

EVIDENCIAS DE EROSION PROFUNDA DURANTE LOS FLUJOS TORRENCIALES DE DICIEMBRE DE 1999, EN EL ESTADO VARGAS, VENEZUELA

ING. DANIEL A. SALCEDO

Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela

ING. EDUARDO E. MARTINEZ

Universidad Central de Venezuela, Caracas.

RESUMEN: Con base en resultados de inspecciones detalladas a lo largo de la mayoría de las cuencas donde se generaron los flujos torrenciales catastróficos de Diciembre de 1999 en el Estado Vargas, se presentan evidencias de procesos erosivos importantes en diferentes cauces y del transporte de grandes bloques de roca durante el evento. La comparación de perfiles estratigráficos de los depósitos de dicho evento con los perfiles expuestos por los procesos erosivos, permitió interpretar la ocurrencia en el pasado de otros flujos torrenciales. En vista de las magnitudes tan extraordinarias de las socavaciones y erosiones observadas, y la capacidad que tuvieron los flujos torrenciales para transportar grandes bloques de roca, se presenta un análisis hidráulico del mismo, el cual permitió estimar sus propiedades.

1. INTRODUCCION

Los días 15 y 16 de Diciembre de 1999 una alta precipitación anómala sobre el Litoral Central y parte del Area Metropolitana de Caracas, originó lo que probablemente puede ser catalogado como el desastre más importante del siglo en nuestro país. Unos 70 kilómetros de Costa, desde Oricao hasta Los Caracas fueron afectados por numerosos deslizamientos y flujos torrenciales, reactivando varios conos de deyección ocupados por desarrollos urbanos. Algunas comunidades estaban construidas en áreas de muy alto riesgo y mucha gente quedó atrapada entre el material proveniente de deslizamientos de las laderas adyacentes y el flujo torrencial en frente de ellos.

Los daños mayores se concentraron en las siguientes cuencas, identificadas de Oeste a Este como Tacagua, Piedra Azul, Osorio, San José de Galipán, El Cojo, Punta de Mulatos, Camurí Chiquito, San Julián, Quebrada Seca, Cerro Grande, Carmen de Uria, Naiguatá y Camurí Grande. La Figura 1 muestra la ubicación de las cuencas mencionadas. Otras cuencas como las de Mamo, Anare, y Care, y en general toda la vialidad costera sufrió graves daños

El evento generó daños de toda naturaleza a viviendas unifamiliares, edificios multi-familiares, clubes privados, hospitales, escuelas, lugares turísticos, vías de comunicación, sistemas de abastecimiento de agua, torres de electricidad, etc.

En el área metropolitana de Caracas, tres quebradas de la vertiente Sur del Cerro El Avila, Catuche, Anauco y Tócome, también fueron afectadas por flujos torrenciales produciendo daños severos y un importante número de víctimas. La estimación preliminar del material movilizado por los flujos torrenciales es del orden de 20 millones de metros cúbicos. El número de muertos estimado por diferentes organismos varió en un rango muy amplio desde 5.000 hasta 50.000.

La Figura 2 muestra imágenes de satélite y fotografías aéreas de algunos conos de deyección ubicados en el Estado Vargas, antes y después del evento del 15 y 16 de Diciembre de 1999.

La descripción del evento, los aspectos geológicos y los procesos geodinámicos que ocurrieron, así como los daños socio-económicos y socio-ambientales, fueron previamente descritos por Salcedo (2000 y 2001).

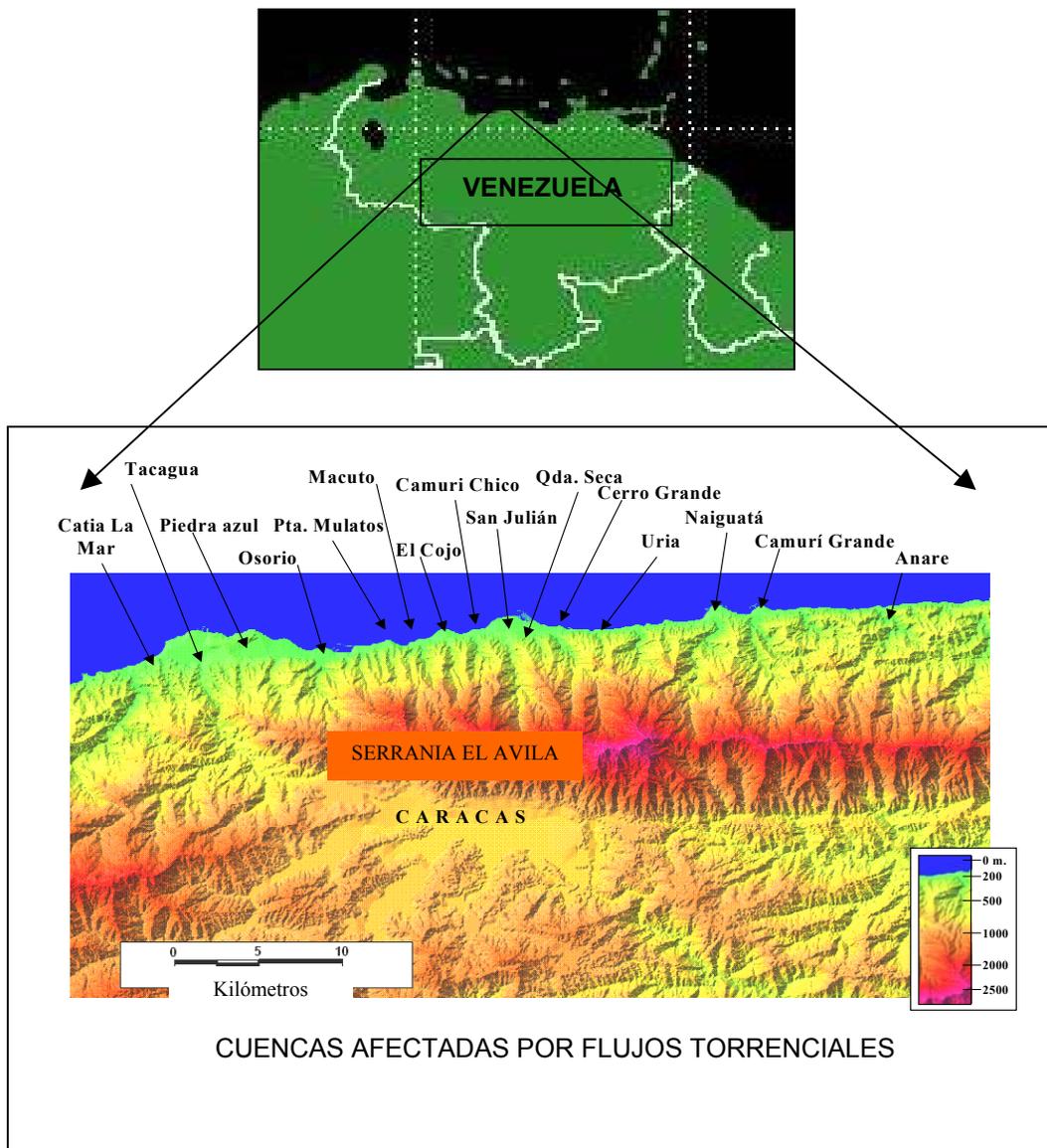


Figura 1. Cuencas afectadas por los flujos torrenciales del 15 y 16 de Diciembre de 1999 en la Costa Norte-central de Venezuela. (Modificado de DIGECAFA, 1999)

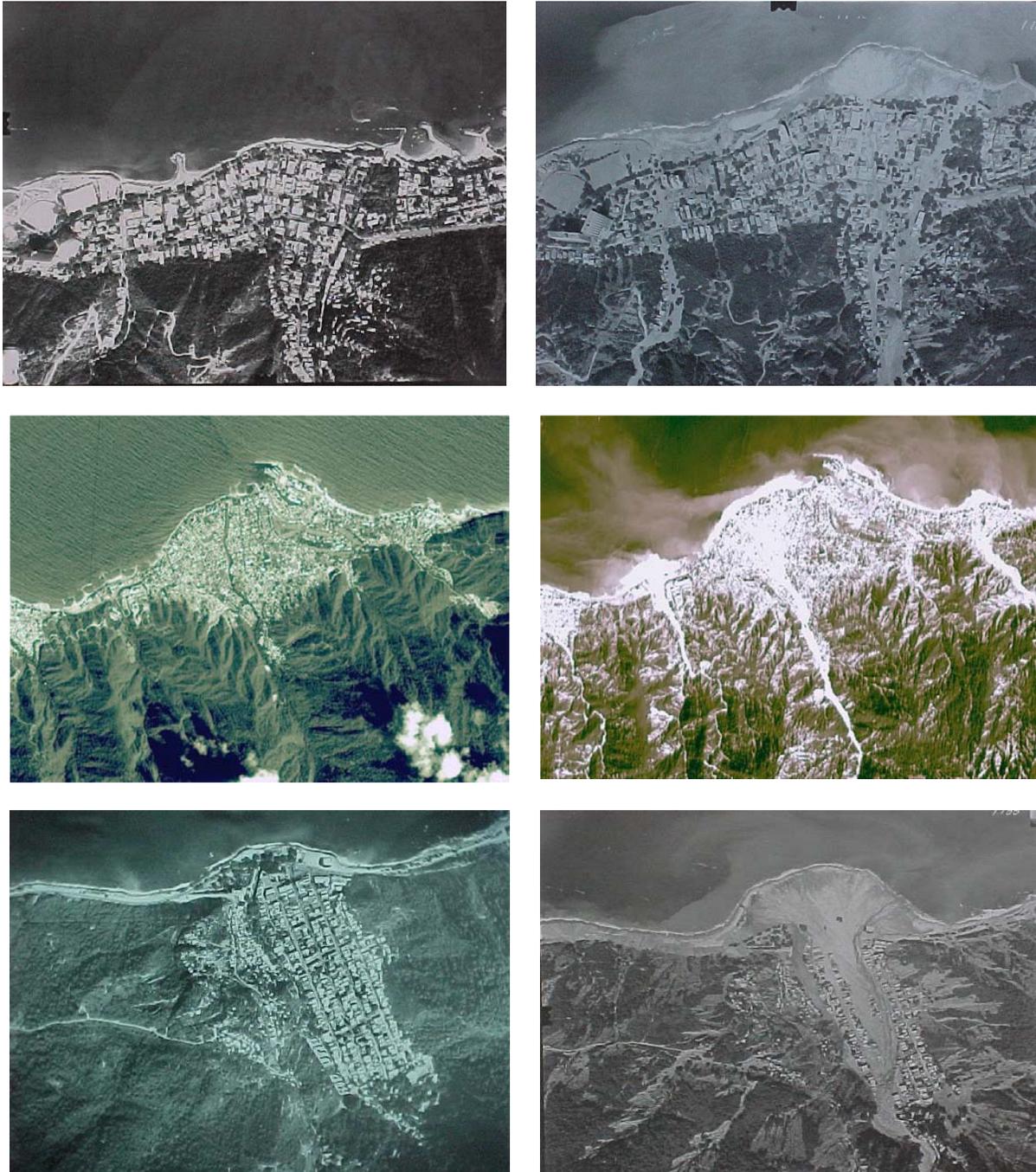


Figura 2. Fotografías antes y después del evento de Diciembre 1999. a) Vistas aéreas del cono de deyección de la quebrada San José de Galipán (Macuto). b) Imagen del satélite SPOT del cono de deyección de San Julián. c) Fotografías aéreas del área de Carmen de Uria. Nótese el desplazamiento hacia el mar de la línea de costa debido a la gran cantidad de sedimentos transportados y depositados por los flujos torrenciales, y los daños severos en la población de Carmen de Uria donde 600 casas fueron totalmente destruidas y murieron más de 1000 personas, solamente en esa cuenca.

2. FENOMENO METEOROLOGICO

En el histograma de la Figura 3 se muestran las precipitaciones diarias registradas por la Estación Maiquetía durante el mes de Diciembre de 1999. Esta estación está localizada en el límite Oeste del área más afectada por los flujos torrenciales (Figura 1) y su elevación es de 43 m sobre el nivel del mar. Desafortunadamente otras estaciones a mayores elevaciones como El Infiernito (1750 msnm) en la cuenca superior de Piedra Azul, no estaban en operación para el momento de ocurrencia del evento. Puede verse en la Figura 3 que existieron altas precipitaciones durante los días 2 y 3 de Diciembre, y que en un periodo de 72 horas (3 días) entre el 14 y el 16 de Diciembre, se registraron 911 mm de lluvias. Cabe destacar que el Servicio Meteorológico de las FAV, ha reportado entre las 6 y 7 de la mañana del día 16, una precipitación de 72 mm.

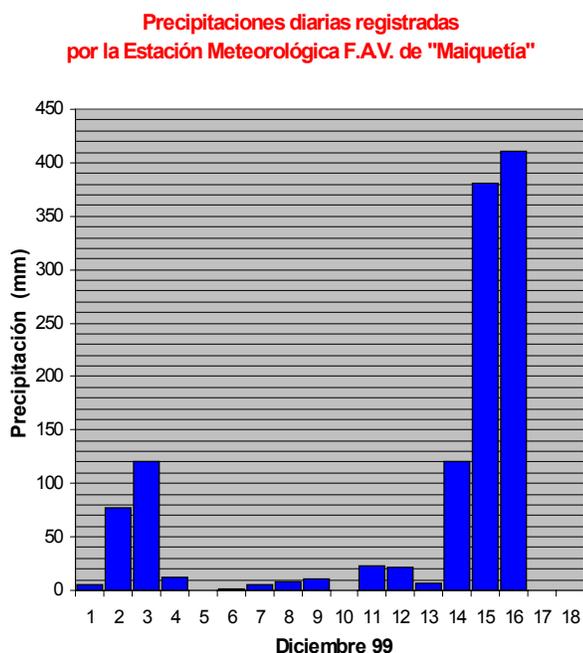


Figura 3. Precipitaciones diarias en Diciembre 1999. Estación Maiquetía.

En la Figura 4 se muestran los mismos datos de precipitación en forma acumulada. Puede observarse que para el 13 de Diciembre se habían acumulado 292 mm de lluvia.

Es oportuno mencionar que durante un periodo de lluvias importantes en 1951, la Estación El Infiernito a 1750 msnm, registró precipitaciones aproximadamente el doble que en la parte baja de la cuenca donde está ubicada la Estación Maiquetía. Este hecho permite suponer que durante el evento de 1999, las precipitaciones en la cuenca alta pudieron alcanzar precipitaciones del orden de 1800 mm entre el 14 y el 16 de Diciembre.

**Precipitación acumulada total registrada por
la Estación Meteorológica F.A.V. de
"Maiquetía"**

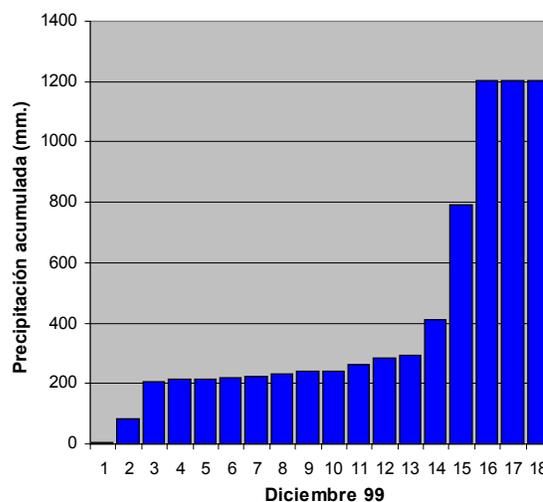


Figura 4. Precipitación acumulada. Estación Maiquetía.

De acuerdo a los reportes meteorológicos, los cuatro factores siguientes, fueron responsables de la intensa lluvia: 1) Frente frío proveniente del Norte (zona de alta presión), 2) Vaguada sobre el Caribe (nubes y precipitaciones), 3) Flujo del Suroeste (corriente de inyección o de chorro), y 4) Situación estacionaria sobre la Costa Central por 20 días.

Un análisis probabilístico, de la Estación Maiquetía, tomando diez días consecutivos de precipitación máxima de cada año, durante los últimos cuarenta años, conduce a un periodo de retorno de mil años para el evento ocurrido. Martínez Consultores, (2000).

3. PROCESOS EROSIVOS

Durante los recorridos de campo se pudieron observar perfiles de erosión de hasta 15 m de alto, tanto en cauces como en márgenes, inclusive en sitios donde el subsuelo estaba constituido por sedimentos aluviales con abundantes bloques de rocas de dimensiones excepcionalmente grandes y volúmenes entre 100 y 150 m³. De acuerdo a la alta densidad de las rocas, se puede afirmar que el flujo torrencial fue capaz de remover y transportar rocas con pesos entre 250 y 450 toneladas. En las Figuras 5 y 6 se presentan, como ejemplos, secciones transversales, tomadas antes y después del evento, en la Quebrada Guanape.

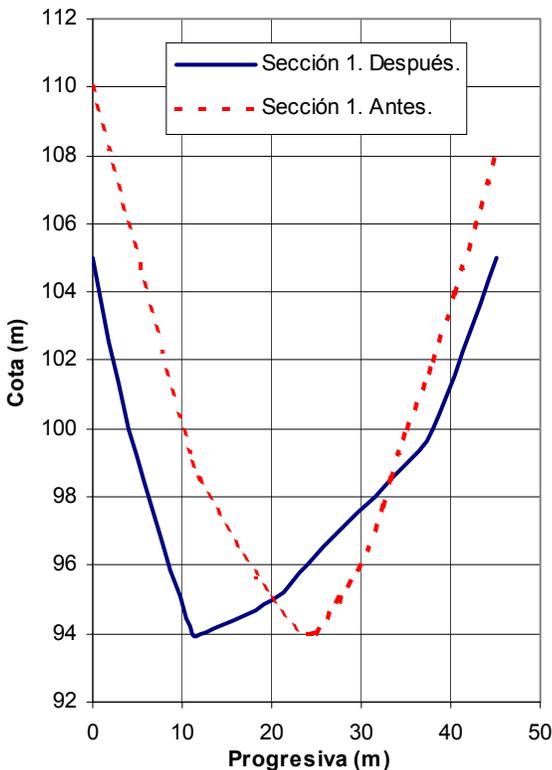


Figura 5. Perfiles topográficos antes y después del evento, en una sección de la Quebrada Guanape.

La comparación de perfiles topográficos de la Figura 5, permite visualizar el desplazamiento del cauce y la generación de un cauce más ancho. Las profundidades de erosión alcanzaron valores de hasta 6 m.

En las secciones topográficas de la Figura 6, ubicadas a unos 200 m aguas arriba de las secciones mostradas en la Figura 5, puede observarse que la erosión es significativamente mayor, alcanzando unos 12 m.

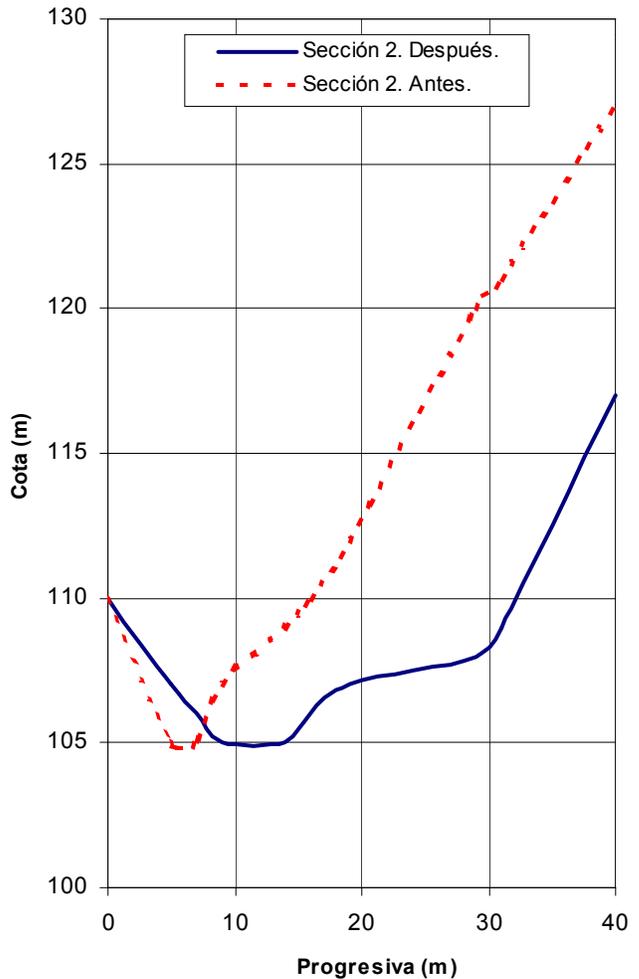


Figura 6. Perfiles topográficos antes y después del evento, en otra sección de la Quebrada Guanape.

Las fotografías incluidas en las Figuras 7 al 16, muestran varios de los perfiles de erosión observados en campo, principalmente en la cuenca de San Julián donde los flujos torrenciales movilizaron grandes bloques de roca y causaron destrucción y daños severos a innumerables viviendas y a la vialidad de distintas urbanizaciones, con la consecuente pérdida de muchas vidas humanas.



Figura 7. Evidencias de erosión en terrazas antiguas en la margen Este de la Quebrada San Julián. La altura del perfil en este sitio es de 7 metros.



Figura 8. Perfil de erosión de 8 m de alto en la cuenca de Camurí Chico.



Figura 9. Sedimentos que constituían el lecho de la Quebrada San Julián que quedaron intactos en el centro del cauce y erosionados por ambos lados hasta profundidades de 6 m.



Figura 10. Detalle de la foto anterior mostrando bloques de roca en una matriz gravo-arenosa. Quebrada San Julián.



Figura 11. Perfil de 12 m de altura, originado por la socavación de los sedimentos del cauce y de la margen derecha en la Quebrada San Julián. Nótese que la erosión dejó al descubierto suelos aluviales en la parte inferior y coluviales en la superior. Obsérvese que las raíces de los árboles quedaron descubiertas.



Figura 12. Erosión del cauce en la Quebrada San Julián, dejando un perfil de unos 15 m de altura y descubriendo la roca in situ. La superficie del cauce original de la quebrada, ha sido representada con línea segmentada.



Figura 13. Perfil de erosión del cauce de la Quebrada San Julián. Los bloques de rocas alineados en el centro de la foto, han sido interpretados como el tope de un flujo torrencial antiguo.



Figura 14. Perfil de erosión aguas arriba de la foto mostrada en la Figura 13. Nótese que continúa el intervalo de grandes bloques de roca alineados, interpretados como un flujo torrencial antiguo.



Figura 15. Perfil de unos 7 m de altura, descubierto por la erosión del cauce en la Quebrada San Julián. Nótese que el flujo torrencial fue capaz de movilizar los grandes bloques de gneises que destacan en la foto.



Figura 16. Detalle del tamaño de bloques movilizados por los flujos torrenciales. Quebrada San Julián.

La comparación estratigráfica entre los depósitos de los flujos de Diciembre de 1999 y los perfiles expuestos como consecuencia de la erosión, permitió interpretar la ocurrencia de flujos torrenciales antiguos (Fotos 13 y 14).

La observación de los depósitos producto de los flujos torrenciales de Diciembre de 1999, también permitió comprobar que los grandes bloques de roca fueron transportados sobre una matriz granular más fina, tal como puede observarse en las fotos de las Figuras 17 a 19.



Figura 17. Bloques de roca transportados sobre una matriz gravo-arenosa durante los flujos torrenciales de Diciembre 99. Quebrada Osorio.

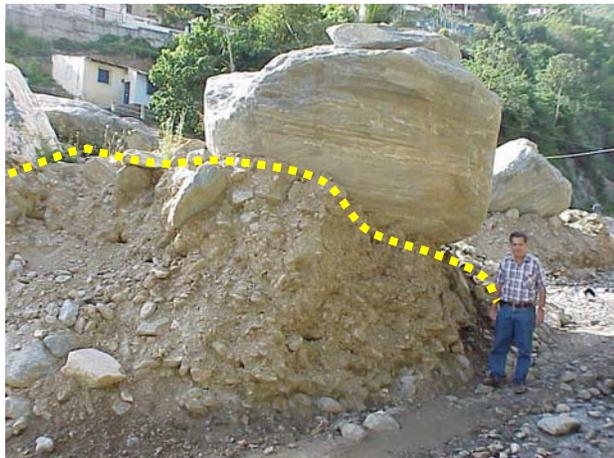


Figura 18. Detalle de foto anterior, mostrando el contacto entre los bloques de roca superiores y la matriz granular inferior.

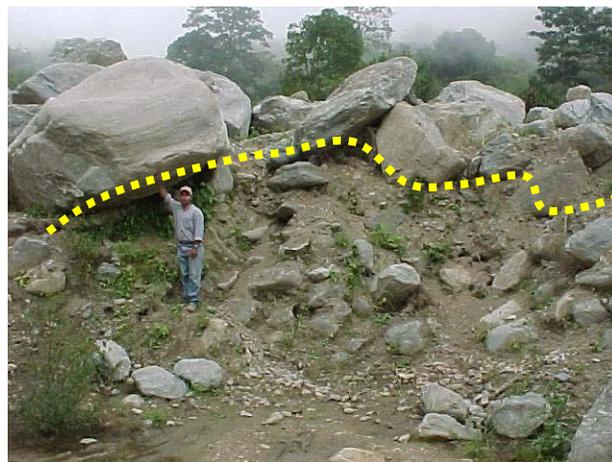


Figura 19. Otra evidencia de transporte de grandes bloques de roca sobre una matriz más fina con fragmentos más pequeños. Quebrada Los Perros, afluente de la Quebrada San José de Galipán.

3. PROPIEDADES DEL FLUJO TORRENCIAL

Las observaciones de los procesos geodinámicos que ocurrieron en las diferentes cuencas media y alta, y la redondez manifiesta de los bloques transportados durante el evento, permiten concluir que la mayoría de dichos bloques formaban parte de los sedimentos en los lechos de las quebradas, y no provinieron, como erróneamente se pudiera suponer, de deslizamientos en masas rocosas aflorantes en las laderas. Esto significa que el flujo torrencial (debris flow) que se generó durante las intensas lluvias, fue capaz de erosionar el cauce y sus márgenes, levantando y transportando los grandes bloques de roca.

Dadas las magnitudes tan extraordinarias de las socavaciones y erosiones observadas, y la capacidad que tuvo el flujo torrencial para transportar en suspensión bloques de rocas de las dimensiones mostradas en las fotos, se procedió a realizar un análisis hidráulico del mismo, para estimar sus propiedades físicas.

El análisis hidráulico del flujo torrencial se realizó bajo dos enfoques diferentes. El primero de ellos consiste en determinar las propiedades físicas del fluido torrencial (peso unitario y viscosidad), a partir del conocimiento de las dimensiones de bloques de rocas que fueron transportados durante el evento.

Mediante el segundo procedimiento se calcula el peso unitario y el hidrograma del flujo torrencial, conociendo el hidrograma de agua y el volumen de sedimentos depositados en el cono de deyección, también denominado abanico aluvial.

3.1 Procedimiento No. 1

Martínez (2000) haciendo uso de los valores presentados por Hamilton y Zhang (1997), quienes reportan 47 mediciones de flujos de barro en la quebrada Jiang-Jia cerca de la ciudad de Dongchuan en la provincia de Yunnan de la República Popular China, y de otros experimentos realizados en laboratorios de hidráulica de la Universidad de California, obtuvo las siguientes relaciones para el fluido con sedimentos, capaz de transportar los bloques de roca:

$$\mu = .0003e^{(0.003\gamma_b)} \quad (1)$$

$$\tau_y = 35.536 * \mu + 0.362 \quad (2)$$

Siendo γ_b , el peso unitario del fluido torrencial, μ, τ_y los valores correspondientes a la viscosidad y el esfuerzo cortante cedente en la expresión del flujo

no newtoniano de Bingham $\tau = \tau_y + \mu \frac{\partial V}{\partial y}$

(V = velocidad y y la profundidad del flujo). En la expresión de Bingham, se han despreciado los términos de orden superior. En las ecuaciones (1) y (2), γ_b debe ser expresado en kg/m^3 , los esfuerzos cortantes (τ y τ_y) en kg/m^2 , y la viscosidad dinámica μ , en kg.seg/m^2 .

La conocida relación de Shields, en conjunto con las ecuaciones (1) y (2), permite la determinación del esfuerzo cortante necesario para mover una roca, en este caso de la dimensión mas frecuente determinada en el campo, tanto en la garganta como en el cono de deyección.

El procedimiento es el siguiente:

- Suponer γ_b
- Calcular con las ecuaciones (1) y (2) los valores de μ y τ_y

- Calcular la densidad del fluido torrencial (ρ), la viscosidad cinemática ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) y la velocidad de

$$\text{corte } (V^* = \sqrt{\frac{\tau_y}{\rho}})$$

- Calcular Reynolds de Corte $R^* = \frac{V^* d}{\nu}$, siendo

d el diámetro representativo de los bloques de roca transportados por el flujo.

- Entrar con Reynolds de Corte al diagrama de Shields y obtener $\frac{\tau_y}{(\gamma_s - \gamma_b)d}$ siendo γ_s = el peso

unitario de la roca, en el caso objeto de estudio 2650 kg/m^3 .

-De la expresión obtenida en el diagrama de Shields, se despeja γ_b . Si este valor es igual al asumido, las propiedades físicas corresponden a las obtenidas; en caso contrario, se repite el proceso, utilizando el valor obtenido como el nuevo valor asumido, hasta que el valor asumido y el calculado coincidan.

Una vez determinadas las propiedades físicas del fluido capaz de transportar los bloques de roca, para calcular la velocidad (V) del flujo se utiliza la siguiente ecuación de fricción deducida con base en las experiencias mencionadas previamente:

$$V = 0.0004 * (\gamma_b S_0 - \frac{\tau_y}{y}) \quad (3)$$

Siendo y la profundidad del flujo y S_0 la pendiente de fondo.

3.2 Procedimiento No. 2

En primer lugar, mediante cualquier método sintético, es posible obtener el hidrograma de la creciente de agua que formó parte del flujo torrencial, utilizando para ello las mediciones pluviográficas, del evento hidrometeorológico. Con esta información y conociendo el volumen de material sedimentado en el cono de deyección, es posible estimar el hidrograma del flujo de agua (sin sedimentos) en el extremo aguas abajo de la garganta y en el extremo aguas abajo del cono de deyección.

Los hidrogramas de flujo de agua, previamente determinados, se transforman en hidrogramas de flujo torrencial. Para ello se estima el caudal sólido a partir del peso unitario del flujo torrencial para cada instante de tiempo. La ordenada final del hidrograma será la suma del caudal sólido mas el caudal líquido. Las expresiones utilizadas son las siguientes:

$$Q_s = \frac{Ql * (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_b})}{(\frac{\gamma_s}{\gamma_b} - 1)} \quad (4)$$

$$Qb = Q_s + Ql \quad (5)$$

Siendo:

Q_s = Caudal sólido del flujo torrencial ($m^3/seg.$)

Ql = Caudal líquido en un instante del hidrograma de creciente de agua

γ_b = peso unitario del caudal del flujo torrencial

Qb = Caudal total del flujo torrencial en el mismo instante de tiempo de Ql

El valor de γ_b , para el cual el volumen del hidrograma de caudal total del flujo torrencial, es igual al volumen de sólido depositado en el cono de deyección, debe ser aproximadamente igual al anteriormente determinado por el procedimiento No. 1, siempre que cumpla con la ecuación de continuidad de sedimentos y la ecuación de fricción (Ec. 3) para cada instante de tiempo. Del hidrograma del flujo torrencial se puede obtener además su caudal máximo.

Con base en los procedimientos descritos se presentan en las Tablas 1 y 2, los resultados obtenidos para las cuencas de Guanape y San Julián, que constituyen ejemplos de cuencas con superficies muy diferentes. La cuenca de Guanape tiene un área de 5.7 km^2 y la de San Julián un área de 23.6 km^2 . Los caudales de agua máximos calculados para ambas cuencas son de $79 \text{ m}^3/seg.$ y $387 \text{ m}^3/seg.$, respectivamente.

TABLA 1
Propiedades físicas del flujo torrencial en la Quebrada Guanape

	Garganta	Cono de deyección
Caudal Q_b (m^3/seg)	586	158
Viscosidad dinámica, μ ($kg.seg/m^2$)	0.44	0.076
Peso Unitario γ_b (t/m^3)	2.43	1.84
Pendiente S_o (%)	6.0	4.9
Velocidad V_b (m/seg)	9.43	2.22
Volumen del material (m^3)	335.822	200.822

TABLA 2
Propiedades físicas del flujo torrencial en la Quebrada San Julián

	Garganta	Cono de deyección
Caudal Q_b (m^3/seg)	3192	1173
Viscosidad dinámica, μ ($kg.seg/m^2$)	0.47	0.17
Peso Unitario γ_b (t/m^3)	2450	2121
Pendiente S_o (%)	8.0	5.0
Velocidad V_b (m/seg)	15.01	2.39
Volumen del material (m^3)	1.874.575	1.165.000

El valor de la velocidad en el cono de deyección se pudo verificar a través de la comparación entre marcas del flujo torrencial en puntos cercanos de de estancamiento y en movimiento, asumiendo que la diferencia entre ambos niveles es la carga de

velocidad $\left(\frac{V^2}{2g} \right)$.

Cabe destacar que los valores estimados para los caudales en la cuenca de San Julián, donde los flujos torrenciales transportaron gran cantidad de bloques de rocas, son relativamente más altos en comparación con otros reportados en la literatura técnica. En otras cuencas del litoral central tales como Cerro Grande y Carmen de Uria, Zhang et al (2000), utilizando metodologías diferentes a las previamente presentadas, también estimaron caudales altos. Los parámetros obtenidos para estas dos últimas cuencas, se indican en la Tabla 3.

TABLA 3
Parámetros estimados para los flujos
torrenciales en las cuencas de Cerro Grande
y Carmen de Uria
(Zhang et al, 2000, comunicación personal))

	Cerro Grande	Carmen de Uria
Area (km ²)	26.6	11.6
Caudal pico Qb (m ³ /seg)	1200	1300
Peso Unitario γ_b (KN/m ³)	20	22
Pendiente So (%) garganta	7.0	6.7
Velocidad Vb (m/seg)	8	7
Acumulación de sedimentos en cono (m ³)	1.3 x 10 ⁶	1 x 10 ⁶
Duración (horas)	9	17

4. CONCLUSIONES FINALES

Los flujos torrenciales que ocurrieron en Diciembre de 1999 en el Estado Vargas, Venezuela, presentaron las siguientes características especiales:

- Más de 15 cuencas presentaron flujos torrenciales, en forma casi simultánea.
- El volumen de sedimentos movilizados durante el evento, se ha estimado en el orden de los 20 millones de metros cúbicos.
- Los flujos torrenciales fueron capaces de transportar grandes bloques de roca con pesos entre 250 y 450 toneladas.

- Las profundidades de erosión en cauces y márgenes, alcanzaron valores de hasta 15 metros. La comparación de perfiles topográficos, antes y después del evento, y las fotografías presentadas en este artículo técnico, evidencian los procesos de erosión profunda.

Por tales características, y por las propiedades físicas estimadas para los flujos torrenciales en algunas cuencas, el evento de Diciembre 1999 en el Estado Vargas, ha sido catalogado como el flujo torrencial (debris flow) más grande originado por lluvias, entre los que han sido documentados a nivel mundial.

REFERENCIAS

- Hamilton, D. & Zhang, S (1997). "Velocity profile assessment for debris flow hazards." *Proc. of First International Conference on Debris Flows: Hazards mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*. San Francisco, California. pp. 474-483.
- Martínez, E. (2000). "Dimensionamiento de Obras de Protección de Flujos de Barro." *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Tomo III. Córdoba, Argentina. pp. 327-336.
- Martínez Consultores (2000). "Obras de protección de torrentes en la Cuenca San Julián, Estado Vargas. Informe para Autoridad Unica de Area del Estado Vargas.
- Salcedo, D. (2000). "Los flujos torrenciales catastróficos de Diciembre de 1999, en el Estado Vargas y en el Area Metropolitana de Caracas. Características y Lecciones Aprendidas". *Memorias XVI Seminario Venezolano de Geotecnia*. Caracas, Venezuela. pp. 128-175.
- Salcedo, D. (2001). "Características y aspectos socio-económicos y ambientales de los flujos torrenciales catastróficos de Diciembre de 1999, en el Estado Vargas y en el Area Metropolitana de Caracas." *Memorias III Simposio Panamericano de Deslizamientos*. Cartagena, Colombia. Vol. 1. pp. 291-317.
- Zhang, Schucheng (1993). "A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China." *Natural Hazards* 7. pp. 1-23.