembre de 1998 la precipitación asociada a la tormenta tropical Earl desencadenó una serie de deslizamientos en la zona montañosa de Chiapas que descendieron por los valles de los ríos en forma de flujos cargados de sedimentos. En esta ocasión, los daños en la ciudad de Tapachula se restringieron a la inundación de varios terrenos y colonias, y a la avería de algunos puentes, aunque en Motozintla (50 km al noroeste) los daños fueron mucho mayores (Caballero *et al.*, 2006). Aunque las inundaciones no afectaron a la ciudad de Tapachula, la destrucción de varios segmentos de la carretera Panamericana dejó incomunicada a dicha ciudad del resto del país, por lo que la ayuda para subsanar los daños en varios poblados de Chiapas fue enviada por vía aérea. Para este tiempo, parte de Tapachula

Tabla 2. Velocidades máximas del viento y relación con el tipo de ciclón durante el desarrollo de la tormenta tropical Stan entre el 1 y 5 de octubre.

Día octubre 2005	Vel. máx del viento (mph – km/h)	Categoría
1	28.7 – 46.3	DT
	34.5 – 55.5	DT
2	34.5 – 55.5	DT
	46.0 – 74.0	TT
	40.2 – 64.8	TT
3	40.2 – 64.8	TT
	40.2 – 64.8	TT
	46.0 – 74.0	TT
	57.5 – 92.6	TT
4	34.5 – 55.5	DT
	40.2 – 64.8	TT
	46.0 – 74.0	TT
	57.5 – 92.6	TT
5	63.3 – 101.8	TT
	74.8 – 120.3	H1
	80.5 – 129.3	H1
	51.7 – 83.3	TT
5	34.5 – 55.5	DT

DT: Depresión tropical; TT: tormenta tropical; H1: huracán de categoría 1. Con datos del *National Hurricane Center*, NHC (2007c).

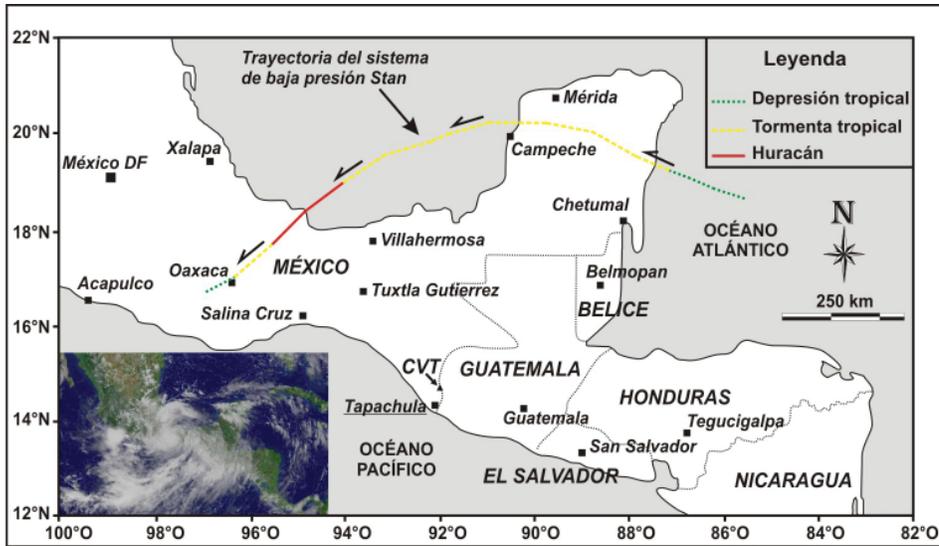


Figura 9. Trayectoria y variación del Huracán Stan desde el inicio como ciclón en el Mar Caribe hasta el Estado de Oaxaca, México (con datos del *National Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, EEUU*). CVT: Complejo Volcánico Tacaná.

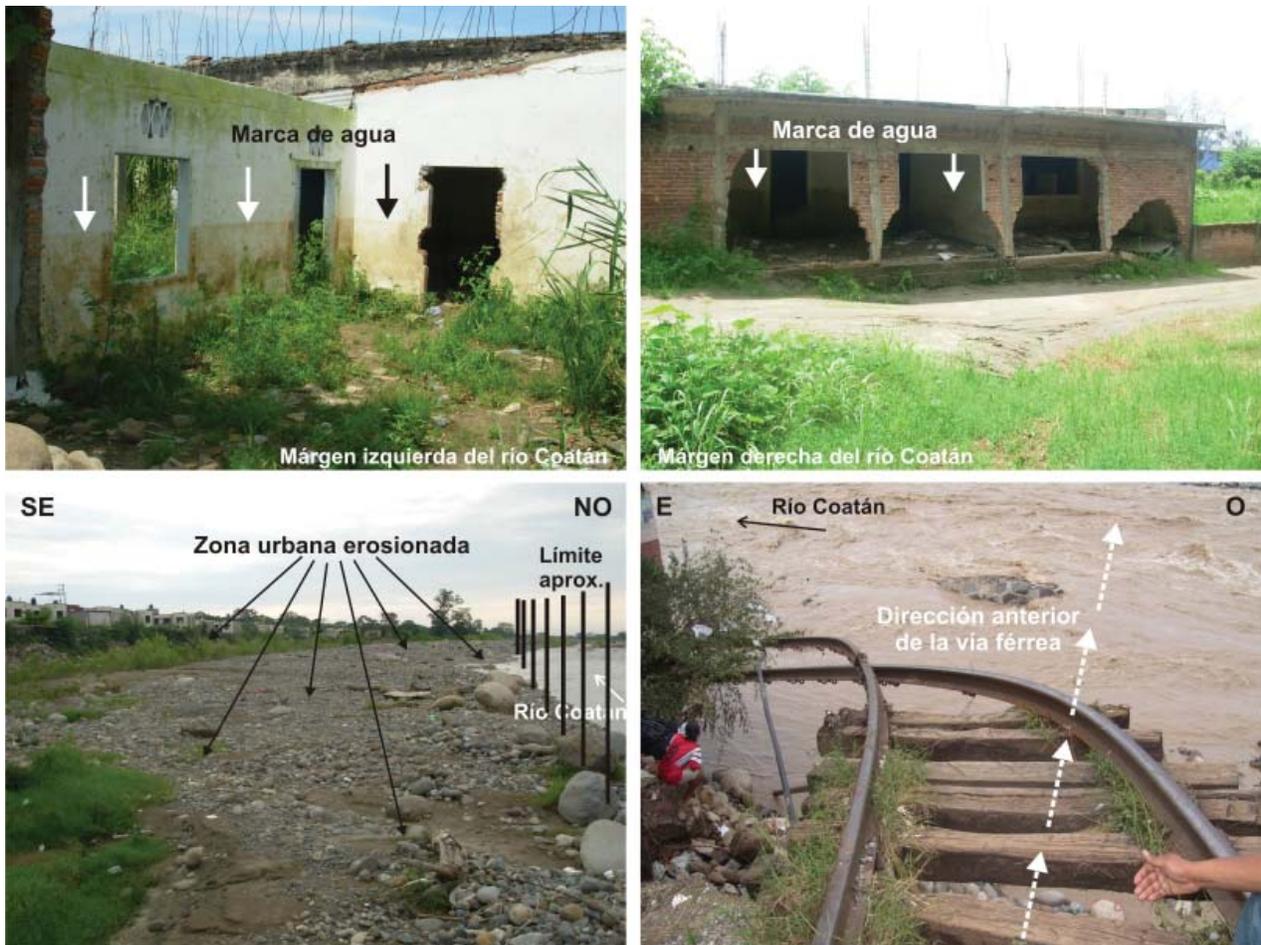


Figura 10. Imágenes que ilustran algunos de los efectos del evento ocurrido el 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula. Las imágenes superiores muestran hasta donde ascendió el nivel del agua afectando zonas urbanizadas en ambas márgenes del río Coatán. Las imágenes inferiores muestran las zonas más afectadas donde no quedó registro de las casas o los puentes existentes.

estaba ya asentado sobre la terraza más baja del río e incluso en parte de la llanura de inundación, como consecuencia de un crecimiento urbano sin planeación. Fue así como, con la llegada del huracán Stan, sucedió el mayor desastre del que se tenga registro en la ciudad. Decenas de deslizamientos en la zona montañosa descendieron por el valle del río Coatán erosionando a su paso lo que encontraban. En Tapachula, cuatro puentes y la vía del ferrocarril fueron destruidos, 10 colonias desaparecieron, y 12 más quedaron completamente inundadas. Al final del evento quedó un saldo de más de 2,000 casas desaparecidas y cerca de 100,000 personas damnificadas (Figura 10).

Para este estudio, los daños causados por la inundación fueron analizados con base en una serie de ortofotos tomadas pocos días después del desastre (Comisión Nacional del Agua, sede Tapachula) y en un mapa de la ciudad elaborado en el año 2003 (Secretaría de Obras Públicas del Estado de Chiapas). De esta forma, se reconstruyó en planta parte de la zona urbanizada de 2005, incluyendo colonias y puentes que fueron destruidos durante la inundación, por lo que se realizó una comparación de antes y después de la ocurrencia del desastre (Figura 11).

Análisis de frecuencia de lluvias

Se llevó a cabo un análisis de la frecuencia de las lluvias durante el huracán Stan, basado en datos pluviométricos obtenidos en la estación meteorológica Finca Chicharras (Código 7057 - DATASET 7, 15°07'59"N, 92°14'32"O; 1,250 msnm) ubicada 13 km al oeste del CVT y 20 km al norte de la ciudad de Tapachula (ver Figura 2). Este análisis se realizó con máximos anuales de lluvia de los últimos 45 años (1961–2005) con el método estadístico de Gumbel para valores extremos, que permitió definir periodos de retorno de 10, 20, 50, 100 y 150 años.

Los datos muestran que la precipitación en la región comenzó el día 20 de septiembre y continuó hasta el día 1 de octubre con un promedio de 40 mm diarios. El día 2 de octubre la precipitación había cesado. Sin embargo, la precipitación se reanudó el día 3 (143 mm) e incrementó para el día 4 alcanzando 242 mm (Tabla 3; Figura 12). Los resultados muestran que la precipitación acumulada desde el 20 de septiembre alcanzó periodos de retorno de 100 años, aunque los deslizamientos que ocasionaron el desastre el día 4 de octubre ocurrieron cuando la precipitación había alcanzado periodos de retorno de 20 años (Figura 12).

DISCUSIÓN

Registro geológico

El estudio estratigráfico apoyado con fechamientos de radiocarbono indica que desde $1,320 \pm 75$ años AP han ocurrido al menos 10 inundaciones que han dejado un registro

estratigráfico a lo largo del valle del río Coatán en la parte occidental del abanico de Tapachula. Este registro, indica que el cauce del río Coatán se ha mantenido más o menos constante durante los últimos 680 años y que durante los últimos 105 años, después de la caída de ceniza de la erupción del volcán Santa María, Guatemala, han ocurrido al menos siete inundaciones que han dejado depósitos cuantificables. Desafortunadamente, en nuestro estudio no se registró con claridad el depósito producido por la inundación de 2005 debido a los trabajos de acondicionamiento del valle del río, pero también, debido a que el flujo en esta zona tuvo más bien un efecto erosivo que deposicional. Esta última consideración puede extrapolarse al pasado sugiriendo la posibilidad de que otros flujos no hayan sido depositado en las cercanías de Tapachula sino aguas abajo del abanico.

Ciclones tropicales y huracán Stan

El desarrollo de un ciclón tropical, los vientos y las fuertes lluvias asociadas pueden tener un impacto importante en zonas muy alejadas de la trayectoria principal o eje del ciclón. Por ejemplo, en septiembre de 1998, la trayectoria de la tormenta tropical Earl ubicada a más de 750 km de distancia de Motozintla, Chiapas, ocasionó una serie de deslizamientos en la zona montañosa. Estos derrumbes se encausaron por los valles de los ríos Allende, La Mina y Xelajú, inundando y ocasionando daños muy severos en parte de la población (Caballero *et al.*, 2006). En esta ocasión Motozintla quedó incomunicada por casi un mes, además de los serios problemas de suministro de agua potable, comida, medicinas, electricidad y combustible. Por su parte, la trayectoria principal del huracán Stan (Figura 9) estuvo ubicada al menos a ~500 km de la ciudad de Tapachula y aún muy alejada de la zona montañosa de Chiapas donde ocurrieron los deslizamientos. Sin embargo, los efectos ocasionados por las fuertes lluvias impactaron a la ciudad. Stan tuvo influencia hasta El Salvador, ubicado a ~750 km de su eje principal, con la generación de lahares a partir de los depósitos piroclásticos originados por la erupción del 1 de octubre de 2005 del volcán Santa Ana (D. Escobar y E. Gutiérrez, comunicación personal, Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador). Estos tres eventos, entre muchos otros, son un ejemplo de la lejana influencia de las lluvias asociadas a un ciclón tropical.

En el caso particular del huracán Stan, el día 4 de octubre de 2005 a las 8:00 a.m., diversos flujos compuestos de agua y sedimento aumentaron considerablemente la descarga del río Coatán. Este día, Stan aumentó la velocidad de sus vientos alcanzando el grado 1, mientras atravesaba la bahía de Campeche, después de casi tres días de recorrido sobre la península de Yucatán (Tabla 2; Figura 9). Según los datos pluviométricos de la estación Finca Chicharras (ubicada 20 km al norte de Tapachula), estuvo lloviendo desde el 20 de septiembre hasta el 6 de octubre, exceptuando

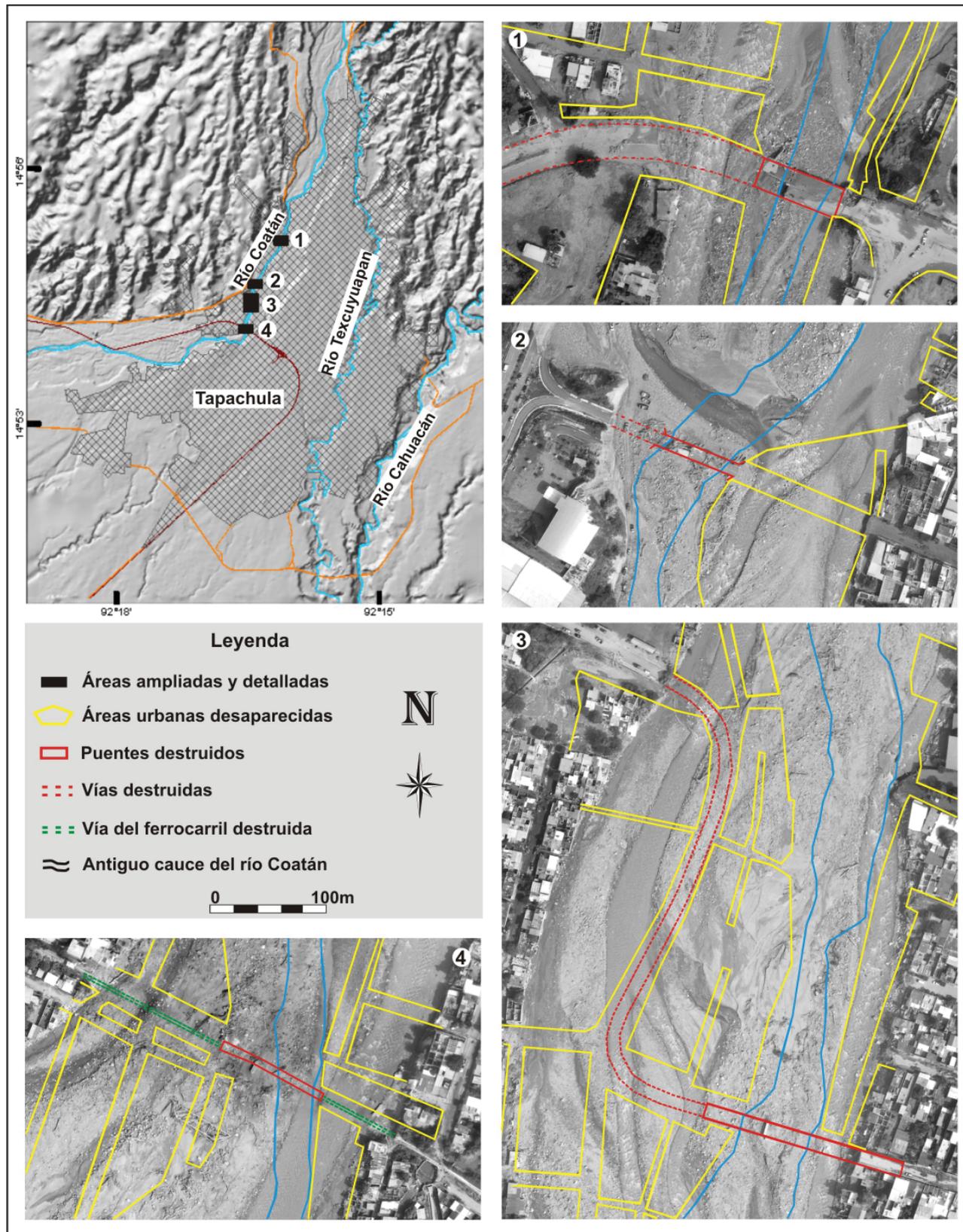


Figura 11. Imágenes que ilustran la infraestructura existente antes del desastre en algunos sectores de la ciudad de Tapachula. Tal ilustración se elaboró a partir de la comparación del mapa de la ciudad a escala 1:16,000 realizado por la Secretaría de Obras Públicas del Estado de Chiapas en el año 2003 y de ortofotos tomadas posteriormente al desastre, a finales de octubre de 2005, por la Comisión Nacional del Agua, México.

Tabla 3. Valores de precipitación acumulada en mm/día(s) en la estación meteorológica Finca Chicharras (Código 7057 - DATASET 7, 15°07'59"N, 92°14'32"O, 1250 msnm) entre el 20 de septiembre y el 8 de octubre de 2005. Los días 26 de septiembre y 2, 7 y 8 de octubre no hubo precipitación.

Mes	Septiembre									
Día	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
mm	35.8	77.1	107.1	139.5	264.7	333.5	333.5	344.2	369	

Mes	Septiembre			Octubre							
Día	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	
mm	411	426.5	469.8	469.8	612.8	854.8	999.3	1143.8	1143.8	1143.8	

Nota: En un pluviómetro, un milímetro de agua es equivalente a un litro de lluvia en una superficie de un metro cuadrado.

los días 26 de septiembre y 2 de octubre (Tabla 3). La lluvia acumulada hasta el día 3 de octubre era de 612.8 mm, sin considerar los 242 mm del día del desastre. En este sentido es claro que el huracán Stan no fue el causante directo de los deslizamientos, pero sí el factor detonante debido a las intensas lluvias ocurridas los días 3 y 4 de octubre, dado que había estado lloviendo desde el 20 de septiembre con un promedio de 40 mm diarios. Durante la permanencia del ciclón en la zona montañosa circundante al CVT, del 1 al 5 de octubre, se precipitaron 572.8 mm de lluvia y 144.5 mm más el siguiente día (Tabla 3). Sin embargo, los deslizamientos se produjeron el día 4 de octubre, cuando se habían precipitado 612.8 mm de lluvia del 20 de septiembre al 3 de octubre, siendo una cantidad menor en comparación con las precipitadas durante el 1 y el 6 de octubre (717.3 mm). La Figura 12 ilustra como en pocas horas la precipitación sobrepasó la cantidad de lluvia esperada para 10, 20 y 50 años igualando la esperada para 100 años. No obstante, el desastre ocurrió en la mañana del 4 de octubre, cuando se había alcanzado un periodo de retorno de sólo 20 años.

IMPLICACIONES DEL PELIGRO

Los resultados obtenidos en este estudio, ponen en evidencia que durante los últimos 105 años han ocurrido al menos siete inundaciones (flujos compuestos de agua y sedimento) que han dejado un registro estratigráfico tangible en la región de Tapachula. Asimismo, como lo evidencia el análisis de la precipitación, el evento del 4 de octubre de 2005 ocurrió al alcanzar un periodo de retorno de precipitación de 20 años, aunque las lluvias posteriores alcanzaron un periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, es importante considerar que en julio de 2006, cuando se realizó el trabajo de campo para este estudio, 10 meses después del desastre, ya no se encontró registro geológico importante del flujo de octubre de 2005. Esto puede ser debido a dos factores principalmente: primero, a los trabajos de acondicionamiento del valle del río que removieron el depósito y segundo, que el proceso erosivo del flujo fue más importante que el proceso de depósito. En este sentido, englobando los análisis sobre los depósitos y los periodos

de retorno encontrados en este trabajo, además de cuatro ciclones tropicales mayores ocurridos en la zona en los años 1929, 1933, 1949 y 1969 (Ponce, 1972, según R. Escobar, comunicación personal, *Michigan Technological University*, EEUU), se puede concluir que aproximadamente cada 10 años un evento similar al que causó el desastre el día 4 de octubre de 2005 podría ocurrir en la zona montañosa cerca de la ciudad de Tapachula.

El registro histórico de flujos similares es muy escaso debido a que en el pasado el crecimiento urbano de la ciudad no había invadido el cauce del río Coatán. Actualmente la amenaza se mantiene constante, pero la vulnerabilidad se ha incrementado y por ende el riesgo es mucho mayor. Indudablemente las áreas que presentan el mayor peligro en caso de que un evento como el de 2005 volviera a ocurrir, son aquellas ocupadas por la llanura de inundación y la terraza más joven del río Coatán, en donde habitan más de 10,000 personas. Es importante señalar que las terrazas más altas a lo largo del valle del río Coatán no serían fácilmente sobrepasadas por un flujo similar, aunque sus paredes podrían ser erosionadas y posteriormente colapsar, como ocurrió cerca del ápice del abanico, a la altura de la planta potabilizadora de agua de la ciudad. Por esta razón las zonas alejadas de las áreas ilustradas en el mapa, pero cercanas al río Coatán, no deben considerarse exentas de peligro.

Un factor importante en cuanto al peligro actual, es que después del desastre de octubre de 2005, y con el objetivo de reducir tal peligro, se adelantaron trabajos de canalización del río Coatán a lo largo de la ciudad, por lo que el marco de referencia asociado al desastre actualmente ya no es válido. De esta forma queda abierta la incertidumbre de lo que podría suceder en caso de un nuevo evento teniendo en cuenta el comportamiento de la canalización del río que fue revestido con fragmentos tamaño grava. Igualmente es importante señalar que el área del canal actual tiene más del doble (0.82 km²) del área que ocupaba el antiguo cauce (~0.35 km²) y que la llanura de inundación está actualmente vedada para la urbanización. En Tapachula, los trabajos de acondicionamiento del valle del río Coatán tuvieron en cuenta un periodo de retorno de 100 años para flujos similares (J. L. Miranda, comunicación personal, Comisión Nacional del Agua, México).

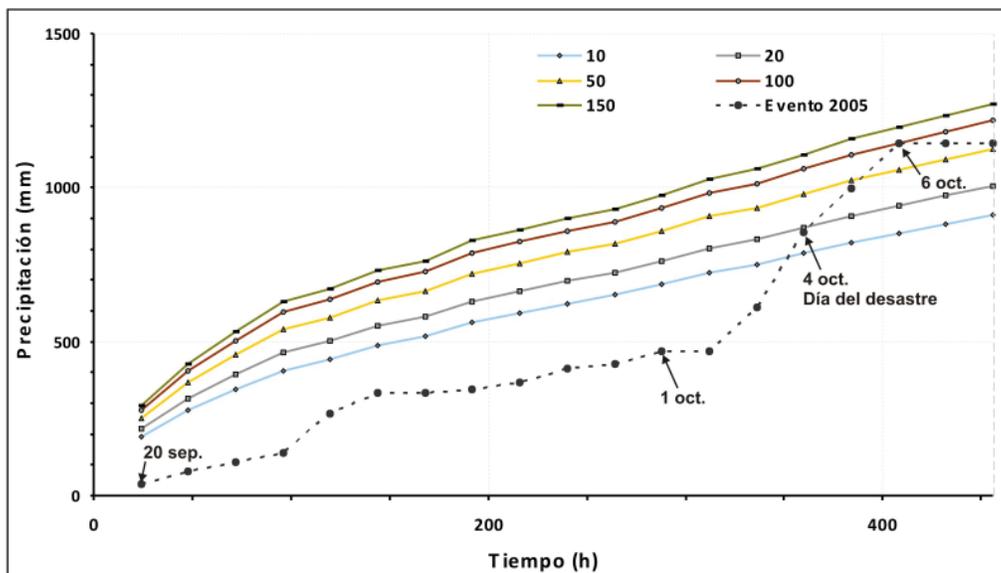


Figura 12. Diagrama de precipitación vs. tiempo que ilustra los periodos de retorno para 10, 20, 50, 100 y 150 años a partir de la precipitación acumulada cada 24 horas por 19 días (456 horas), y la relación con la precipitación acumulada, desde el 20 de septiembre hasta el 8 de octubre, 20 km al norte de Tapachula.

Actualmente se cuenta con un mapa de peligros para inundaciones del río Coatán y la ciudad de Tapachula, con periodos de retorno de lluvias de 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años (Mundo-Molina, 2007). En este estudio se recomienda la reubicación de las zonas afectadas por lluvias con periodos de retorno desde cinco años, así como la siembra de bambú en las márgenes del río en toda la región de Tapachula y la reforestación en la parte alta de la cuenca. Un informe completo fue presentado por el Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) para la Comisión Nacional del Agua (Mundo *et al.*, 2005a, *en* Mundo-Molina, 2007). Es importante señalar que el mapa en cuestión y los escenarios de peligro para inundaciones no son válidos para lahares asociados a una erupción del CVT, dado que pueden ser mucho más voluminosos. Un mapa de peligros volcánicos se encuentra actualmente en proceso (Macías, 2005).

Monitoreo

Existe un estudio de alerta temprana para la ciudad de Tapachula en el río Coatán (Mundo *et al.*, 2005b, *en* Mundo-Molina, 2007). En general, para la amenaza por rios compuestos de agua y sedimento, algunos instrumentos de monitoreo podrían ser muy útiles para actuar ante una posible evacuación en la ciudad, en caso de presentarse lluvias intensas o un incremento de la actividad volcánica. Por ejemplo, en Ecuador existe un sistema electrónico de monitoreo desarrollado en el país, que mide el nivel del fluido, ya sea agua o lodo, y la presión sobre el fondo para dar alerta temprana a una población asentada aguas abajo en el valle de Los Chillos aledaño al Volcán Cotopaxi

(Escuela Politécnica del Ejército de Ecuador, 2006). Un sistema de alerta temprana es indispensable para disminuir la incertidumbre durante la evacuación de la población con una disminución de la vulnerabilidad.

CONCLUSIONES

El registro geológico de inundaciones expuesto a lo largo del valle del río Coatán en el abanico de Tapachula, indica que el desastre ocurrido el 4 de octubre de 2005 no fue un evento extraordinario. El estudio estratigráfico indica que existen al menos 10 depósitos de inundaciones ocurridas durante los últimos 680 años y al menos 7 eventos durante los últimos 105 años, todas del orden de las ocurridas en 2005. Los datos históricos, el material antropogénico encontrado en los depósitos y algunas relaciones geológicas, indican que existen depósitos muy recientes provenientes de eventos similares al de octubre de 2005. En total, estos depósitos definen la terraza más baja y cercana al río después de su llanura de inundación actual y asimismo constituyen el sector de mayor peligro en caso de una inundación futura causada por un nuevo flujo compuesto de agua y sedimento.

Es importante tener en cuenta que el crecimiento urbano desmesurado de la ciudad invadió las terrazas bajas del río, inclusive el lecho del mismo, durante los últimos 30 años. Además, el actual río Coatán aún manifiesta cambios en cuanto a su distribución debido a su amplia llanura de inundación, que en algunos sectores supera los 500 m de ancho. En conjunto, estas consideraciones se relacionan y explican la ocurrencia del desastre del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) proyecto N° 47226 a José Luis Macías. Agradecemos muy especialmente al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México. Igualmente a los pobladores de Tapachula quienes fueron parte fundamental para la obtención de los resultados. Al Parque Ecoturístico La Changa, a la Comisión Nacional del Agua sede Tapachula, a Protección Civil y al Archivo Histórico de la ciudad de Tapachula. También al Servicio Meteorológico Nacional en México D.F. A Cristian Ordaz por su desinteresada asistencia en el trabajo de campo, así como a Cecilia Limón, Ivonne Rojas e Iris Sunia. A Natalia Pardo quien con sus comentarios ayudó a hacer más claro este manuscrito. Finalmente a los revisores Gerardo Carrasco y Sergio Rodríguez, además del Editor en Jefe Carlos González y la editora técnica Teresa Orozco, quienes dieron importantes sugerencias para hacer del texto y las ilustraciones algo mucho más coherente.

REFERENCIAS

- Beverage, J.P., Culbertson, J.K., 1964, Hyperconcentrations of suspended sediment: American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division, 90, 117-128.
- Caballero, L., Macías, J.L., García-Palomo, A., Saucedo, G.R., Borselli, L., Sarocchi, D., Sánchez, J.M., 2006, The September 8-9, 1998 rain-triggered flood events at Motozintla, Chiapas, México: Natural Hazards, 39, 103-126.
- García-Palomo, A., Macías, J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., Hughes, S., Saucedo, R., Espindola, J. M., Escobar, R., Layer, P., 2006, Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala, in Rose *et al.* (eds.), Natural Hazards in Central America: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 412, 39-57.
- Escuela Politécnica del Ejército de Ecuador, 2006, Sistema de alerta temprana automático para los flujos de lodo del volcán Cotopaxi: Escuela Politécnica del Ejército de Ecuador, Unidad de Gestión de la Extensión, <<http://www.espe.edu.ec/portal/files/SAT.pdf>>, actualización: Septiembre 25, 2006.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2005, II Censo de Población y Vivienda: México, <<http://www.inegi.gob.mx>>.
- Macías, J.L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, 57(3), 379-424.
- Macías, J.L., Espindola, J.M., García-Palomo, A., Scott, K.M., Hughes, S., Mora, J. C., 2000, Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present, and future hazards: Geological Society of America Bulletin, 112, 1234-1249.
- Mercado, R., Rose, W., 1992, Reconocimiento geológico y evaluación preliminar de peligrosidad del volcán Tacaná, Guatemala-México: Geofísica Internacional, 31, 205-237.
- Miall, A.D., 1996, The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology: Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 582 pp.
- Mugica, R., 1987, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas, México: Instituto Mexicano del Petróleo, Informe interno, C-2009, 47 pp.
- Mundo-Molina, M.D., 2007, Mapas de riesgo y protección de cauces para evitar inundaciones en el río Coatán en Tapachula, Chiapas, en Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos: Córdoba, Argentina, Universidad Nacional del Córdoba, Instituto Superior de Recursos Hídricos (ISRH), C-4, 3 pp.
- Murcia, H.F., 2008, Depósitos de lahar del Complejo Volcánico Tacaná y depósitos fluviales en el abanico de Tapachula, Chiapas-México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis de maestría, 136 pp.
- National Hurricane Center (NHC), 2007a, Glossary of NHC Terms: Estados Unidos, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Hurricane Center (NHC), <<http://www.nhc.noaa.gov/>>, actualización: 16 de septiembre de 2007.
- National Hurricane Center (NHC), 2007b, The Saffir-Simpson hurricane scale: Estados Unidos, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Hurricane Center (NHC), <<http://www.nhc.noaa.gov/>>, actualización: 19 de agosto de 2007.
- National Hurricane Center (NHC), 2007c, Archive of Hurricane Seasons: Estados Unidos, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Hurricane Center (NHC), <<http://www.nhc.noaa.gov/>>, actualización: 22 de marzo de 2007.
- Ordaz, C., 2006, Reconstrucción de la historia eruptiva del volcán Tacaná; Chiapas, México, durante el Holoceno: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Tesis profesional, 142 pp.
- Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987, A rheologic classification of subaerial sediment-water flows: Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 7, 1-12.
- Pierson, T.C., Scott, K.M., 1985, Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow: Water Resources Research, 21, 1511-1524.
- Pierson, T.C., Scott, K.M., 1999, Superficial hydrologic hazards and volcanoes: Debris avalanches, lahars and floods: Processes, interpretation of deposits, and techniques of hazard assessment and mitigation: United States Geological Survey, 137 pp.
- Ponce, H.R., 1972, Evaluación de crecidas en la República de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Tesis profesional, 115 pp.
- Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991, Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow – hyperconcentrated flow continuum, en Fisher, R.V., Smith, G.A. (eds), Sedimentation in Volcanic Settings: Tulsa, Society for Sedimentary Geology, Special Publication 45, 59-70.
- Vallance, J.M., 2000, Lahars, en Sigurdsson, H. (ed.), Encyclopedia of Volcanoes: San Diego, Academic Press, 283-289.
- Williams, S.N., Self, S., 1983., The October 1902 plinian eruption of Santa Maria Volcano, Guatemala: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 16, 33-56.

Manuscrito recibido: Abril 21, 2008

Manuscrito corregido recibido: Agosto 31, 2008

Manuscrito aceptado: Septiembre 5, 2008