

ASPECTOS GEOHIDROLÓGICOS Y SEDIMENTOLÓGICOS DE LOS FLUJOS DE LODO ASOCIADOS AL TERREMOTO DE CINCHONA (M_w 6,2) DEL 8 DE ENERO DEL 2009, COSTA RICA

HYDROGEOLOGICAL AND SEDIMENTOLOGICAL ASPECTS OF THE MUD FLOWS RELATED TO THE CINCHONA EARTHQUAKE (M_w 6,2) OF JANUARY 8, 2009, COSTA RICA

Guillermo E. Alvarado

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, Apdo. 10032-1000, Costa Rica
galvaradoi@ice.go.cr

(Recibido: 01/07/2009; aceptado: 08/11/2010)

ABSTRACT: The Cinchona earthquake (M_w 6.2) located 6.5 km east of the active crater of Poás, triggered several landslides (rock fall, rotational and translational slides), which in combination with existing pore water within the landslide mass in intense tropical weathering volcanic soils, local aquifers deformation, and mixing of fluvial waters into the moving sediment mass, produced high destructive debris flows along the Seco, María Aguilar, Cariblanco, Ángel, La Paz, Sarapiquí, Mataste and Tigre rivers. The deposits totaling 0.5-3 m in thickness, consisting of angular to rounded volcanic clasts, matrix-supported, very poorly sorted gravels, interpreted as a non-eruptive lahar or debris flow diamicton (volcanic muddy gravelly sands) deposits, specifically as a cohesive (5-7% clay) woody mud flows. Logs and other organic debris are often incorporated in the levees and the preserved front flows were well defined and 1.5 m high, suggesting a relative moderate viscosity flow. Megablocks of ignimbrite (60-200 m³) from the bedrock were incorporated and broken up into individual fragments. The proximal and medial canyon-side facies are represented by thin (0.1-1 m) veneers deposits on steep slopes with abundant evidences of marks peak-flow levels (mudline, striations) and bulking (incorporation of boulders, anthropogenic and log debris). In open spaces of the piedmont and alluvial plain, instead, the flow was of hypenconcentrate type due mixing with the stream water downstream, and present a bouldery flow channel deposit surface gradating to smooth flow deposit surface, and abundance evidence of cataclasis (breakage of clast owing to collisions). The velocity of the flows were estimated for several rivers variable between 13.3 and 4.8 m/s (48-17.5 km/h), with super-elevations in the channel rivers up to 35 m as a steep-fronted head of at least 5-15 m, but after the piedmont, it was only 1-0.5 m high and it move at relative slower velocities of 2.5-10 m/s (9-36 km/h). The flow pushes some stream water along the channel in front of it, a phenomenon termed miscible displacement. The

total volume of sediments is crudely estimated in at least $2.5\text{-}3.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. The apparent coefficient of friction or *fahrböschung* number was for the debris and hypoconcentrated flows of 0.09 and 0.06, respectively. Six bridges, several pasture land, the electromechanical equipment at the Cariblanco powerhouse were destroyed. The caudal was estimated in the Sarapiquí river at Cariblanco power house in $4374\text{-}5994 \text{ m}^3/\text{s}$. The strong motion equipment registered peak accelerations of 25.64 cm/s^2 due the debris flow, and the spectrum of seismic record produced is characterized by frequencies between 7 and 37 Hz. The protection dike at the Cariblanco power house produce a change in the hydrologic and reologic condition of the flow, from a supercritical flow with antidunes to a subcritical flow (Froude number: 0.48-0.84) with lower velocity of 1.6-3.2 m/s (6.1-11.7 km/h), favoring the loss its bedload zone transported as traction carpet, and therefore with a less destructive effects on the buildings due a relatively diluted overlying flow zone (tranquil flow) carrying suspended sediment and tree debris. The mudflows produced strong vertical and lateral erosion, killed all the fluvial fauna, resulted in profound changes in the hydrologic stability for years of the Sarapiquí drainage basin.

Keywords: Debris flows, Cinchona earthquake, Poás volcano, Costa Rica

RESUMEN: El terremoto de Cinchona (M_w 6,2) localizado a 6,5 km al oriente del cráter activo del Poás, disparó una serie de deslizamientos (caída de rocas, deslizamientos rotacionales y traslacionales), los cuales en combinación con las condiciones húmedas de los suelos tropicales volcánicos, intensamente meteorizados, la deformación de los acuíferos, y la mezcla con el agua de los ríos, produjo flujos de lodo a lo largo de los ríos Seco, Cariblanco, María Aguilar, Ángel, La Paz, Sarapiquí, Mastate y quebrada Tigre. Los depósitos tenían un espesor entre 0,5 y 3 m, consistiendo de fragmentos volcánicos angulares hasta redondeados flotando en una matriz limo-arenácea, pobremente seleccionada, interpretado como un *debris flow* o lahar cohesivo no eruptivo (5-7% de arcilla) enriquecido en troncos, que estaban incorporados en los *levees*. Los frentes del flujo se preservaron con pendientes bien definidas y alturas de hasta 1,5 m, sugiriendo una viscosidad moderada. Megabloques de ignimbritas ($60\text{-}200 \text{ m}^3$) fueron incorporados y se fragmentaron durante su transporte. En las facies proximales y medias los depósitos fueron relativamente delgados (0,1-1 m) sobre las pendientes fuertes, en donde quedaron evidencias de la línea de barro y estriaciones. En los espacios abiertos en el piedemonte y llanura aluvial, el flujo se comportó como hiperconcentrado debido a la paulatina dilución y los depósitos se presentaban como acumulaciones de bloques gradando lateralmente a facies con topografía suave, y evidencias de impactos cataclásticos. Las velocidades estimadas de los flujos para diferentes ríos variaron entre 13,3 y 4,8 m/s (48-17,5 km/h), con superelevaciones de hasta 35 m, con un frente abrupto de la cabeza del flujo entre 5 y 15 m de alto, pero después del piedemonte, se movió con un frente más bajo (1-0,5 m) y a velocidades de 2,5-10 m/s (9-36 km/h). Durante el movimiento del flujo, se produjo en su frente una onda de agua limpia llamada onda de desplazamiento miscible. El volumen total de sedimentos fue crudamente estimado en al menos $2,5\text{-}3,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. El coeficiente de fricción aparente o número de *fahrböschung* fue de 0,09 para las facies de debris y de 0,06 para los hiperconcentrados. Seis puentes, fincas ganaderas y los equipos electromecánicos de la casa de Máquinas de Cariblanco y la toma del María Aguilar, fueron destruidos. El caudal estimado a la altura de la Casa de Máquinas de Cariblanco estuvo entre 4374 y $5994 \text{ m}^3/\text{s}$. El flujo generó aceleraciones pico de $25,64 \text{ cm/s}^2$ y los registros espectrales de las ondas estuvieron entre 7 y 37 Hz. El dique de protección de la casa de máquinas favoreció a que las condiciones hidrológicas y reológicas del flujo cambiaran desde supercríticas con antidunas hasta subcríticas (número de Froude: 0,48-0,84) con velocidades bajas de 1,6-3,2 (6,1-11,7 km/h), favoreciendo que la carpeta de fondo de sedimentos gruesos fuese dejada atrás, y que el flujo transitara hacia las instalaciones como un régimen relativamente tranquilo, llevando tan solo sedimentos en suspensión y troncos de árboles. Los flujos produjeron una profunda erosión vertical y lateral, matando a toda la fauna fluvial, y resultando en profundos cambios en la estabilidad hidrológica de la cuenca del Sarapiquí que se mantendrán por varios años.

Palabras clave: Flujos de lodo, terremoto de Cinchona, Volcán Poás, Costa Rica

INTRODUCCIÓN

El 8 de enero ocurrió el terremoto de Cinchona (M_w 6,2) a las 1: 21': 34" p.m., con una profundidad de 5,5 km, localizado a 6,5 km al oriente del cráter del volcán Poás. Su intensidad máxima fue

de grado IX en la escala Mercalli-Modificada en la zona epicentral, pero en términos generales su intensidad en el área mesosísmica fue de grado VIII-VII. Este terremoto disparó una serie de deslizamientos y de caída de bloques, concentrados en zonas preferenciales, que serían las del área

mesosísmica, establecida entre Varablanca-cono Von Frantzius-Cinchona-río Sarapiquí, y la otra en los alrededores del volcán Congo. Otros deslizamientos menores ocurrieron entre Fraijanes y Cartagos, así como los caminos de acceso a Bajos del Toro, alrededores de San Miguel de Sarapiquí (Fig. 1).

Aparte de los efectos de la intensa y localizada sacudida sísmica, acrecentados por suelos volcánicos arcillosos en elevadas pendientes y por muchas construcciones deficientes, también se dispararon una serie de avalanchas, coladas o flujos de barro, de mayor a menor importancia en los ríos Seco, María Aguilar, Sardinal, Cariblanco, Ángel, La Paz, Mastate y Quebrada Tigre. Claramente el evento más importante y económicamente destructor, que recogió la mayor parte de las corrientes de lodo, fue el río Ángel, seguido por los de los ríos Sarapiquí y María Aguilar. El flujo de lodo destruyó 6 puentes e inundó la Casa de Máquinas de Cariblanco, además destruyó la toma del María Aguilar, y afectó levemente la presa del Sarapiquí, dañando el equipo electromecánico (tableros de control, generadores) y sacando de operación a la planta Hidroeléctrica de Cariblanco. Otras plantas de generación eléctrica privada, fueron igualmente afectadas de modo severo por el sismo y sus efectos secundarios (deslizamientos y flujos de lodo), entre las que se encuentran El Ángel, Suerkata, Caño Grande e Hidrovenecia.

Unas 40 cabezas de ganado murieron y se destruyeron potreros. Afortunadamente, debido a alertas generadas por personal ICE por diferentes medios y por pobladores, el flujo al parecer tan solo cobró una vida humana. De igual modo, el dique protector de la Casa de Máquinas ayudó a que los efectos no fueran más destructivos. La vida en los ríos afectados fue totalmente eliminada, entre ellos una gran cantidad de peces y anfibios, aunque al día de hoy ya algunos peces y nutrias están colonizando de nuevo el río Sarapiquí, procedentes de cauces no afectados.

Un nuevo evento de avalancha se generó el mismo día del temblor cerca de las 9: 30 p.m. y también en la madrugada del 21 de enero. Posterior a esas fechas, otros eventos se registraron e incluso afectaron en cierta medida el atracadero y sus embarcaciones en Puerto Viejo de Sarapiquí.

La presente investigación trata sobre una recopilación de los antecedentes, hechos, aspectos sedimentológicos e hidrológicos, así como algunos de sus efectos sobre la infraestructura y el medio, con el fin de dejar constancia sobre este fenómeno hidrogeológico que afectó severamente al país, particularmente al sector de generación eléctrica y a la infraestructura vial. También se pretende emitir una serie de apreciaciones orientadas a que puedan servir para estudios futuros de carácter preventivo.

Si el lector desea ampliar sus conocimientos sobre el terremoto de Cinchona y sus efectos, se recomienda consultar el informe editado por la Red Sismológica Nacional UCR-ICE (Barquero, 2009, editor) en la página web en su sección "Biblioteca": www.rsn.geologia.ucr.ac.cr

ANTECEDENTES

La región afectada por el terremoto se ubica entre los macizos de los volcanes Poás (activo) y Barva (dormido), a lo largo de los cuales discurre el río Sarapiquí. Varios otros aparatos volcánicos menores y dormidos (Congo, Hule, Cacho Negro, etc.) se presentan en la región y una serie de fallas activas y potencialmente activas ya habían sido delineadas en diversos estudios (Alvarado et al., 1988; Montero et al., presente volumen). La región presenta laderas de suave hasta abrupta pendiente (60° e incluso verticales), con alturas entre 300 y casi 600 m, esculpidos en rocas volcánicas y epiclásticas (lavas, tobas, brechas, lahares), con una espesa cobertura de suelos (tobas y tobas de lapilli alteradas, lahares) de 5 a 40 m de espesor.

Desde que el ICE inició los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos en la cuenca del río Toro en 1985, se visualizó que la región había sido afectada por 5 terremotos locales (1851, 1888, 1911, 1912 y 1955) que junto con el terremoto de Orotina de 1924, habían generado deslizamientos y avalanchas, particularmente por el valle del río Toro. Dichos estudios fueron de índole sismológico, neotectónico y vulcanológico (Alvarado & Climent, 1985; Alvarado, 1988; Alvarado et al., 1988, 1989). Después, con los estudios hidroeléctricos Laguna Hule, Hule, Cariblanco y Toro 3 en

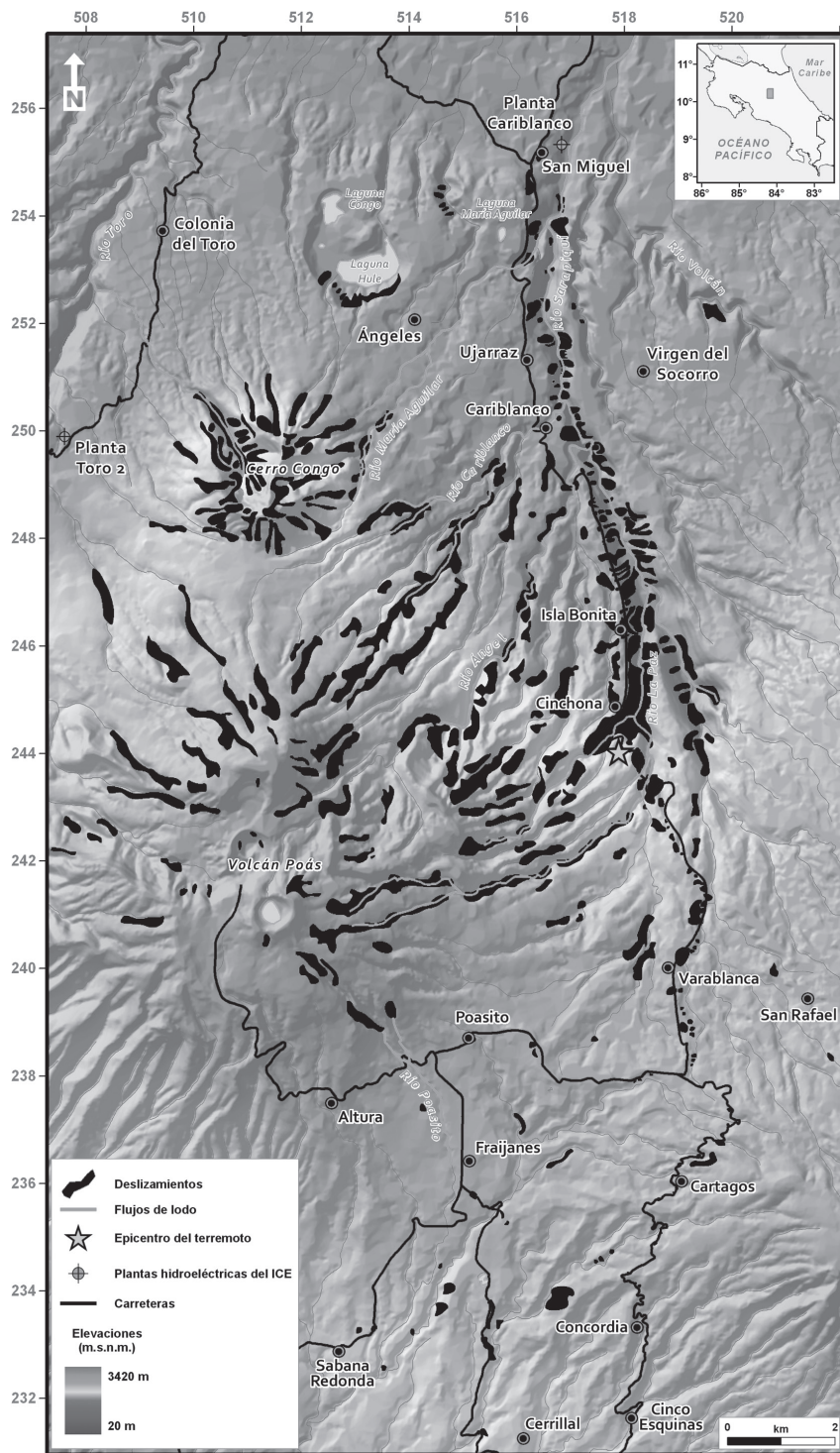


Fig. 1: Mapa generalizado y preliminar de los principales deslizamientos y corrientes de lodo disparados por el terremoto del 8 de enero, basado en datos de la UNA, ICE, CNE y UCR, con comprobación parcial de campo y sobrevuelos.

las cuencas de los ríos Sarapiquí y Toro, continuaron los trabajos de detalle reafirmando y afinando las conclusiones en cada uno de ellos. De los estudios previos se desprende que la región alrededor del Poás ha sido afectada en época histórica por lo menos por 7 terremotos (sin tomar en cuenta el del 2009), que en su mayoría desencadenaron deslizamientos y crecidas en ambas márgenes de la cordillera Central, incluyendo el sismo relativamente lejano de Orotina (Alvarado, 1988; Alvarado et al., 1988; Mora & Morales, 1986, 1992; Peraldo & Montero, 1994). Ver Cuadro 1.

Von Frantzius (1861) menciona que en 1770 ó 1776 el río Itiquís se creció mucho a causa de un fuerte temblor, trayendo gran cantidad de piedras, barro y troncos, sobrepasando en muchas partes su nivel y cubriendo extensiones enteras con los sedimentos, cuyos vestigios aún logran verse. En efecto, Alvarado (2000) indica que el responsable de todo esto fue el terremoto de San Bartolomé de Barba, acaecido el 15 de febrero de 1772, descrito por Peraldo & Montero (1994).

El terremoto del 30 de diciembre de 1888 originó la laguna de Fraijanes y otros deslizamientos menores así como crecidas en diversos ríos (Alvarado et al., 1988; Mora & Morales, 1986, 1992).

Otro ejemplo corresponde con en el terremoto de 1912, en donde unos 10 minutos después del sismo se originó una crecida en el río Sarchí, la cual arrasó el puente situado en el camino de Grecia a Sarchí, continuando hacia el río Colorado y el río Grande. El río San Juan fue afectado devolviendo el sentido de sus aguas unos 700 m. Otros desbordamientos similares bajaron simultáneamente por los ríos Anonos, Desagüe y Gorrión, con intervalos de aproximadamente 5 minutos, matando mucho ganado y destruyendo casas, pereciendo sus moradores (Tristán et al., 1912; Alvarado et al., 1988).

El 4 de marzo de 1924 ocurrió el terremoto de San Mateo (Orotina) que ocasionó destrucción en la región sur-occidental del Valle Central. Días después, el 2 de marzo ocurrió una fuerte réplica bajando posteriormente corrientes de lodo, piedras y árboles en la naciente de la quebrada Sucia (un posible afluente de la quebrada Azufrada), ubicada a poca distancia al oeste de Toro Amarillo,

que afortunadamente no causaron daño alguno en esta región casi despoblada (Sapper, 1925; Mora & Morales, 1986).

El 01 de setiembre de 1955 se originó un nuevo terremoto que trajo como consecuencia la crecida de algunos ríos, aproximadamente un mes después en correspondencia con el inicio del período lluvioso, entre ellos el río Toro (Alvarado et al., 1988). Alvarado (1988) realizó entrevistas a personas de Toro Amarillo para calcular el área de las secciones transversales alcanzada por las crecidas relacionadas con este sismo, estimándose tirantes de entre 4 y 9 m con respecto al nivel del río en ese momento.

Dentro de sus principales conclusiones, los estudios del ICE plantearon:

1) Que debido a la presencia de terremotos históricos y fallas potencialmente activas y debidamente identificadas, y dado que el período de recurrencia establecido por Alvarado et al. (1988) ya se había vencido, existía una alta a muy alta probabilidad de que las obras se vieran afectadas por la sacudida sísmica ($M_w \geq 6,0-6,5$, IMM VIII, aceleraciones de 0,40-0,59 g) durante el período de vida de sus obras, por lo que el diseño debía de contemplar dichas aceleraciones (Climent, 1991; Barquero, 1995, 2000; Barquero & Climent, 2002; Climent et al., 2002; Barquero & Soto, 2003).

2) Que la región solía presentar, después de los terremotos, deslizamientos y crecidas de los ríos mediante avalanchas, por lo que los estudios ingenieriles debía de contemplar estos fenómenos hidro-geológicos dentro de sus diseños (Alvarado, 1988; Barquero, 1995, 2000; Barquero & Climent, 2002; Barquero & Soto, 2003; Climent et al., 2006; Barquero et al., 2007). Sin embargo, el mayor problema sería el de evaluar su magnitud (volumen, velocidad y altura o tirante), tal y como fue planteado por Alvarado (1988).

El ICE realizó un estudio de estabilidad de laderas de la cuenca del Sarapiquí con el objetivo de determinar la ubicación de sectores del cañón con potencial de deslizamiento y estimar el volumen de los materiales a deslizarse que podrían llegar a obstruir el cauce y generar una avalancha. Se tomó como modelo el deslizamiento rocoso del río Toro del 16 de junio de 1992, de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$, que generó un represamiento

Cuadro 1

Terremotos importantes que han afectado a los macizos del Poás y Barva, y sus efectos
(basado en Alvarado et al., 1988; Montero et al., 2010)

| Terremoto | Fecha y hora | Ms/lo | Muertes | Falla tectónica propuesta | Daños | Deslizamientos/ Crecidas |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|---------|---------------------------------------|--|--|
| San Bartolomé de Barba | 15-2-1772 | ? | ? | Ángel o Sabanilla? | En Barva y Heredia | Crecidas |
| Fraijanes? | 28-3-1851 7:15 a.m. | 6,0 VIII | ? | Alajuela o Ángel u otra indeterminada | 145 casas afectadas | ? |
| Fraijanes | 30-12-1888 4: 12 a.m. | 6,0 VII | | Ángel | 3659 casas y edificios dañados. Réplicas hasta el 23-2-1899, y la muerte de 5 personas | Deslizamientos (p.ej. laguna de Fraijanes) y flujos en los ríos Poás, Tambor, Quebrada Salto y fuentes de La Paz |
| Toro Amarillo | 28-8-1911 10: 06 a.m. | 5,8 VII | 0 | Aguas Zarcas-Viejo | Casas dañadas | Deslizamientos y crecidas |
| Sarchí (Bajos del Toro) | 6-6-1912 00: 40 a.m. | 5,1 VII | 17 | Sabanilla | | Grandes deslizamientos y crecidas que mataron personas |
| San Mateo (Orotina) | 4-3-1924 | 7,0 IX | | Subducción? | Una o varias muertes. Daños varios a infraestructura. Deslizamientos | Una réplica disparó una crecida al oeste de Toro Amarillo. |
| Río Segundo (Bajos del Toro) | 01-09-1955 | 5,5 VII-VIII | 0 | Aguas Zarcas-Viejo | Dstrucción de casas | Crecidas en correspondencia con el mes lluvioso |
| Cinchona | 08-01-2009 | 6,2* IX-VIII | 23 | Ángel | Dstrucción de viviendas, puentes, obras energéticas, con 23 muertes y ≥ 7 desaparecidos | Deslizamientos y corrientes de barro |

*Las magnitudes M_s y M_w son similares en este caso

de agua de 300 000 m³. Se definieron 3 escenarios por medio de los cuales se realizó el cálculo del volumen de materiales deslizables: 1) 0,17 x 10⁶ m³, 2) 0,65 x 10⁶ m³ y 3) 2,56 x 10⁶ m³ (Barrantes & Jarquín, 2005; Barrantes, 2006). Dichos estudios fueron la base para el diseño del dique de protección en la Casa de Máquinas a la cuota 419 m s.n.m. (Avilés, 2009).

LOS FLUJOS DE LODO DE ENERO DE 2009

Los flujos de lodo del 8 y 21 de enero, se pueden describir partiendo de tres aspectos fundamentales: a) iniciación y mecanismo (s) disparador (es), b) transporte y c) sedimentos y su

zona de sedimentación. Sin embargo, dado que son los sedimentos los que usualmente observamos y se preservan por un cierto tiempo previo a su erosión, partiremos de este último punto para ir reconstruyendo lo más fehacientemente posible los sucesos a partir de las evidencias de campo, entrevistas, fotografías, videos y laboratorio, particularmente lo relacionado con el mecanismo de transporte, sedimentación y su reología.

Descripción de los depósitos

El flujo de lodo que afectó la Casa de Máquinas de Cariblanco fue descrito por testigos

y evidenciado en videos durante su avance, como una pared bien definida de agua, piedras, lodo y troncos de árboles, estimada por los observadores de unos 15 m de altura, que avanzaba sobre un río relativamente limpio, emitiendo un cierto “vaho o vapor”, y en cuyo frente muchos peces saltaban tratando de huir (Fig. 2). En otras partes (p.ej. río María Aguilar), las personas describen un fuerte “ventolero” al frente del flujo.

Los levantamientos topográficos realizados por el ICE en el cauce del Sarapiquí a la altura de la Casa de Máquinas de Cariblanco (Fig. 3), evidencian que el flujo debió de alcanzar una altura de unos 9,25 m en dicho sector. En las instalaciones del ICE, el flujo alcanzó sobre el terreno circundante, alturas de 4,25-2,10 en la Casa de Máquinas (419 m s.n.m.), 2,40-1,40 m en el Almacén (419,61 m s.n.m.), 0,85-0,15 m en la Bodega de Inflamables (420, 89 m s.n.m.), 2,00-1,10 en el Edificio de Talleres (419,67 m s.n.m.), y 0,75-0,30 m en el Edificio Administrativo (420,35 m s.n.m.).

A la altura del poblado de El Bosque, el frente del flujo poseía un frente de 3-4 m de altura, aunque en algunos lugares cercanos, los lugareños reportan hasta 7 m (Fig. 3). En la estación hidrológica La Virgen, se reporta un tirante de 4,81 m (la media era de 1,61 m), mientras que en Chilamate, por Puerto Viejo de Sarapiquí, se midió 3,31 m (media de 1,4 m) según datos del Área de Hidrología del ICE (S. Laporte, com. escrita,

2009). Claramente se observa como la altura del flujo disminuía durante su transporte debido a que pasó de valles encañonados a la llanura de inundación.

El flujo transportó bloques de lava (predominantemente cantos rodados de diverso tamaño) y megaclastos de ignimbritas (densidades 1,46-1,47 g/cm³), estos últimos de 5 m x 5 m x 2,5 m y de 5,5 m x 4 m x 9 m (90-290 ton), que como lo evidencian las fotografías y videos, fueron transportados por rodamiento como parte de la carpeta de fondo del flujo, mientras que los clastos de 1-0,5 m de diámetro y menos fueron transportados como parte del flujo por saltación y suspensión. Los bloques de ignimbrita provienen de afloramientos presentes en el río María Aguilar, pero con su transporte y fragilidad, se fueron fragmentando en tamaños menores, y se les llega a observar a más de 10 km de la fuente de origen.

Los suelos in situ en el macizo norte del Poás y Barva, están representados por cenizas recientes (tobas café), tobas antiguas de color anaranjado hasta amarillento con clastos juveniles (vesiculados y no vesiculados) y líticos pre-existent, muy arcillosas, así como capas métricas de pómez y escorias plinianas, que suele sobreyacer a lahares y lavas. Mediante el estudio de Chinchilla (2000), los suelos están definidos por los órdenes de los andisoles (Hapludand), caracterizados por los altos contenidos de pseudo-arcillas (alofonas), los cuales tienen desarrollo edáfico de moderado a



Fig. 2: La corriente de lodo transitando por el río Sarapiquí y las instalaciones en las instalaciones de Casa de Maquinas. Se observan los grandes bloques de ignimbritas de casi 10 m de diámetro transportados como por rodamiento. De igual manera se observa el rocío de lodo a casi 60 m de altura durante el transporte del flujo (Fotografía de G. Hernández, 13:45 h del 8 de enero, 2009).

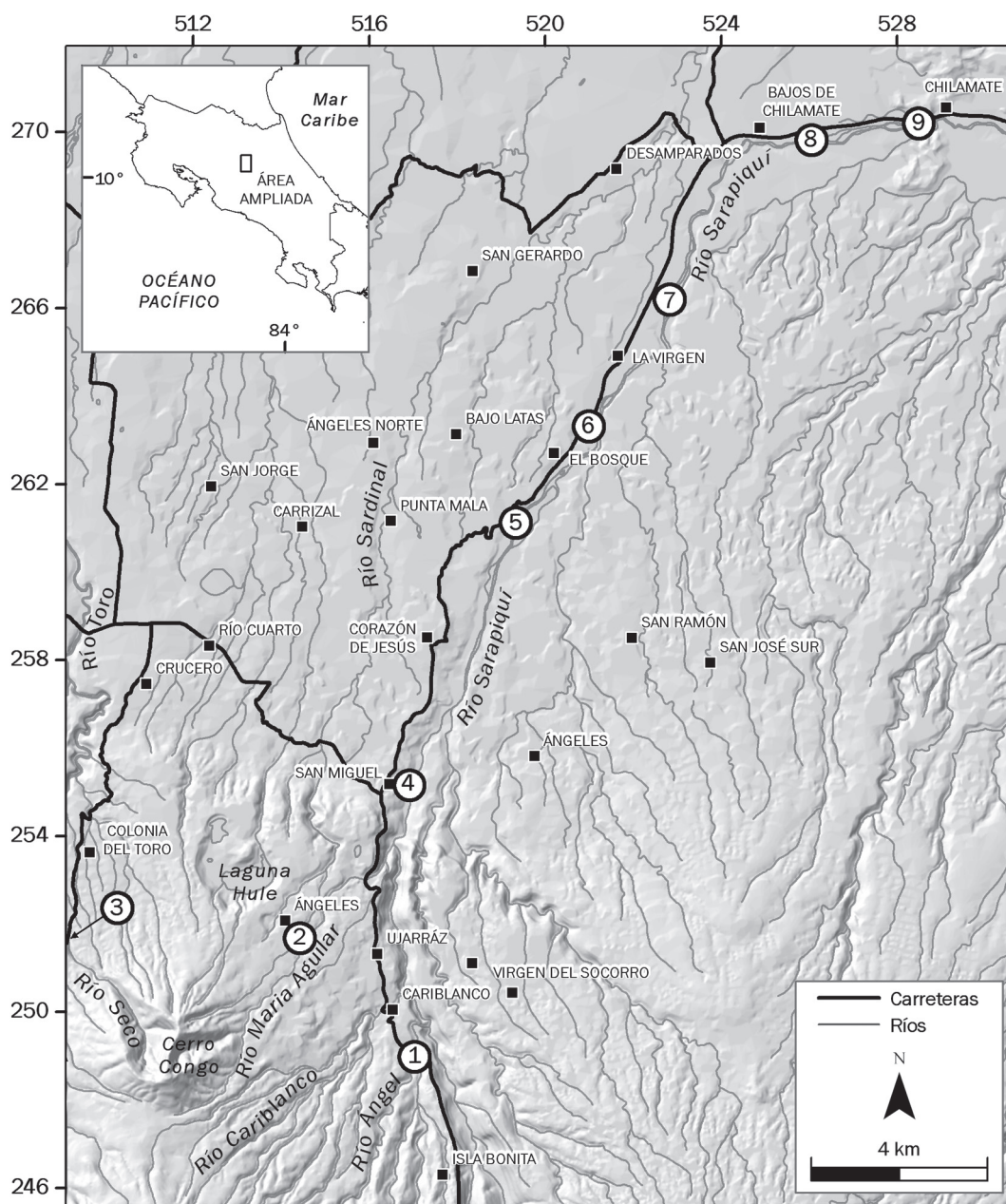


Fig. 3: Localidades en donde se realizaron las mediciones citadas en el texto.

avanzado, una alta porosidad, altos contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales. Ocupando principalmente los cañones de los ríos, se encuentran el orden de los entisoles (Orthent), caracterizados en cambio por un pobre desarrollo edáfico debido a las fuertes pendientes.

Al momento de su emplazamiento y por una semana, los sedimentos estaban saturados en condición de fluido viscoso, incapaces de soportar a una persona. Las pruebas de caracterización de muestras obtenidas de la matriz de los flujos de lodo, tales como gravedad específica, humedad



Fig. 4: Frente (1-1,5 m de altura) dejado por el flujo de lodo cerca de puente sobre el río Seco (izquierda) y María Aguilar (derecha) camino a Colonia Toro, indicativo de una viscosidad relativamente elevada (Fotografías: A. Rodríguez, izquierda y G.E. Alvarado, derecha)

natural, granulometría y límites de consistencia (límites de Atterberg) evidencian la existencia de materiales esencialmente arenosos. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la mayoría de estos suelos desplazados (matriz) se clasifican como SM (arenas limosas), y unos pocos como ML (limos arenosos), GM (gravas con finos limosos) y SP (arenas). Del análisis granulométrico se desprende que entre un 7 y 37% son partículas de gravas, mientras que entre un 34 y un 51% son partículas tamaño arena. La fracción fina varía entre 24 y 52%, con un porcentaje de arcilla de 5 a 7%. Por otro lado la fracción fina recuperada presenta valores del Límite Líquido entre 48-59%, Índices Plásticos bajos, entre 3-10% y humedades variables entre medias y altas (39 y 85%). En estudios de los materiales in situ realizados para diferentes obras del ICE así como otras compañías, los suelos denotaban altos contenidos de humedad (tan altos como 82-108%), cercanos al límite líquido (tan altos como 71-143%), para índices de liquidez (IL) cercanos a la unidad (ver Laporte, 2009a, b). Esta condición de casi un fluido viscoso, los hace susceptibles ante cualquier perturbación súbita, como un sismo, a colapsar, situación que se agrava si suman las altas pendientes en que los materiales se acumularon con espesores de hasta 40 m, y la alta porosidad que los caracteriza.

Los depósitos del flujo suelen presentar malecones o levees de troncos de árboles, frentes bien definidos de hasta 1,5 m de altura, que avanzaron

contrapendiente con un fuerte poder erosivo y de pulimentar, lo que es indicador de un flujo relativamente viscoso (Figs. 4 y 5). En las partes proximales a medias de los cauces encañonados, los depósitos preservados sobre las pendientes elevadas poseían espesores de 0,1-1 m de espesor, con abundantes evidencias de las marcas dejadas por el flujo (líneas de barro, erosión, pulimento y estriación de las paredes) pero pocas evidencias de colisiones cataclásticas (Figs. 6 a 8).

Al llegar a sectores más abiertos del pie de monte y a la llanura, los depósitos fueron perdiendo su capacidad de transporte de gruesos (segregación gravitacional) y estos se depositaron preferencialmente en barras o bermas a modo de enjambres de bloques. Así, los depósitos cambiaron al tipo de sedimentos de llanura de inundación con una superficie relativamente suave (Fig. 9). En efecto, en los videos de aficionados, tomados en los alrededores de La Virgen, se observa como el flujo no solo transita relativamente lento, sino que posee forma de punta de lanza y es antecedido entre 2 y 10 m (caso de Lomas de La Virgen) y 1-3 m (caso del restaurante Hacienda Poza Azul) por una pequeña ola ($\leq 0,5$ m de altura) de agua relativamente limpia, producto del desplazamiento del agua por la masa más densa del flujo con una altura de la cabeza de 0,5-1 m, cargado de sedimentos y troncos de árboles. Es justo en este frente de onda de agua clara, en donde los testigos observaron los peces tratando de escapar. Olas similares están descritas en la literatura por Cronin



Fig. 5: Fotografías que muestran los efectos del flujo de barro en el río María Aguilar camino a la Laguna Hule. Se observa en ambas como el flujo dejó un malecón lateral de viscosidad elevada y que se comportó como flujos con longitud de onda larga (megaondas) de unos 200 m. La fotografía de la izquierda es mirando aguas arriba mientras que la de la derecha es mirando aguas abajo.

et al. (1999) para lahares en los volcanes Ruapehu (Nueva Zelandia) y Mt. St. Helens (EE.UU), llamadas ondas de desplazamientos miscibles. Claramente, se observa como el flujo se va diluyendo lateral y longitudinalmente por incorporación de agua limpia, y con ello transformándose en un flujo hiperconcentrado cargado en troncos, arenas y barros (Fig. 10).

En las partes bajas en los alrededores de La Virgen, los depósitos preservados poseen espesores de 0,1-1 m de espesor, con grietas de desecación desarrolladas en las partes más arcillosas, y el depósito suele ser arenáceo con guijarros pero pocos finos, y abundantes evidencias de colisiones cataclásticas en los grandes bloques (Fig. 11).

Los flujos asociados con el terremoto de Cinchona poseen las típicas características de una corriente de lodo, que en la parte montañosa corresponden a un flujo de detritos o mejor caracterizado en su término en inglés como *debris flow*, constituido por $\geq 80\%$ de sedimento por peso, $\geq 60\%$ por volumen ($\leq 20\%$ agua), con finos del tipo arcilla del 5-7% por peso, por lo que dentro de la clasificación de los *debris flows* (Scott, 1988a, b). El autor prefiere en ciertos casos mejor utilizar los términos en inglés que los del español, dado que desgraciadamente en nuestro idioma no hay acuerdo en la terminología para ciertos mecanismos y sus depósitos, y se le suele llamar con el mismo nombre a eventos con génesis diferentes.), aún con ese bajo contenido de arcilla, se clasificarían como cohesivos.

Estos flujos tienen por característica el incrementar el volumen en un factor tan grande como 4 veces y son frecuentes en medios volcánicos con alteración hidrotermal y fuerte meteorización en regiones tropicales (Scott, 1988a,b; Pierson et al., 1990; Pierson, 1995). En áreas boscosas como la presente, los *debris flows* pueden contener hasta un 20% de árboles por volumen (Wilford & Schwab, 1982), hecho comprobado en los flujos de lodo acá estudiados.

Dado que se originaron en volcanes activos y dormidos (flancos del Poás, Votos, Von Frantzius, Barva y Congo), se pueden clasificar como lahares, aunque su disparador no fuese la actividad eruptiva (p.ej., Smith & Fritz, 1989).

Así, una vez que ha pasado el pie de monte, es decir después del puente cerca del cementerio de San Miguel de Sarapiquí, el flujo fue perdiendo espesor (tirante), debido no solo a la apertura del lecho mayor de inundación al llegar a la zona de terrazas y llanura de inundación aluvial, sino también por la incorporación de agua, lo que diluye el flujo transformándolo en un flujo hiperconcentrado, tal como se dijo previamente.

Ya a la altura del plantel del MOPT en Chilamate, el flujo se abrió en varios brazos, disminuyendo significativamente su velocidad, al grado que Puerto Viejo de Sarapiquí no fue afectado.

El flujo de lodo del 21 de enero, similar en sus aspectos al precedente, tuvo por particularidad que a la distancia se diluyó más por la incorporación



Fig. 6: Tronco de árbol con una bien definida línea de barro (*mud line*) indicando el nivel alcanzado por el flujo (izquierda) y bloques de ignimbrita (derecha) dejados por el flujo justo en la margen superior del dique de protección.

de agua, presentando los depósitos a la altura del poblado del Bosque de Sarapiquí, características de un flujo de debris hiperconcentrado, debido a la presencia de sedimentos laminados, granulométricamente mejor seleccionados (Fig. 12).

¿Fueron los flujos de lodos calientes o fríos?

Varias personas reportaron que los flujos que bajaron por la catarata de El Ángel, venían aparentemente calientes, y de igual modo muchas personas reportaron un vaho levantándose de los

flujos y la existencia de troncos quemados en los depósitos. Puesto que no existió ninguna actividad volcánica, no era plausible su relación a menos que se hubiesen quedado expuestos debido a deslizamientos algunos acuíferos geotermales. Sin embargo, aún esta posibilidad no explicaría que flujos volumétricamente importantes y procedentes de diferentes sectores, se mantuvieran calientes y mucho menos el quemar los troncos, para lo cual se requieren temperaturas superiores a los 300°C, situación que no se encuentra fácilmente en un acuífero geotermal superficial. En los sobrevuelos realizados en helicóptero, no se

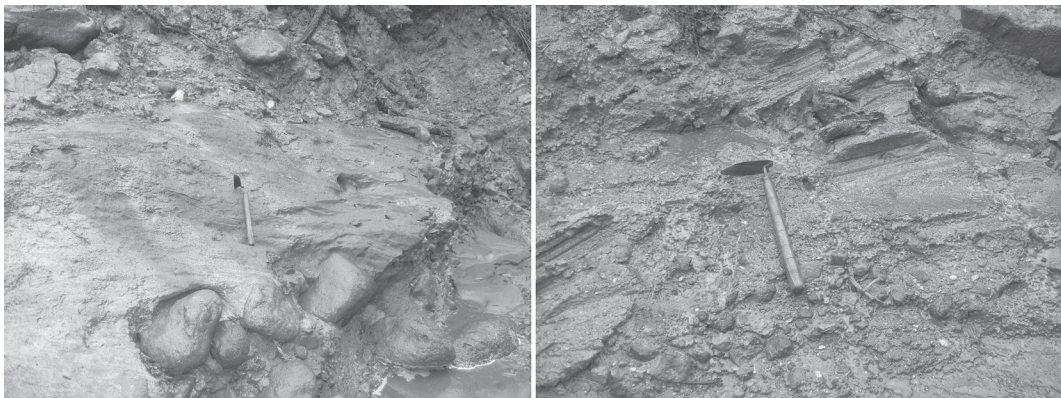


Fig. 7: Típicas estriaciones dejadas en sedimentos y rocas blandas por el flujo de lodo en la margen izquierda del río María Aguilar.



Fig. 8: Estructuras de impacto producidas por bloques al contacto con otros clastos de lava (Río Seco a la izquierda y Sarapiquí a la derecha).

observaron fumarolas en los sectores deslizados cercanos a los volcanes.

Analizando las evidencias fotográficas del flujo durante su transitar por Casa de Máquinas de Cariblanco, efectivamente se deja entrever un rocío de color rojizo que se eleva hasta una altura estimada de unos 60 m (Figs. 2 y 10). Dicho rocío se puede explicar simplemente por el levantamiento de una cortina de gotitas de agua con por sedimentos durante el transitar turbulento y con muchos impactos entre los bloques del flujo. Similar situación pero de menor magnitud, se observa en los videos captados cerca de La Virgen.

La existencia de supuesta madera quemada en la catarata del Ángel y otros ríos, de igual modo fue investigada (Fig. 13). En el río María Aguilar se evidenció que entre un 32 y un 38% de los troncos, ramas y algunas semillas eran de color negro, emulando carbón vegetal, pero su color negro a modo de pátina (1 mm espesor). Troncos similares se observaron pero en porcentaje reducido en el río Ángel. Sin embargo, al observarlo con detalle, se determinó que no corresponde con madera quemada en el sentido estricto dado que: a) no posee olor a quemado sino un olor azucarado tipo “carao” o similar, procedentes de compuestos aromáticos por putrefacción de la madera, b), las ramas pequeñas no se quiebran fácilmente sino que más bien son flexibles, indicador de que no están efectivamente carbonizadas, c) no tizna la mano como el carbón, d) en algunos sectores se presentan partes internas (fisuras cerradas) negras,

en donde no debería de haber llegado la combustión o la temperatura, e) algunos troncos emanan un líquido viscoso de color negro y olor similar al descrito, y f) no se encontraron chimeneas de desgasificación en los depósitos. Se concluye que dichos troncos corresponden con un tipo particular de vegetación boscosa (de ahí su característico olor aromático) muerta en diferentes estados de putrefacción, típica de todo bosque tropical lluvioso, en donde parte del dosel arbóreo cae e inicia el proceso, y que por causa del sismo, fueron arrasados junto con el bosque verde.

Análisis de los acelerogramas

A la altura de la Casa de Máquinas de Cariblanco, la estación acelerográfica ubicada en el edificio administrativo registró el evento de la avalancha con toda claridad, pese a que fue inundado el lugar en donde se encontraba ubicado por 0,3 m de lodo. El equipo y sus valiosos registros (tanto del terremoto como del flujo) fueron preservados dado que el instrumento es hermético. Los registros indican que la parte fuerte del flujo fue registrado de manera significativa por espacio de por lo menos 9 minutos, pese a que debió de continuar por varios minutos (unos 6 o más?), aunque ya el registro no es confiable. El flujo principal con base en el acelerograma, puede ser dividido en tres fases: a) La más fuerte por espacio de casi 1 minuto (41-57 s) entre las 1: 47 y 1: 48



Fig. 9: Vista panorámica de la morfología y tipo de depósitos dejados por la corriente de barro y su retrabajo posterior. Se observa la acumulación de troncos de árboles orientados según la dirección del flujo y reflujos, sectores con sedimentación de "finos", y los grandes bloques acumulados en enjambres (*coarse channel facies*) en el cauce del río Sarapiquí, por la entrada del cementerio de San Miguel)

p.m., que de acuerdo con los videos y fotografías, corresponde con el impacto y flujo principal con las instalaciones de la Casa de Máquinas, con una aceleración pico de $25,64 \text{ cm/s}^2$, pero en general se mantuvo en $16-19 \text{ cm/s}^2$, b) la segunda posee unos 2,3 minutos (133-155 s) correspondiendo con las oleadas y el reflujos observado entre las 1: 47:56' y 1: 48: 39' p.m. con aceleraciones pico de $13,94 \text{ cm/s}^2$, y finalmente c) la cola que se extendió igualmente por lo menos por 5 minutos, desde la 1: 48: 39' hasta casi las 1: 53: 30' p.m., con aceleraciones normalmente bajo los $10,79 \text{ cm/s}^2$. Claramente, el flujo debió de continuar por varios minutos o decenas de minutos, pero con un nivel más bajo y transportando fragmentos menores.

Los espectros de Fourier muestran dos picos en la frecuencia (Fig. 14): a los 7-8 y a los 37 Hz, al parecer en correspondencia con la respuesta natural del

suelo (7-8 Hz) y de una frecuencia mayor de causa desconocida, pero no relacionada con el flujo. Los flujos han de contener sus frecuencias en un rango amplio entre los 7 y los 37 Hz. Los lahares en volcán Colima poseen picos con frecuencias entre 6,3 y 7,6 Hz, en donde la mayor parte de la energía es interpretada como producto del transporte de la carga de fondo del lahar (Zobin et al., 2009), pero igualmente podrían ser una respuesta natural del suelo.

Velocidades estimadas

La velocidad de los flujos de lodo se estimó mediante 3 métodos distintos:

a) videos y fotografías con cronómetro de tiempo incluido (hora, minutos y segundos), y correlacionados con videos (p.ej. video tomado

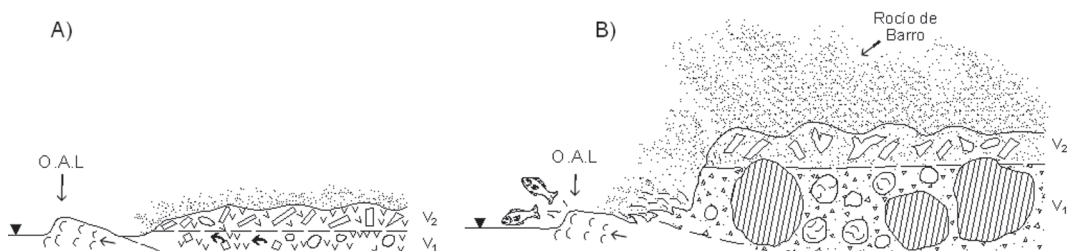


Fig. 10: Modelos esquemáticos que muestran al debris flow cerca de Casa de Máquinas (B) y su transformación en un flujo más hiperconcentrado cerca de La Virgen de Sarapiquí (A), aguas abajo. Se representan los dos niveles del flujo, uno inferior enriquecido en bloques por rodamiento y saltación (V1) y otro superior enriquecido en troncos y sedimentos finos con el rocío de lodo (V2), así como la ola de agua limpia al frente del flujo (O.A.L.), denominada onda de desplazamiento miscible, debido a la dispersión hidrodinámica y temporal inmiscibilidad.

Cuadro 2

Altura de los tirantes del flujo estimadas en diversos sectores (Fig. 3)

| Lugar | Numero de la localidad | Altura del tirante (m) |
|--|------------------------|------------------------|
| Puente sobre el río Seco | 3 | 30-35 |
| Puente sobre el Río Ángel | 1 | 17-35 |
| Puente María Aguilar, camino Laguna Hule | 2 | 2-16 |
| Casa de Máquinas, Río Sarapiquí | 4 | 12 |
| Por Cementerio San Miguel | 5 | 6-7 |
| Barrio El Bosque, Las Lomas de La Virgen | 6 | 3-4 |
| Puente por La Virgen (estación 12-22) | 7 | 4,81 |
| Bajos de Chilamate (Estación 12-25) | 8 | 3,31 |
| Chilamate | 9 | 1,5 |
| Puente carretera Pto. Viejo | Fuera del mapa | 1 |

por Vinicio Herrera Araya y las fotografías por Gustavo Hernández), teniendo por ejemplo algunos puntos de referencia y los planos de la Casa de Máquinas. También, se entrevistaron a las personas para anotar sus percepciones temporales. En otros videos de los aficionados (Cuadro 2), se estimó la distancia entre un punto y otro del cauce del río Sarapiquí, para lo cual se entrevistó a quienes lo tomaron, dado que muchos puntos de referencia en los videos cambiaron con el transitar del flujo.

b) altura del flujo ascendiendo contra pendiente o diferencias de nivel del tirante en ambas márgenes en sectores curvados de los ríos, siguiendo las metodologías de Chow (1959).

c) mediante la estimación de la longitud de onda de las antidunas (cf. Simons & Richardson, 1963).

Se dice que aproximadamente unos 15-20 minutos después del terremoto, pasaron las “cabezas de agua” por el puente sobre el río Ángel a la altura de la Cuesta Ángel. El arribo del frente de la crecida sobre el río Sarapiquí se reportó en Casa de Máquinas de Cariblanco aproximadamente las 1: 46' 25" p.m., es decir 25 minutos después del terremoto, a una distancia de unos 8-10 km de las áreas más afectadas, particularmente cerca de Cinchona y volcán Congo. Ello nos trae una velocidad promedio de entre 19,2 y

24 km/h. El flujo fue observado desde Casa de Máquinas, ubicada en el pie de monte y donde ya existe un cambio hidráulico en el río, impactando y arrasando una isla fluvial a las 1: 46: 44' p.m. La Casa de Máquinas debió de ser alcanzada aproximadamente a la 1: 47 p.m. y finalmente el flujo impactó al entubamiento de la quebrada Marín a las 1: 47: 24' p.m.. Esto nos da una velocidad de entre 17,5 y 22,5 km/h. Velocidades similares se obtienen a la hora de estimar la longitud de onda de las antidunas en la parte central del flujo.

La velocidad estimada del flujo a lo largo de las instalaciones de Casa de Máquinas y alrededores se estimó entre 6,1 y 11,7 km/h, siendo la velocidad más precisa la de 9,6 km/h, con el uso del video y las fotografías. Claramente se nota un decaimiento en la velocidad debido a ser un flujo lateral y al haber tenido que saltar el dique de protección. En efecto, el dique de contención al pie de la Casa de Maquinas promovió a que el *debris flow* sufriera un salto hidráulico, marcando una transición de un flujo turbulento supercrítico a un flujo turbulento subcrítico, dando como resultado un flujo de régimen hidráulico tranquilo en su transitar hacia la obra, sin provocar ningún daño estructural, tan solo electro-mecánico debido a la sedimentación y los impactos de los troncos de árboles sobre la maquinaria.

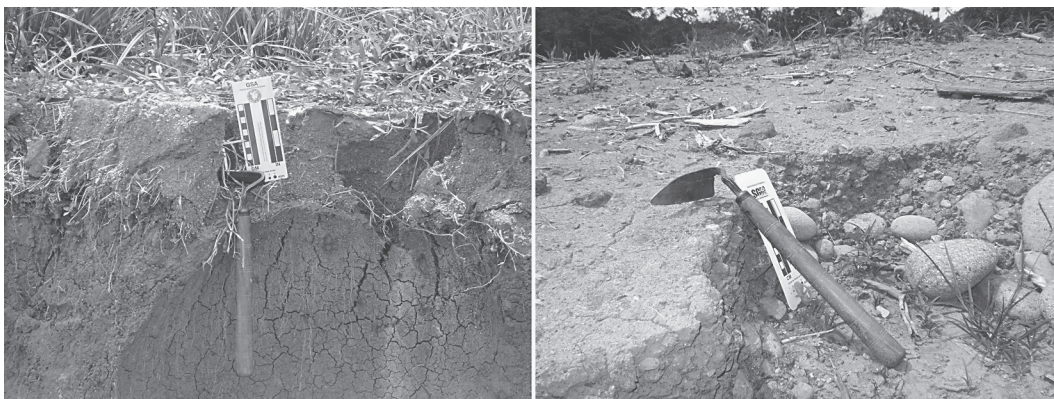


Fig. 11: Delgado manto de arenas y de gravas (unos 15 cm sobre el suelo y vegetación pre-evento) con una cobertura centimétrica de lodo, con grietas de desecación (no visibles en las fotografías), testigos menores de los grandes flujos hiperconcentrados dejados por el evento del 8 de enero a la altura de Lomas de La Virgen.

El flujo se estima que debió de tener en las instalaciones un número de Froude de 0,48-0,84, típico de un flujo subcrítico, pero previo a su arribo, a la salida de la garganta del Sarapiquí, debió de haber tenido un número de Froude superior a la unidad, típico de flujos supercríticos, particularmente en la parte central del flujo (Fig. 15).

Se utilizaron 5 videos de aficionados tomados en el río Sarapiquí en (Cuadro 3): a) Casa de Máquinas de Cariblanco, b) el mirador de la Hacienda Pozo Azul cerca de La Virgen, c) Terraza Restaurante Hacienda Pozo Azul, d) Puente Colgante de Tirimbina, y e) Bajos de Chilamate, tres de ellos fueron puestos por un tiempo en la

página web “youtube”. Mediante entrevistas a las personas involucradas en los videos, medidas en el campo de puntos de referencia y su comparación con el cronómetro (tiempo en segundos en el filme), se permitieron hacer estimaciones sobre las velocidades in situ en cada lugar.

Para determinar las velocidades promedios también se utilizaron las localizaciones y los tiempos de arribo de las máximas crecidas a las estaciones pluviográficas del ICE que sobrevivieron a los flujos del 8 de enero, teniendo como tiempo origen el de Casa de Máquinas (13: 47 p.m.): Puente la Virgen (estación 12-22) a las 14:25 p.m. y Bajos de Chilamate (estación 12-



Fig. 12: Vista panorámica y de detalle de los depósitos dejados por la el flujo del 8 de enero, retrabajados por la crecida del 21 de enero por la madrugada. Obsérvese que los troncos están dispuestos perpendicular al flujo y que los sedimentos son más gravosos y con laminación paralela, típicos de flujos de debris hiperconcentrados.

Cuadro 3

Principales videos utilizados en el presente trabajo para obtener datos sobre el flujo del 8 de enero y sus velocidades (Fig. 3)

| Lugar | Cortesía | Duración | Aspectos generales |
|--|---|----------|--|
| Casa de Máquinas de Cariblanco | Vinicio Herrera | 04':03" | Tomado desde el camino de acceso de la Casa de Máquinas de Cariblanco. Se aprecia el frente del flujo, el rocío de barro y sus efectos sobre las obras |
| Lomas, 8,5 km al sur de San Miguel ó 2,9 km al sur de la iglesia católica de La Virgen | Gabriel Carvajal Gonzáles (2761-1545, 8346-4885) | 6':15" | Se observa el flujo venir a la distancia y las aves así como el ganado huyendo, para finalmente perecer 34 de 37 cabezas de ganado. Se observa el frente de onda de agua limpia |
| Terraza Restaurante Hacienda Pozo Azul | Esteban Corrales Rodríguez | 3':15" | Se observan las aves escapar y el frente de onda de agua limpia |
| Puente Colgante de Tirimbina, 1,8 km norte de cementerio de La Virgen. | Ronald Hernández Pereira (8835-8919, 2761-1111, 2711-1160) | 18':05" | Se observa como un frente bajo del flujo cargado de troncos, muy enriquecido en agua, transitar por un brazo del río (isla) en donde se describe el olor a barro y una vaca siendo acarreada |
| Aventuras Sarapiquí, a 1,3 km al este de Chilamate | Ryan Gillum (2766-6768) | 4':35" | Vídeo editado en donde se observa la lenta llegada del flujo y sus efectos sobre los peces y varias tomas del día siguiente, en donde el río aun corría cargado de sedimentos |

25) a las 15: 05 p.m. (Cuadro 4). El flujo llegó a las Lomas a las 14: 05 h.

En el río Seco se observó un impresionante flujo de lodo en el punto donde discurre por el puente que comunicaba Colonia Toro con Bajos del Toro (Fig. 16). El flujo provino de una serie de deslizamientos de las paredes internas del volcán derruido del Congo, a una distancia de 3 km y al parecer unos 5 minutos después del terremoto se escuchó un gran ruido (descrito como el de un avión despegando por el personal del Campamento de Toro 3, Colonia del Toro) y que del Congo se levantaba un poco de "polvo" (rocío de barro?). Aproximadamente unos 5 minutos adicionales (10 después del terremoto) se le observó pasar tempestivamente el flujo de lodo arrasando el puente sobre el río Seco. El cauce era de unos 20-40 m de ancho por unos 5 de profundidad, pero ahora quedó algo más ancho y más profundo, aunque no se dispone de datos comparativos por el momento. La duración del flujo de lodo y su recorrido nos trae una velocidad promedio de 36 km/h si tomamos unos 10 minutos de tiempo. Sin embargo, al calcular el rebase del flujo y sus diferencias de elevación, se determinaron velocidades entre de

19,5 y 29,5, para un promedio de 24,9 km/h. No obstante, se dice que velocidades así estimadas, suelen ser aproximadamente un 15% inferiores a las medidas en casos reales, lo que nos traería una velocidad máxima de casi 34 km/h, muy similar a la estimada.

El río María Aguilar está formado por la confluencia de dos quebradas, una que nace en el interior del cono derruido del Congo y otra que bordea al volcán, y del mismo modo, los flujos que bajaron por ella ampliaron su cauce. Otros flujos de lodo menores pero igualmente energéticos, fueron observados y filmados (E. Garita y É. Loaiza, com. escrita, 2009).

El flujo de lodo que bajó por el río Ángel el 21 de enero, aunque posiblemente de elevada velocidad inicial y energía, después se diluyó por la incorporación de agua de los afluentes y muy probablemente su velocidad disminuyó. De hecho, entre el puente arrasado sobre el Ángel (aprox. 4: 30 ó 5: 00 a.m.) y el poblado El Bosque (aprox. 9: 30 a.m.), el flujo tardó entre 4,5 y 5 horas para recorrer una distancia aproximada de 14 km.

Como vemos, con toda certeza el flujo debió de tener velocidades de unos 25 km/h en general,



Fig. 13: Troncos pseudo-quemados presentes en el río María Aguilar. Corresponden con troncos en estado de putrefacción. Obsérvese en la fotografía de la derecha, como el tronco emanaba aún líquidos viscosos (savia) varias semanas después de su transporte y sedimentación. Además, no todos los troncos son negros.

aunque debieron de ser significativamente más altas en la cuencas superiores, donde las pendientes son mayores, pudiendo alcanzar velocidades de entre los 40 y los 50 km/h, y más bajas en la llanura de inundación y terrazas, del orden de 8-12 km/h e incluso menos en Puerto Viejo de Sarapiquí.

Estas velocidades son típicas en los diferentes *debris flows* históricos a nivel mundial, en donde sus velocidades suelen ser de 5-15 m/s (18-54 km/h), siendo común las de 40 m/s (144 km/h) para los grandes eventos, con un máximo reportado de 72 m/s (260 km/h) según la literatura especializada (Scott, 1988a, b; Pierson et al., 1990; Pierson, 1995; y referencias en ellos citados).

Cálculo del volumen y caudal

El cauce del Sarapiquí y sus tributarios, así como el río Seco, tributario del Toro, se ensancharon y profundizaron en varios sectores, indicando que se erosionaron y tomaron parte de los sedimentos de su lecho fluvial, aunado al regolito y árboles de las laderas del cauce durante su crecida, al exceder su tirante normal de agua.

La estimación del caudal, volumen del flujo y sus sedimentos depositados es crucial para la comparación entre eventos en otros lugares y para una concepción de su magnitud como evento hidrológico o inclusive geohidrológico. Sin embargo, en el presente caso, la estimación de

estos datos resulta en extremo difícil dado que: a) muchos sectores son topográficamente de difícil acceso, b) el peligro de nuevas avenidas, c) la constante erosión y re-depositación de nuevos eventos de magnitudes menores, d) lo difícil de tener un estimado del espesor de sedimentos, e) gran parte de las estaciones hidrológicas fueron destruidas y f) otros trabajos fueron considerados prioritarios ante la emergencia, por lo que mejores estimaciones y medidas no se obtendrán hasta mucho tiempo después del evento principal.

Claramente, el flujo de lodo estuvo constituido por dos fases principales: a) la líquida representada por agua y b) la sólida, constituida de sedimentos (bloques de rocas hasta arcillas), detritos biológicos (troncos, ramas, hojas, ganado, peces) y objetos culturales o antrópicos (puentes, vehículos, etc.). Gran parte del agua y los sedimentos finos fueron a parar a la confluencia del Sarapiquí con el Puerto Viejo. En tan solo dos lugares los flujos no destruyeron las estaciones hidrológicas y se pudieron allí medir los tirantes y con ello hacer una estimación grosera y preliminar del caudal: La Virgen con 442 m³/s y Bajos de Chilamate con 533 m³/s (S. Laporte, com. escrita, 2009).

De los registros acelerográficos en Casa de Máquinas, se establece que el flujo de lodo tuvo su mayor fase por espacio de 9 minutos, y puesto que tenemos una sección del cauce y su velocidad, se puede estimar no solo el caudal sino también el volumen de sedimentos transportados en ese lapso. Teniendo un cauce con un ancho de 75 m, un

Cuadro 4

Velocidades del flujo de lodo del 8 de enero estimadas en diversos sectores (Fig. 3)

| Lugar | Velocidad promedio m/s *(km/h) | Velocidad estimada in situ m/s (km/h) |
|---|-----------------------------------|--|
| Puente sobre río Ángel | 6,66 (24,0) | 13,3 (48,0) |
| Puente María Aguilar, camino Laguna Hule | | 6,2-7,6 (22,5-27,6) |
| Puente sobre el río Seco | 10 (36,0) | 5,4-8,19: 6,9 (19,5-29,5: 24,9) |
| Casa de Máquinas Cariblanco, Río Sarapiquí | 5,3-6,6 (19,2-24,0) | 4,8-6,2 (17,5-22,5) |
| Flujo a través de la Casa de Máquinas de Cariblanco y otras instalaciones | - | 1,6-3,2 (6,1-11,7) |
| Lomas (2,9 km al sur del restaurante Hacienda Pozo Azul) | 6,59 (23,72) | 5,7-8,4 (20,5-30,4) |
| Restaurante Hacienda Pozo Azul | | 7,1-10,0 (25,7-36,0) |
| Puente Colgante Tirimbina | | 6,6-9,7 (23,9-35,1) |
| Bajo de Chilamate | 2,5 (9,0) | |
| Chilamate | | 2-3 (7,2-10,8) |
| Flujo de lodo del 21 de enero | 0,7-0,8 (2,8-3,1) | |

*Desde el punto de origen o entre dos puntos distantes con tiempos conocidos

tirante de 12 m, y una velocidad estimada entre 4,86 m/s (mínima) y 6,66 m/s (máxima), tendríamos un caudal de entre 4374 y 5994 m³/s. Puesto que el evento se extendió por al menos 9 minutos, entonces el volumen del flujo (agua + sedimentos) groseramente se puede estimar entre 2,36 y 3,23 x 10⁶ m³. Si a ello le agregamos los 6 minutos que restantes de fase tranquila y de posible menor velocidad y tirante, se le podrían agregar un mínimo de unos 200 000 m³ de sedimentos saturados, para un volumen de 2,46-3,43 x 10⁶ m³. Es claro que el río continuó transportando sedimentos por varios días. En Casa de Máquinas y alrededores, sobre el dique de protección, en algún momento antes del retrodrenaje o retirada, el flujo debió de alcanzar un volumen total en las instalaciones de al menos 4600 m³/s.

Al volumen anterior, todavía debe de agregársele el volumen de sedimentos saturados

transportado por el río Seco (procedente del volcán Congo) y el río Mastate y la quebrada Tigre (procedentes del volcán Votos), que al confluir se llaman río Poasito, todos ellos de difícil estimación. Puesto que los flujos se originaron a unos 2000 m de elevación y se detectaron a la altura del puente cerca del cementerio de San Miguel todavía como facies de *debris flow* con un tirante importante, el coeficiente de fricción aparente (*fahrböschung*) sería de 0,09 y de 0,06 para los flujos de debris y los hiperconcentrados, respectivamente. Si utilizáramos esta información con base en las relaciones obtenidas por Devoli et al. (2009), este volumen de 10⁶ m³ sería el mínimo pero podría ser tan alto como dos órdenes de magnitud más.

Las descargas pico del Sarapiquí para este evento se encuentran dentro de los rangos para otros eventos históricos a nivel mundial que

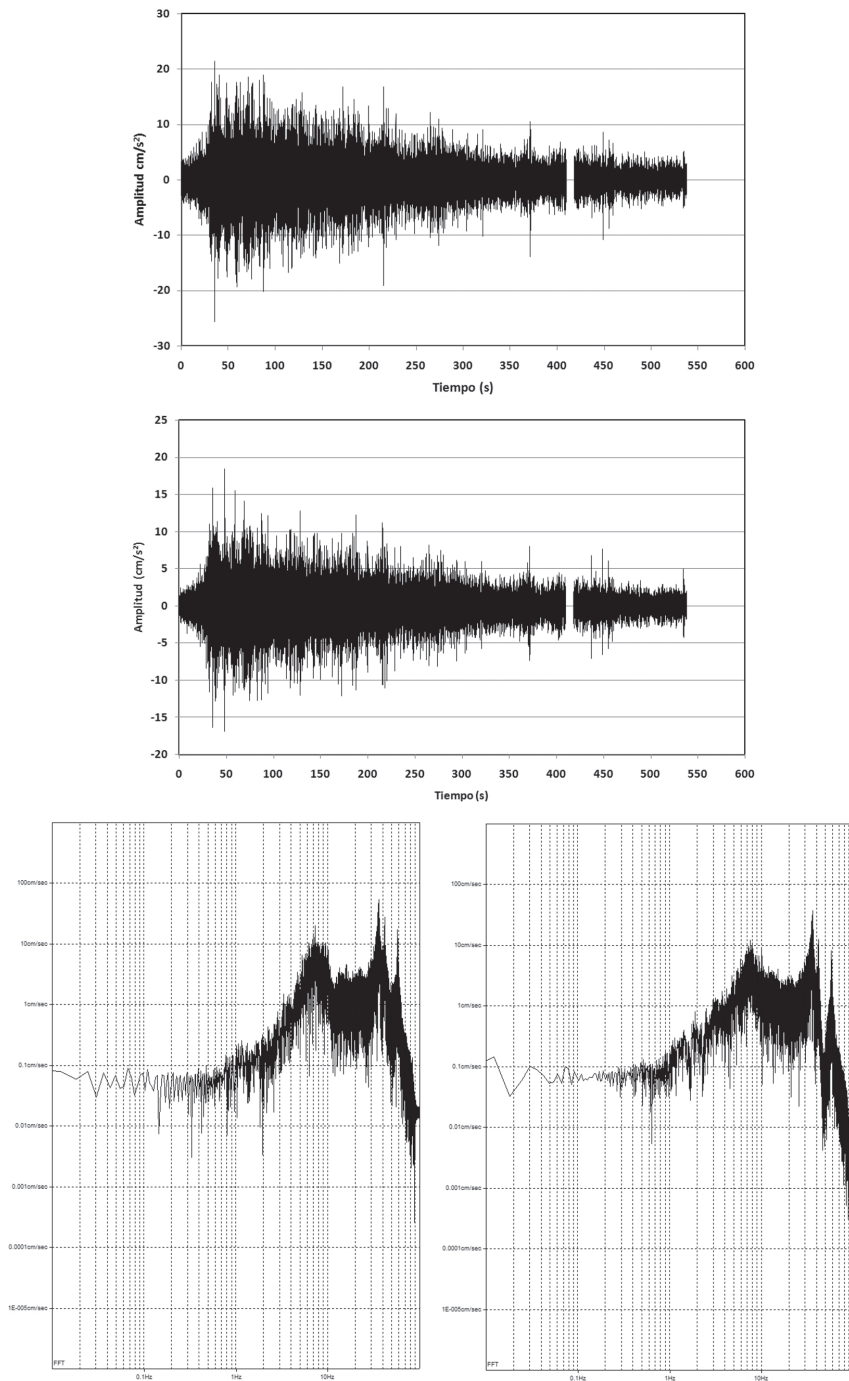


Fig. 14: Las señales acelerográficas (arriba) y sus respectivos espectros de Fourier (abajo) registradas en el acelerógrafo localizado en el edificio administrativo de la Casa de Máquinas de Cariblanco, que sobrevivió pese a ser cubierto de lodo. La primera corresponde con la componente N-S y a la segunda con la E-W. Los espectros (N-S y E-W a la izquierda y derecha, respectivamente). El pico a los 59 Hz es producto de una inducción eléctrica. La escala horizontal es logarítmica iniciando el primer número en 0,1 Hz y la vertical tiene un máximo de 100 cm/s.



Fig. 15: El flujo transitando por la Casa de Máquinas y otras instalaciones de Cariblanco. Se observa en el cauce del río las antidunas (régimen supercrítico) y la parte tranquila del flujo (subcrítico) señalada con la flecha, así como las oleadas en la puerta principal de la Casa de Máquinas (Fotografía de G. Hernández, a las 13: 47 h del 8 de enero, 2009).

suelen estar entre 71 y 48 000 m³/s (Scott, 1988a, b; Pierson, et al., 1990; Pierson, 1995, y referencias citadas en ellos).

El mecanismo disparador y de transporte

Claramente, el mecanismo disparador fue el evento sísmico que con su sacudida, desestabilizó los terrenos volcánicos en un medio tropical lluvioso, rico en suelos volcánicos, tanto antiguos como recientes, y laderas de fuerte pendiente, incluso verticales. Sin embargo, una pregunta particularmente surge entre los diferentes testigos e investigadores y es: ¿de dónde provenía tal cantidad de agua de estos flujos si los ríos no tenían un caudal importante al momento del terremoto? La respuesta más común es pensar en la existencia de taponamientos o represamientos debido a deslizamientos durante

el terremoto o provenientes de deslizamientos durante el sismo premonitor (7 de enero, M= 4,7). Sin embargo, varios aspectos apuntan a que esta no fue la causa:

a) Los guías de turismo de aventura (p.ej. *rafting*, *canopy*, etc.) y otros testigos describen que los ríos no bajaron de manera evidente su caudal producto de un eventual represamiento durante el terremoto o por el sismo premonitor (M 4,7), y las personas no reportaron deslizamientos asociados con el sismo premonitor. Aunque sismos con magnitudes del orden del evento premonitor (M 3,7-4,7), suelen disparar deslizamientos menores, estos suelen ser muy pequeños y no lo suficientemente grandes para represar ríos.

b) Las crecidas acontecieron pocos minutos después del sismo principal, reportadas por testigos a cierta distancia de la fuente de origen entre 5 y 15 minutos después del terremoto, por lo que

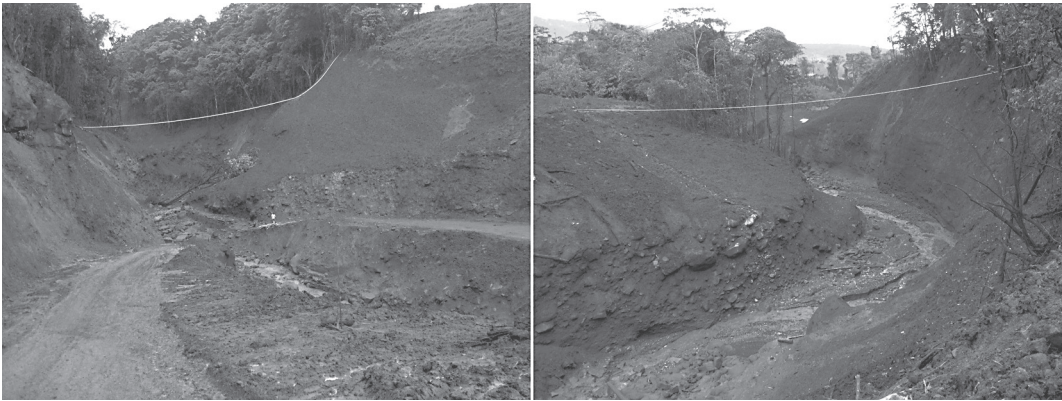


Fig. 16: El río Seco mirando aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha). Se observa la altura alcanzada por el tirante de barro (30-35 m) y su forma de megaonda.

un represamiento y su ruptura no da tiempo suficiente para formar un embalse natural importante con su rompimiento en un lapso tan corto.

En general, existe una idea muy arraigada a modo de “leyenda urbana” dentro de la población e incluso el gremio profesional (ingenieril y geológico) de que los represamientos producto de deslizamientos son los responsables de casi todas las crecidas. Aunque no se excluye esta posibilidad, muchos casos nos indican que son las fuertes lluvias y/o los repentinos deslizamientos saturados sobre los ríos, los que disparan las avalanchas de agua y escombros, tal y como se demostró en el caso del Irazú, contra la opinión popular muy arraigada (ver Alvarado & Schmincke, 1994), y en muchos otros casos históricos más recientes como los deslizamientos de Arancibia (Alvarado

et al., 2004) o de Orosi. Es más, durante el famoso deslizamiento del río Toro en 1992, que sí formó un embalse natural ($3 \times 10^5 \text{ m}^3$), contrario a lo esperado, se drenó lentamente sin generar una avalancha.

Por ello, la explicación más plausible y soportada con los datos de campo y laboratorio sería que:

a) El sismo disparó en regiones con pendientes superiores a los 26° e incluso verticales, una gran cantidad de deslizamientos constituidos por suelos volcánicos antiguos (tefras gruesas alternadas con tobas enriquecidas en arcillas con meteorización y alteración hidrotermal), que poseían grado importante de saturación, aunado a la cobertura vegetal y húmica. La información suministrada por el Ing. Sadí Laporte del ICE, indica que en noviembre y diciembre llovió en esa



Fig. 17: Típicos deslizamientos superficiales que dispararon en buena medida los flujos de lodo: Volcanes Congo (izquierda) y Von Frantzius (derecha).

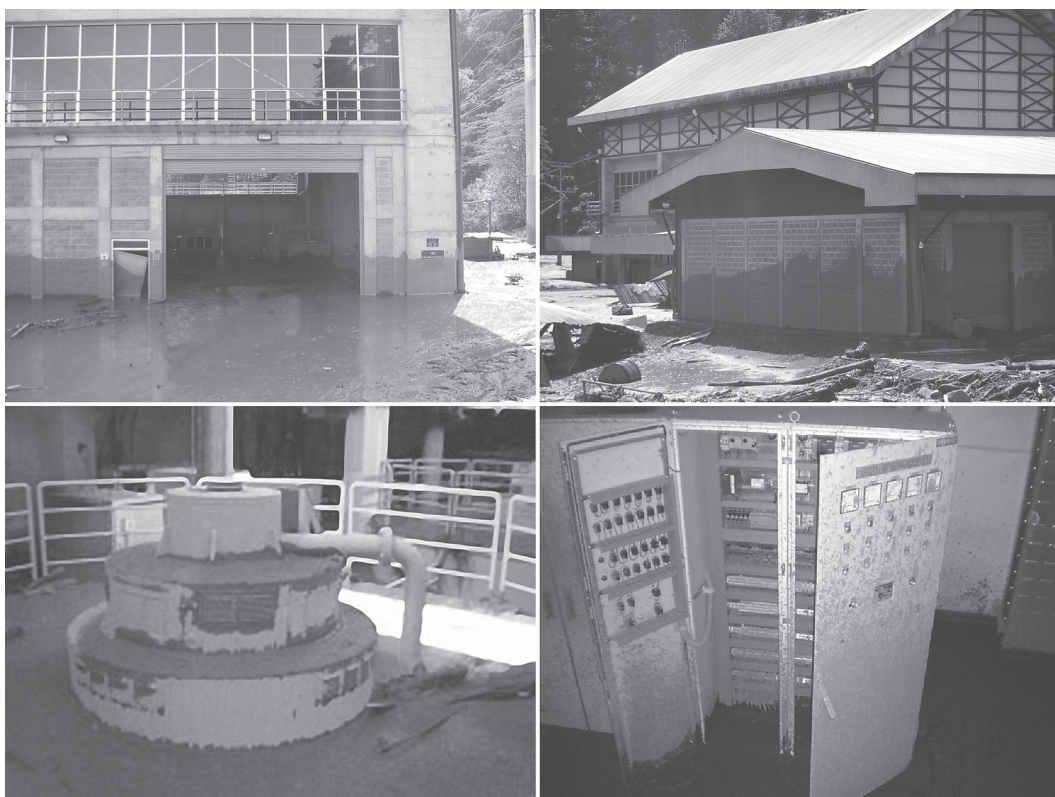


Fig. 18: Efectos despreciables de los flujos de barro sobre la infraestructura pero considerable en los equipos electromecánicos de la Casa de Máquinas de Cariblanco y edificios aledaños (Fotografías: G.J. Soto, arriba; y archivos ICE, abajo).

región por encima del promedio, aunque previo al evento se presentó una época seca. Estos suelos en parte saturados, con presiones intersticiales de importancia, se traducen en cierta medida en suelos altamente susceptibles a transformarse en fluidos viscosos. El comportamiento dinámico de estos suelos volcánicos, al poseer valores de límites líquidos sobre 100 y humedades similares, implican que los valores del índice de liquidez sean cercanos a la unidad con resistencia al corte prácticamente nula, lo que combinado con una reducción de las características mecánicas bajo condiciones dinámicas, producen que los limos se comporten como un flujo viscoso (ver Laporte, 2009a, b).

b) Durante su caída, el espesor de los deslizamientos se adelgazó con la distancia, una condición crítica y fundamental para pasar de un deslizamiento normal a un flujo (Ellen & Fleming,

1987). Adicionalmente, estos deslizamientos al momento de la sacudida sísmica, cayeron desde alturas de 200-300 m (caso del río Sarapiquí) o inclusive 500-600 m (caso del volcán Congo) sobre los ríos y quebradas, con una velocidad de llegada estimada desde su punto de inicio hasta el cauce en unos 15 m/s (basado en eventos similares). Los deslizamientos debieron de poseer cierta cantidad de agua intersticial (humedad en el suelo y agua libre en las rocas fracturadas), favoreciendo la rápida mezcla de agua fluvial con detritos (rocosos y orgánicos).

c) La energía cinética de los deslizamientos junto con su dilución por el agua de los ríos y quebradas, favoreció su movilidad. Es necesario tan solo un 20% de agua o incluso menos, para que un sedimento cargado en arcillas y limos así como detritos orgánicos, pueda convertirse sin ningún problema en un flujo, pudiendo alcanzar velocidades moderadas a elevadas.



Fig. 19: Efectos relativamente menores de los flujos de lodo sobre la presa del Sarapiquí (Fotografía: E. Campos).

d) Algunas personas reportaron “gran cantidad de agua que brotaban de las paredes de los cañones”. Al parecer, esta observación es válida dado que efectivamente si se pudo haber liberado grandes cantidades de agua de los acuíferos (varios en los cañones de 200-600 m), que quedaron descompresionados, favorecidos por el efecto de la onda sísmica, que debió de consolidar, deformar y limpiar las fracturas rellenas, favoreciendo la transmisibilidad del agua, situación que se ha llegado a detectar incluso a muchos kilómetros del área epicentral en función de la magnitud (ver Montgomery & Manga, 2003). A nivel nacional, previamente Vargas & Chaves (2002, 2005) mencionan que producto del sismo del 30 de julio del 2002 (M_w 6,2), se notó un notorio proceso de recuperación en todos los piezómetros a pesar de estarse realizando una prueba de bombeo. J. Barrantes (com. escrita, 2009, 2010) por su parte, menciona que relacionado con el

terremoto de Cinchona, los acuíferos libres y confinados en Casa de Máquinas de Toro 3 y el acueducto de Marsella, se abatieron aproximadamente 1,5 m inmediatamente después del sismo, y las tomas termales y frías de Recreo Verde en Marsella aumentaron su caudal. Los niveles piezométricos en la Casa de Máquinas de Toro 3, incluso continuaron descendiendo después del terremoto entre 2 y 5,5 m.

Por ello, la mejor explicación para la relativa fluidez aparente de los flujos de lodo y su elevado grado de destrucción, es que tan solo se requiere de un 20% de agua para movilizarlos, y que ésta provenía de la sumatoria de los 3 factores: suelos saturados, colapso y compresión de acuíferos y el aporte de las aguas de los ríos. Aunado a ello, se tiene la energía cinética de los deslizamientos en sus caídas de 200-600 m de altura, todo ello favoreciendo la rápida y mezcla homogénea de agua, suelo, rocas y detritos vegetal.



Fig. 20: A la izquierda se pueden observar los efectos dejados por el flujo del 8 de enero en la caseta de un andarivel y las retorceduras de los postes de acero. A la derecha, el Puente "Bailey" arrasado unos 75 m por el flujo del río Ángel del 21 de enero de 2009.

Aspectos generales sobre los efectos

Los efectos de los flujos de lodo se pueden resumir en: a) destrucción de los puentes sobre los ríos Seco, María Aguilar, Ángel, La Paz y dos en el río Sarapiquí, b) muerte de al menos unas 40 cabezas de ganado y toda la fauna fluvial, así como la destrucción de pastizales, c) afectación a equipos electromecánicos y otros, particularmente a la Planta Cariblanco y toma María Aguilar, d) afectación de la parte superior (cresta) de la presa del Sarapiquí, y e) la muerte de una persona.

La existencia del dique en la Casa de Máquinas, previno a que la carga de fondo del flujo afectara la estructura de la obra, dado que sin él habría sido arrasada. Otro efecto fue el que al llegar el flujo justo a Casa de Máquinas, se dio una apertura hacia un valle más abierto. En efecto, de la Cuadro 5 se desprende que las instalaciones de la Casa de Máquinas de Cariblanco y edificios vecinos, estaban bien diseñadas y que quizás la velocidad del flujo debió de ser inferior a los 2 m/s durante su recorrido por las obras (Fig. 18). La presa sobre el Sarapiquí fue afectada por la erosión parcial de su cresta y el llenado de sedimentos en el embalse, pero soportó muy bien el embate sísmico y del flujo (Fig. 19).

De igual modo, se nota a otra escala, como una caseta de blocks cerca de un andarivel sobrevivió en cierto modo a la empalizada de árboles transportado por el flujo, pero de igual modo, la terraza aluvial inferior impidió que el río acarrea-

ra grandes bloques de la carga de fondo y la destruyeran. El nivel del agua en la caseta fue de un metro aproximadamente (Fig. 20).

Una crecida sobre el río Ángel arrasó un puente provisional, que fue puesto para no mantener incomunicadas a las personas y sus producción local, aspecto que generó mucha controversia en la prensa y algunas personas fuera del área mesosísmica (Fig. 20).

DISCUSIÓN

En la literatura especializada, existen gran cantidad de referencias a nivel mundial (p.ej. Keefer & Wilson, 1989) e inclusive a nivel centroamericano (Bommer & Rodríguez, 2002; Rodríguez, 2007; Devoli et al., 2009) y costarricense (Mora & Morales, 1986, 1992; Mora & Mora, 1994), en donde se establecen las relaciones entre la magnitud de los sismos, el área afectada, el área desplazada, y la generación de corrientes de barro, entre otras cosas. En Costa Rica, los deslizamientos y corrientes de lodo importantes se han generado a partir de sismos con magnitudes $> 5,2$ (Mora & Mora, 1994). Según dicho trabajo, los deslizamientos disparados por sismos con IMM VII pueden ocasionar que en un área de 90 km² aparezcan al menos un deslizamiento por km² (área de la destrucción de alrededor del 60%). Para una magnitud de 6,2 como la del terremoto de Cinchona, el área afectada $> 60\%$ según las relaciones de Mora & Mora (1994) sería

Cuadro 5

Comparación modificada entre las condiciones de inundación y daños en Masonry (EE.UU, Penning-Roswell et al., 1992) y Suiza (Wieland & Mueller, 2009) versus las instalaciones de Casa de Máquinas de Cariblanco

| Velocidad (m/s) | Velocidad x profundidad (m ² /s) | Resultado |
|-----------------|---|---|
| < 1 | ≤ 0,5 (h ≤ 0,5 m) | Solo daños menores por inundación |
| 0,5-0,9 | 1 ≥ v x h > 0,5 (1 ≥ h > 0,5 m) | Daño moderado por inundación, particularmente para vehículos y personas acampando |
| 1-1,9 | 2 ≥ v x h > 1 (2 ≥ h > 1 m) | Daño intermedio por inundación para vehículos, personas dentro de edificios y acampando |
| 1-1,9 | 3 ≥ v x h > 2 (h > 2 m) | Daño elevado inclusive dentro de edificios, trenes y autobuses |
| > 2 | 3-7 (3,5 m ≥ h > 1,5 m) | Falla parcial |
| > 2 | > 7 (7 m ≥ h > 1,5 m) | Colapso estructural |
| 1,69-2,6 (3,2) | ≥ 1,69-6,75 (4 m ≥ h ≥ 1 m) | Solo daño por inundación en C.M. Cariblanco y obras vecinas |

de unos 200 km². Esta área es coincidente con los datos preliminares aportados por la RSN, para un total de al menos 349 deslizamientos de diversos tañamos, contabilizando un área total de 21,7 km² de material completamente deslizado (Fig. 1).

Los flujos de lodo asociados con el terremoto de Cinchona, estaban contemplados por los profesionales del Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica del ICE dentro de los eventos en extremo probables de ocurrir, inclusive durante el período de vida de la obra. Lo que sí era difícil de prever era su magnitud aunque se podría estimar con base en los trabajos previamente citados. Ahora está en claro que deslizamientos y avenidas recientes asociados o no con terremotos, son más frecuentes de lo que se esperaría, y que por lo tanto deben de ser considerados y adecuadamente evaluados dentro de los estudios de peligros geológicos.

Estos flujos nos dejan como enseñanza adicional, la explicación de por qué los cauces de ciertos ríos con poco caudal (inclusive con el atributo de “Seco”), suelen ser profundos y encañonados, indicadores de la fuerte erosión vertical durante eventos “fortuitos” de *debris flows* en el pasado geológico reciente. De igual modo, tal y como se reportó para el Irazú, los eventos suelen

no preservarse o sus espesores son profundamente reducidos debido a erosión posterior y a la compactación, dando una falsa estimación (subestimación o no consideración) de la magnitud de los eventos en sí cuando son evaluados en el registro geológico prehistórico. En adición, se desmiente en buena parte la leyenda urbana de que muchos de las “cabezadas de agua” son producto de represamientos y su posterior ruptura agua arriba.

Para futuros análisis de represas hidroeléctricas, diseño, alertas y planes de emergencia, se recomienda seguir no solo los aspectos acá contemplados, sino seguir en buena parte las pautas dadas por Wieland & Mueller (2009).

La cuenca del Sarapiquí, quedó alterada dado su gran número de deslizamientos que cayeron sobre el cauce principal, muchos otros todavía inestables, y los sedimentos que todavía existen sobre las laderas, claramente visibles en sobrevuelos. Aunado a ello, en esta cuenca se tiene gran cantidad de sedimentos aportados durante la reconstrucción parcial de la carretera Varablanca-Cariblanco. La cuenca como tal y como se indicó, quedó en condición alterada y tardará en recuperarse varios años.

De igual modo, otras cuencas en terrenos volcánicos con fallamiento potencialmente activo, como

la de los ríos Reventazón, Toro, Peñas Blancas y San Lorenzo, entre muchas otras, merecen la realización de estudios especializados de estabilidad de taludes y potencial de generación de flujos de barro. Merece llamar la atención a las autoridades de la CNE y municipales, que la ciudad de Aguas Zarcas está fundada sobre el gran abanico de deyección del río del mismo nombre, en donde se observan claramente diferentes grados de preservación y de meteorización, indicativo de múltiples eventos de *debris flows* de épocas prehistóricas hasta no muy antiguas, con gran probabilidad disparados por eventos telúricos similares, pero en este caso asociados con la falla Aguas Zarcas. El gran desarrollo habitacional en dicha ciudad merece una revisión y estudios preventorios, para que no se repita la historia, pero esta vez en un sector altamente poblado. Los estudios de amenazas naturales multidisciplinarios de las cuencas como un todo, son una necesidad imperante antes y durante las investigaciones de grandes proyectos de infraestructura (energética, industria y civil), y de líneas vitales.

Finalmente, y tan solo como un aspecto geomorfológico y de geología histórica científicamente interesante, en las imágenes de relieve digital y en comprobaciones de campo, se desprende que al parecer el río Sarapiquí alguna vez circuló por el actual cauce del río Sardinal, y que en algún momento, en el pasado geológico no muy distante, su curso cambió cauce actual. Evidencias de ello son la presencia de amplios valles abandonados y de una continuidad morfológica. La causa de por qué el río cambió al su curso hacia un nuevo cauce o inclusive el por qué el Sarapiquí cambia su rumbo casi perpendicular a la altura de Bajos de Chilamate, permanece todavía como tema abierto de discusión (Fig. 3).

AGRADECIMIENTOS

Un particular agradecimiento al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en particular la ayuda espontánea y desinteresada ofre-

cida por el personal del Centro de Producción Cariblanco, particularmente a Víctor Martínez Angulo, Gustavo Hernández Carvajal, así como diversas personas allí involucradas. Los geólogos Albán Rodríguez y Edwin Garita colaboraron con material fotográfico, filmico y experiencias propias del terremoto. El video del Sr. Vinicio Herrera en el preciso momento del flujo de lodo, ayudó a estimar mejor los tiempos al cotejar las fotos y sus tiempos suministradas por Gustavo Hernández. Otros videos tomados y/o cordialmente aportados por Gabriel Carvajal González, Ronald Hernández Pereira, Esteban Corrales Rodríguez, Johana Argüello M., Ángela M. Arroyo y Ryan Gillum, igualmente se utilizaron para comprender mejor los mecanismos del flujo y estimar las velocidades. La información hidrológica suministrada por Sadí Laporte (Centro de Servicios de Estudios Básicos de Ingeniería), así como información sobre los niveles de la avalancha en Casa de Máquinas de Cariblanco, y los ríos Ángel, María Aguilar, Sarapiquí y Quebrada Seca realizados por el Área de Topográfica fue igualmente incorporada y de gran valor. Los estudios de los sedimentos de la matriz del flujo fueron realizados por el Laboratorio Geotécnico del ICE, agradeciéndose en particular a los técnicos Antonio Torres y Fernando Quesada. Álvaro Climent y José M. Barrantes aportaron los valiosos datos del registro acelerográfico del flujo de lodo.

Los comentarios y colaboración de Joaquín Barrantes, Asdrúbal Vargas, Carlos Chaves, Andrea Borgia, Rafael Barquero, Erick Campos, Gerardo Soto y Alberto Vargas, fueron oportunos. El sobrevuelo en helicóptero fue posible a la ayuda de Luis Fernando Sáenz. Se incorporaron las observaciones de R. Mora y E. Badilla. Las discusiones e intercambio de información con el Dr. Thomas Pierson, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, fueron muy valiosas y estimulantes. Los asistentes R. Torres, M.E. Torres, R. Sánchez, A.E. Vargas, K. Thiele, D. Madrigal y R. Espinoza fueron de gran ayuda.

REFERENCIAS

- ALVARADO, G.E., 1988: Comentarios sobre las avalanchas en el río Toro, P.H. Toro II.- 8 págs + 2 planos. ICE, [Inf. Interno].
- ALVARADO, G.E., 2000: Los volcanes de Costa Rica: Su geología, historia y riqueza natural [2^{da} ed.].- 269 págs. EUNED, San José.
- ALVARADO, G.E. & CLIMENT, Á., 1985: Informe sísmológico para la etapa de avance a la factibilidad (P.H. Toro II).- 46 págs. + figuras, Anexo B., Departamento de Geología. [Inf. Interno].
- ALVARADO, G.E. & SCHMINCKE H.-U., 1994: Stratigraphic and Sedimentological aspects of the rain-triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica.- Zbl. Geol. Paläont., I, 1993 (1/2): 513-530; Stuttgart.
- ALVARADO, G.E., MORALES, L.D., MONTERO, W. CLIMENT, Á. & ROJAS W., 1988: Aspectos sísmológicos y morfotectónicos del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 9: 75-98.
- ALVARADO, G.E., SOTO, G.J., ZARATE, E. & ZELEDÓN, R., 1989: Evaluación del riesgo volcánico del Poás sobre las obras del P.H. Toro.- 44 págs. + figs., Dirección de Planificación Eléctrica, [Inf. Interno].
- ALVARADO, G.E., MORA, R. & PERALDO, G., 2003: The June 2000 Arancibia Debris Avalanche and Block-slide, Costa Rica.- Landslide News, 14/15: 29-32.
- AVÍLES, F., 2009: P.H. Cariblanco. Dique de protección a casa de máquinas. Memoria de cálculo.- 16 págs., ICE. [Inf. Interno]
- BARQUERO, R. (ed., 2009): El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009.-138 págs. Red Sísmológica Nacional, abril 2009. [Inf. Interno].
- BARRANTES, J., 2006: Estimación de la amenaza de represamiento en el río Sarapiquí para el análisis de vulnerabilidad en la Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco.- IX Seminario Nacional de Geotecnia, noviembre 2006 (documento digital).
- BARRANTES, J. & JARQUÍN, M.F., 2005: Amenaza de represamientos provocados por deslizamientos en las márgenes del río Sarapiquí en los alrededores de las obras del P.H. Cariblanco.- 60 págs. UEN Diseño. [Inf. Interno].
- BARQUERO, R., 1995: Proyecto hidroeléctrico Laguna Hule. Estudio sísmológico para la etapa de Factibilidad.-11 págs. ICE, OSV 95.09-ICE.[Inf. Interno].
- BARQUERO, R., 2000: P.H. Toro III. Estudio sísmológico etapa de Factibilidad. -10 págs., ICE, Exploración Subterránea. [Inf. Interno].
- BARQUERO, R. & CLIMENT, Á., 2002: P.H. Toro III: Estudio sísmológico y de amenaza sísmica etapa de Factibilidad.- 19 págs. ICE, Exploración Subterránea. [Inf. Interno]
- BARQUERO, R. & SOTO, G.J., 2003: Estudio de amenaza sísmica y volcánica para la subestación transformadora Cariblanco y su derivación a la línea alterna.- 17 págs. ICE, C.S. Exploración Subterránea. [Inf. Interno]
- BARQUERO, R., BOSCHINI, I. & ALVARADO, G., 2007: Estudio sísmo-tectónico para el P.H. Toro 3.- 58 págs. San José [Inf. Interno ICE].
- BOMMER J.J. & RODRÍGUEZ, C.E., 2002: Earthquake-induced landslides in Central America.- J. Eng. Geol., 63 (4): 89-220.

- CHINCHILLA, M., 2000: Estudio Mineralógico, Físico-Químico y Clasificación de los Suelos del Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco (Alajuela, Costa Rica).- 154 págs. Universidad Nacional, Heredia. [Tesis Lic.]
- CHOW, V.T., 1959: Open-Channel Hydraulics.- 680 págs., New York, McGraw-Hill.
- CLIMENT, Á., 1991: Algunos comentarios sobre la amenaza sísmica del P.H. Toro.- 11 págs. ICE, Depto. Geología. [Inf. Interno].
- CLIMENT, Á., BARQUERO, R. & ALVARADO, G.E., 2002: Estudio de amenaza Sísmica del P.H. Cariblanco.- 10 págs. ICE, Exploración Subterránea. [Inf. Interno].
- CLIMENT, Á., ALVARADO, G.E. & BOSCHINI, I., 2006: P.H. Toro 3: Estudio de Amenaza Sísmica.- 22 págs. ICE, [Inf. Interno].
- CRONIN, S.J., NEALL, V.E., LECOINTRE, J.A. & PALMER, A.S., 1999: Dynamic interactions between lahars and stream flow: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand.- Geol. Soc. Amer. Bull., 111: 28-38.
- DEVOLI, G., DE BLASIO, F.V., ELVERHOI, A. & HOEG, K., 2009: Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and Their Run-out Distance.- Geotech. Geol. Eng., 27: 23-42.
- ELLEN, S. D. & FLEMING, R.W., 1987: Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California.- En: J.E. COSTA & G. F. WIECZOREK (eds): Debris flows/avalanches: Process, recognition, and mitigation. Geol. Soc. Amer. Review in Eng. Geology, VII: 31-40.
- KEEFER, D. & WILSON, R., 1989: Predicting earthquakes-induced landslides with emphasis on arid and semiarid environments.- Publ. Inland Geol. Soc., 2: 118-149.
- LAPORTE, G., 2009a: Taludes y Sismos. Comportamiento dinámico de taludes durante el sismo de Cinchona y sus implicaciones al diseño geotécnico.- Bol. Geotécnico Notisuelos, 10: 6-7.
- LAPORTE, G., 2009b: Efectos de los sismos en el comportamiento de laderas naturales, cortes y rellenos: caso del sismo de Cinchona.- Memoria electrónica X Congreso Nacional de Geotecnia, V Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, 19-21 agosto, San José.
- MONTERO, W., SOTO, G.J., ALVARADO, G.E. & ROJAS, W., 2010: División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios de neotectónicos y de sismicidad histórica.- Rev. Geól. Amér. Central, 43: en este número.
- MONTGOMERY, D. & MANGA, M., 2003: Streamflow and Water Well Responses to Earthquakes.- Science, 300: 2047-2049.
- MORA, S. & MORALES, L.D., 1986: Los sismos como fuente generadora de deslizamientos y su influencia sobre la infraestructura y líneas vitales de Costa Rica.- Memoria 4º Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, San José: 201-214.
- MORA, R. & MORALES, L.D., 1992: La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en la zona norte de Alajuela y el terremoto de Fraijanes de 1888. Efectos y previsión.- Rev. Geográf. Amér. Central, 25-26: 311-322.
- MORA, S. & MORA, R., 1994: Los deslizamientos causados por el terremoto de Limón: Factores de control y comparación con otros eventos en Costa Rica.- Revista Geológica Amér. Central, volumen Especial Terremoto de Limón: 139-152.

- PENNING-ROWELL, E.C., TUNSTALL, S.M., TAPSELL, S.M. & PARKER, D.J., 2000: The Benefits of Flood Warning: Red but Elusive, and Politically Significant.- *J. Inst. Water and Environm. Man.*, 14: 7-14.
- PIERSON, T.C., 1995: Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 66: 283-294.
- PIERSON, T.C., JANDA, R.J., THOURET, J.C. & BORRERO, C.A., 1990: Perturbation and meeting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 41: 17-66.
- RODRÍGUEZ, C.E., 2002: Earthquake-induced landslide.- En: J. BUNDSCHUH & G.E. ALVARADO (eds.): *Central America: Geology, Resources and Hazards*.- Taylor & Francis, Londres, 2: 1217-1255.
- SAPPER, K., 1925: *Los volcanes de la América Central*. (El Libro del mes: 46 p.).- 144 págs. Halle (Saale), Max Niemeyer.
- SCOTT, K.M., 1988a: Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system.- 74 págs. USGS Prof. Paper, 1447-A.
- SCOTT, K.M., 1988b: Origins, behavior, and sedimentology of prehistoric catastrophic lahars at Mount St. Helens, Washington.- En: CLIFTON, H.E. (ed.): *Sedimentology consequences of convulsive geologic events*.- *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 229: 23-36.
- SIMONS, D.B. & RICHARDSON, E.V., 1963: Resistance to flow in alluvial channels.- 59 págs. USGS Professional Paper 422J.
- SMITH, G.A. & FRITZ, W.J., 1989: Volcanic influences on terrestrial sedimentation.- *Geol.* 17: 375-376.
- TRISTÁN, J.F., BIOLLEY, P. & COTS, C., 1912: The Sarchi Earthquake, Costa Rica.- *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2: 201-208.
- VARGAS, A. & CHAVES, C., 2002: Efectos del terremoto de Golfito del 30 de Julio de 2002 (Mw 6,2) sobre una prueba de bombeo en el acuífero confinado del sitio de presa del P.H. Pirris.- 18 págs. + 3 anexos, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Centro de Servicio Exploración Subterránea [Inf. Interno].
- VARGAS, A., & CHAVES, C., 2005: Efectos del terremoto de Golfito del 30 de Julio de 2002 (Mw 6,2) sobre una prueba de bombeo en el acuífero confinado del sitio de presa del P.H. Pirris.- *Acuíferos de Centroamérica. Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos en Centroamérica*. I Congreso Internacional. 7-11 Marzo 2005. Managua, Nicaragua: 31.
- VONFRANTIUZ, A., 1861: Beiträge zur Kenntniss der Vulkane Costa Ricas. Petermann's Geographische Mittheilungen.- Helt IX y Helt X, Gotha: Justus Perthes, 381-385 pp.
- WIELAND, M. & MUELLER, R., 2009: Dam safety, emergency action plans and water alarm systems.- *Int. Water & Dam Construction*, Enero 2009, www.waterpowermagazine.com.
- WILFORD, D.J. & SCHWAB J.W., 1982: Soil mass movements in the Rennell Sound area, Queen Charlotte Islands, British Columbia.- En: *Proceeding of the Canadian Hydrology Symposium*, 521-541.
- ZOBIN, V.M., PLASCENCIA, I., REYES, G. & NAVARRO, C., 2009: The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, México.- *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 179 (1-2): 157-167. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.001.