

LOS FLUJOS TORRENCIALES EN EL ESTADO VARGAS Y AREA METROPOLITANA DE CARACAS, VENEZUELA, DICIEMBRE 1999

DANIEL A. SALCEDO

Profesor Asociado
Universidad Central de Venezuela
Universidad Simón Bolívar
Ingeniero consultor
Email: dansalc@cantv.net

SINOPSIS

Se presenta una descripción del evento y de los procesos geodinámicos generados entre el 15 y el 16 de Diciembre de 1999, el cual afectó el Litoral Central y parte del Area Metropolitana de Caracas, Venezuela. En tal sentido, se describen los flujos superficiales en suelos residuales y/o coluviales, los deslizamientos en masas rocosas, la formación de diques naturales por acumulación de troncos de árboles y bloques de rocas, la reactivación de conos de deyección y los daños correspondientes, haciendo especial énfasis en los impactos socio-económicos y ambientales. Finalmente se tratan aspectos relacionados con la predicción de eventos de esta naturaleza, basándose en datos de lluvias, y se describen en forma resumida las obras de retención de sedimentos ejecutadas hasta la fecha.

ABSTRACT

Based on an evaluation of the December 1999 catastrophic debris flows at Vargas State and Caracas area, Venezuela, a description of the event and its geodynamic processes are presented. In this sense, shallow flow slides in residual and colluvial soils, rock mass slides, formation of natural dikes, effect of tree trunks and rock boulder impacts, reactivation of alluvial fans and corresponding damages are described, emphasizing on socio-economic and environmental impacts. Finally prediction of debris flows based on rainfall records are also discussed, and some comments about actions to be taken, warning systems and aspects related to disaster prevention are made. Open and closed dams built up to date, are also described.

PALABRAS CLAVES: Flujos torrenciales, desastres, impactos socio-económicos y ambientales.

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 Oricaio 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 Chico, 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.

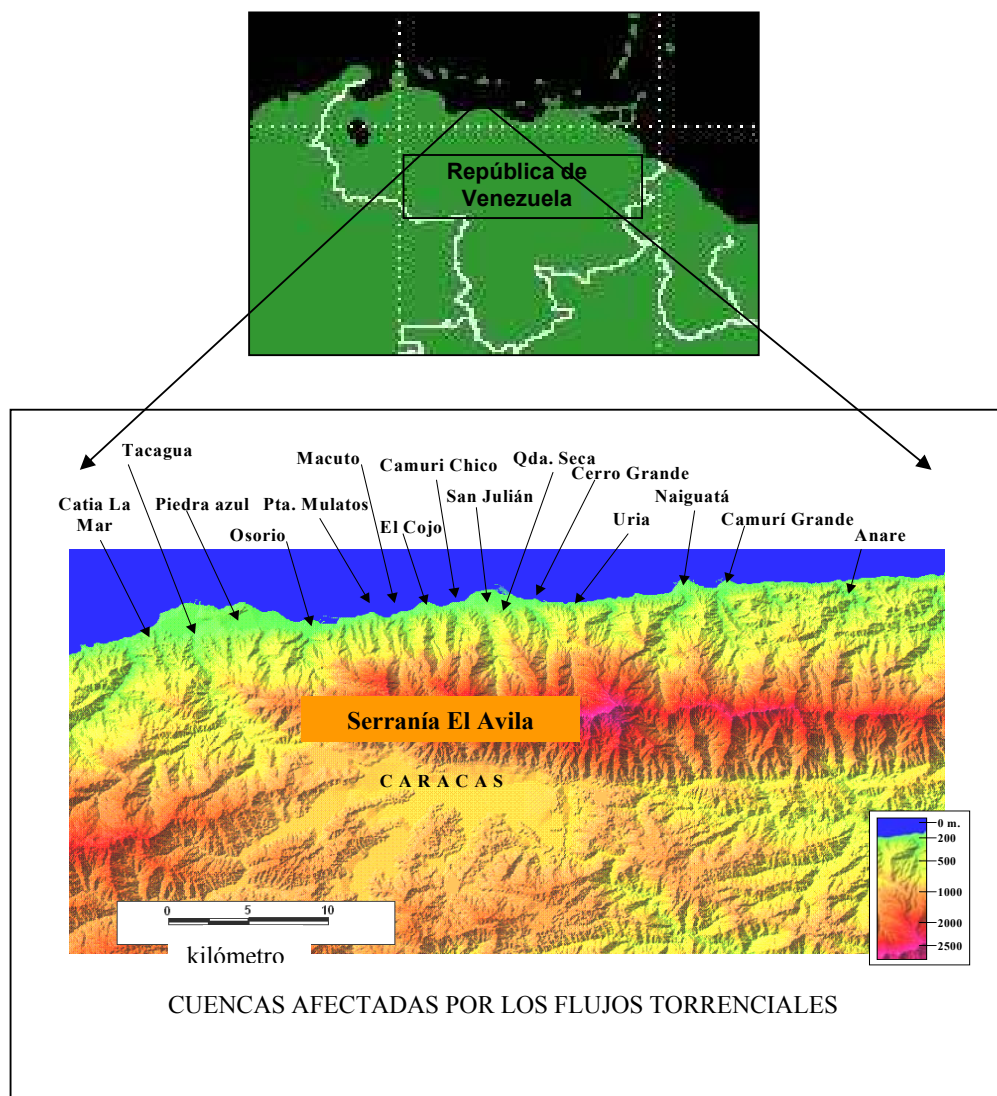


Figura 1. Cuencas afectadas por los flujos torrenciales del 15 y 16 de Diciembre de 1999. Costa Norte central de Venezuela. (Modificado de DIGECAFA. Dic. 1999).

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 25 millones de metros cúbicos.

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

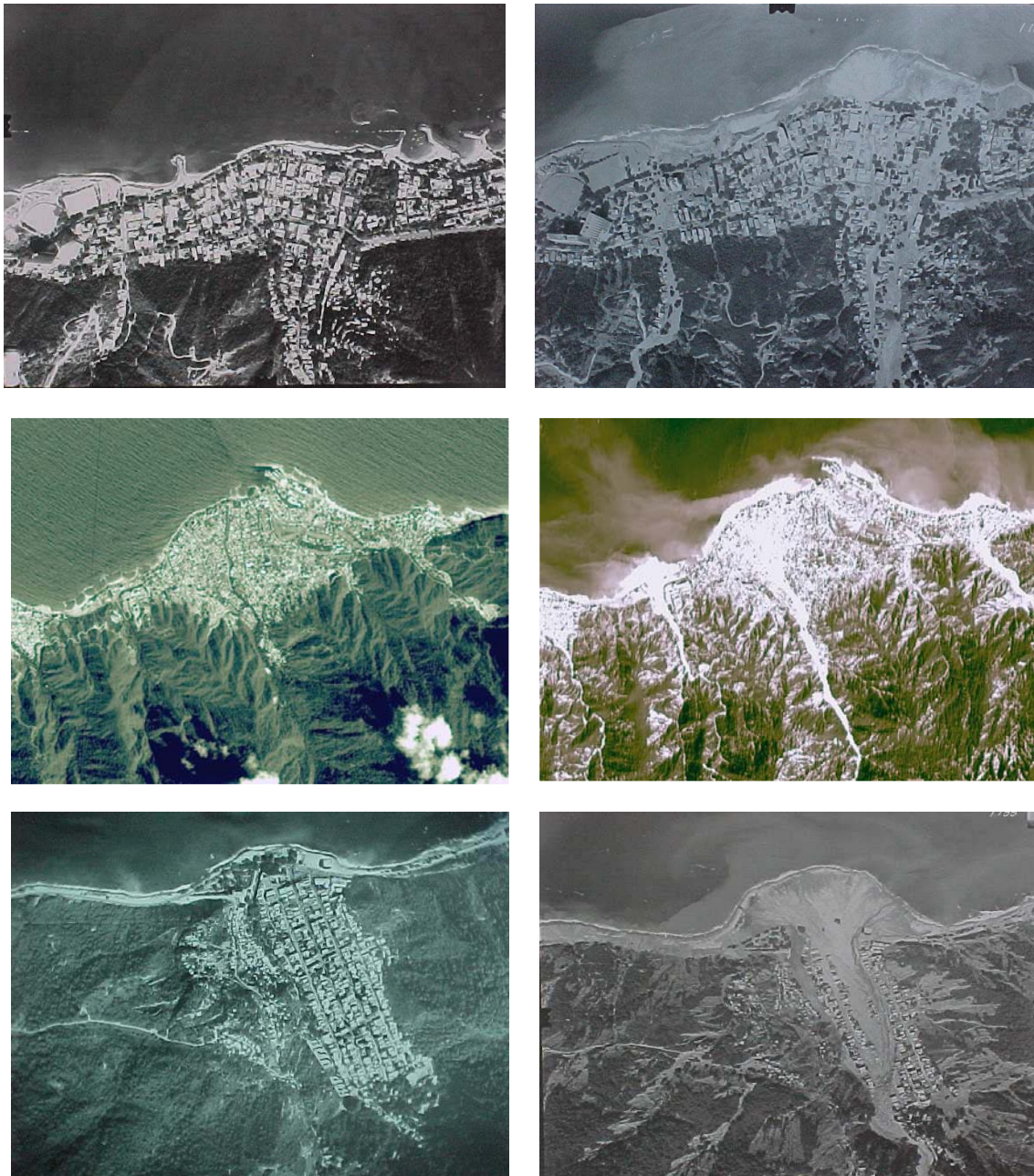


Fig. 2. Fotografías antes y después del evento de Diciembre 1999. Vistas aéreas del cono de la quebrada San José de Galipán (Macuto), Imagen del satélite Spot del cono de deyección de San Julián, y fotografías aéreas del área de Carmen de Uria.

La intensa lluvia no solo afectó la costa central del Estado Vargas sino también un área costera de unos 300 km. a lo largo de la costa Norte Venezolana. Defensa Civil reportó al menos 64.700 casas dañadas y más de 23.200 totalmente destruidas.

Con base en inspecciones realizadas mediante vuelos en helicóptero, análisis detallado de pares fotográficos aéreos de misiones previas al evento (1936, 1951 y 1998) y después del evento (Diciembre 1999), evaluación de fotos de satélite, y a inspecciones detalladas de campo en diferentes cuencas, el presente trabajo tiene como objetivo describir, en forma resumida, las características del evento y los aspectos socio-económicos y ambientales asociados al mismo. Un análisis más detallado de las características del evento, fue previamente publicado por el autor (Salcedo, 2000).

Es importante mencionar que el término “flujo torrencial” (debris flow), es utilizado en este artículo en una forma muy general para describir todos los eventos ocurridos en las diferentes cuencas. Otros términos generales utilizados en la literatura serían “alud torrencial”, “flujo de detritos”, y “flujo de escombros”. Las evidencias de campo revelan que es posible diferenciar en muchas cuencas, áreas afectadas por flujos de barros (mudflows), flujos hiperconcentrados, flujos instantáneos (flash floods) y en general procesos de inundación. Estos diferentes tipos de procesos tienen un rango específico de velocidades y su distribución granulométrica depende de las características geológicas del área. Autores como Ikeya (1989), Tianchi et al (1992), Takahashi (1991), Zhang (1993) y muchos otros, han publicado clasificaciones de flujos torrenciales con base en su origen, de acuerdo al mecanismo de activación, y según la teoría del fluido.

2. ANTECEDENTES HISTORICOS.

Una revisión de la literatura especializada, permite concluir que existen varios antecedentes de lluvias intensas que causaron daños en el Litoral Central. Tales antecedentes han sido descritos en detalle por Salcedo (2000) y corresponden a las siguientes fechas: Febrero 1798, Agosto 1912, enero 1914, Noviembre 1938, Mayo 1944, Noviembre 1944, Agosto 1948 y Febrero 1951. El evento de 1951 se registró como una gran catástrofe que inundó todo el litoral después de dos semanas continuas de lluvias. El centro de la tormenta fue el Topo El Infiernito (Cota 1750 msnm), ubicado en el tope del Cerro Avila, con una precipitación de 529 mm. Vale la pena mencionar que en las fotografías aéreas del año 1951, analizadas por el autor de este trabajo, se pueden observar claramente los daños causados por las intensas lluvias de ese año. En particular se puede mencionar que en los conos de San Julián y Cerro Grande los flujos torrenciales fueron severos, sin embargo, no causaron desastres debido a que para esa fecha dichas zonas no habían sido urbanizadas.

3. FENOMENO METEOROLOGICO DE DICIEMBRE 1999.

De acuerdo a los reportes del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, con base a análisis y estudios realizados en imágenes de radar y demás productos meteorológicos, los cuatro factores siguientes fueron los 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.

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) 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.

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.

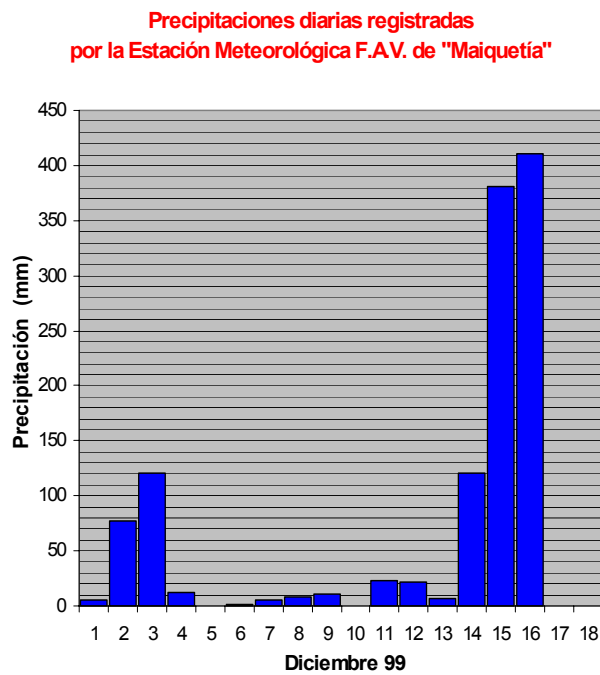


Fig. 3. Registro de precipitaciones diarias. Estación Maiquetía.

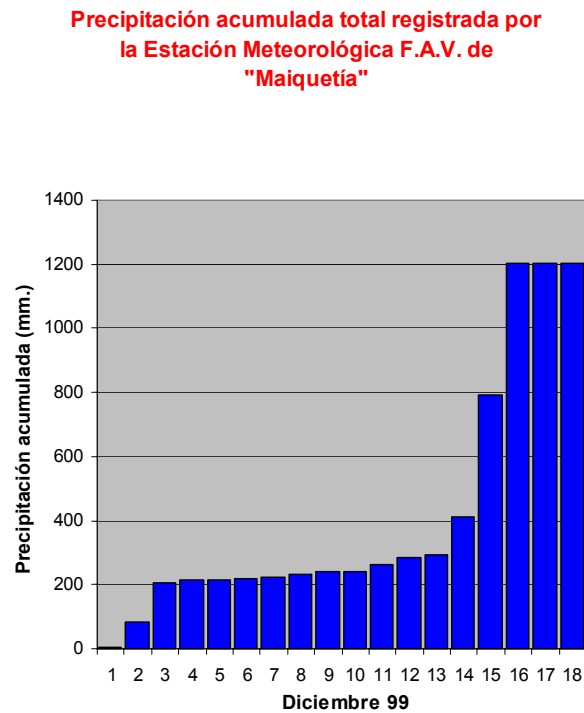


Fig. 4. Precipitación acumulada. Estación Maiquetía.

4. TESTIMONIOS.

Varias entrevistas realizadas por el autor a testigos presenciales del evento, permiten concluir lo siguiente:

- Todos los entrevistados describieron un aumento anormal del nivel de los ríos, antes de la ocurrencia de los flujos torrenciales.
- Todos los flujos torrenciales activados en las diferentes cuencas mostradas en la Figura 1, ocurrieron entre el 15 y el 16 de Diciembre. No todos ocurrieron al mismo tiempo, aun en cuencas cercanas.
- En algunas cuencas, una vez que se inició el flujo torrencial, nunca se detuvo temporalmente hasta que comenzó a disminuir en velocidad y alcanzar el flujo normal del río o quebrada. La duración de los diferentes flujos torrenciales varió entre 6 y 20 horas.
- En otras cuencas los testigos describieron dos o cuatro “olas” con algunos periodos de aparente calma entre ellas. Una posible explicación de tales olas es el colapso o fallas de diques naturales que se formaron en las cuencas medias y altas. Durante los recorridos detallados de campo, el autor de este trabajo confirmó claras evidencias de formación y fallas de dique naturales.
- Todos los testimonios describieron un sonido muy fuerte de rocas rodando unas encima de otras y de casas siendo destruidas por el impacto y la presión del fluido de los flujos torrenciales. Un testigo en Los Corales (Cuenca de San Julián), narró que sintió un temblor en su casa de aproximadamente 90 segundos debido al movimiento de bloques de roca durante lo que él identificó como la “primera ola.” Otro testimonio de un geólogo en el área de El Cojo, describe que se produjeron más de ocho olas y que un ruido muy grande de rocas se escuchaba antes de que cada ola alcanzara el edificio donde él estaba ubicado cerca de la Costa. Zhang (1993) ha definido estos ruidos como “geosonidos” producto de vibraciones que se propagan aguas abajo, generadas por olas que golpean los diques marginales y los lechos de los ríos.
- Algunos testimonios de gente que trató de cruzar el río al inicio del flujo torrencial, describen, en Camurí Chico por ejemplo, que el agua estaba caliente. En algunas cuencas hubo personas que percibieron un olor a azufre. Otras en la cuenca de Carmen de Uria y en áreas vecinas, describieron un sonido similar al de una explosión como de un volcán y que ellos observaron agua fluyendo de un color verde oscuro, muy fría y con olor a azufre. Algunas personas atribuyeron este hecho a la desconocida existencia de aguas termales en el Cerro El Avila. Ninguno de estos testimonios ha sido confirmado y no hay una explicación técnica para ellos hasta la fecha. Una posible explicación para el olor a azufre podría ser el impacto de rocas que contienen pirita, o confusión con el olor a gas proveniente de explosiones de bombonas de gas doméstico, hecho que sí fue observado por testigos y en filmaciones realizadas durante el evento.

5. ASPECTOS GEOLOGICOS.

De acuerdo a los estudios geológicos regionales del área afectada publicados previamente, en la zona del Cerro El Avila se pueden diferenciar hasta diez unidades litológicas, las cuales se describen a continuación en forma muy breve.

COMPLEJO DE LA COSTA (Mesozoico)

Fase Tacagua o Esquistos de Tacagua: Mármoles, esquistos calcáreos actinolíticos y epidóticos. Esquistos cuarzo calcáreos grafitosos

Fase Antímano: Mármoles cuarcíferos y esquistos calcáreos.

Fase Nirgua: Anfibolitas y esquistos anfibólicos.

Serpentinitas

GRUPO CARACAS (Mesozoico)

Formación Las Mercedes: Esquistos calcáreos grafitosos y mármoles grafitosos.

Formación Las Brisas: Esquistos cuarzo feldespáticos y metareniscas.

COMPLEJO AVILA (Pre-Cámbrico)

Metagranito de Naiguatá

Metaígneas de Tócome

Esquistos de San Julián. Gneisses y esquistos feldespáticos.

Augengneiss de Peña de Mora. Gneiss cuarzo micáceo

La tectónica de la Zona Central de la Cordillera de la Costa, es muy compleja debido a la “yuxtaposición” de unidades litológicas de edades, orígenes y procesos metamórficos muy diferentes, que además tuvieron lugar en “ambientes tectónicos” separados. Así por ejemplo, unidades litológicas Pre-Cámbricas se encuentran en contacto con formaciones Mesozoicas y remanentes de Complejos Ofiolíticos, desmembrados en forma de cuerpos alargados embebidos en rocas metasedimentarias o a lo largo de geofracturas. Varios autores han presentado modelos de evolución basados en conceptos de la Teoría de Tectónica de Placas, mediante los cuales han tratado de explicar las complejidades existentes.

En forma general, se puede decir que existen dos sistemas de fallas geológicas, uno subparalelo al rumbo de la Cordillera y otro formado por fallas conjugadas de tipo transversal. Algunas de estas fallas tienen importancia sismotectónica regional, entre las cuales merece la pena destacarse el Sistema de Fallas Tacagua-El Avila cuya traza se ubica al Suroeste de la zona de trabajo. A lo largo de la traza de la falla existen claras evidencias de actividad neotectónica. Otra geofractura de importancia es la falla de San Sebastián, la cual se considera responsable del trazado lineal de la costa del Litoral Central y constituye en parte, el límite meridional de la Placa del Caribe.

Varios de los ríos y quebradas tales como San Julián, Quebrada Seca y Cerro Grande se han desarrollado a lo largo de fallas geológicas transversales. La mayoría de estos planos de falla muestran típicas estrías de cizallamiento y superficies pulidas. Las diferencias topográficas en el Cerro El Avila están controladas por la diferencia en competencia de la masa rocosa (Figura 5). Los esquistos de la Fase Tacagua afloran en las elevaciones más bajas a lo largo de una banda de 700 - 1500 m de espesor paralela a la línea de costa. Al Sur de esta banda, a elevaciones mayores, afloran rocas más competentes pertenecientes a los Esquistos de San Julián, Gneiss de Peña de Mora y Meta-granitos

Es interesante mencionar que la mayor parte del material fino dentro de los flujos torrenciales aparenta venir de los esquistos de la Fase Tacagua donde se han desarrollado por meteorización in situ, suelos residuales con espesores entre 0.5 m y 3.0 m. Los afloramientos de la Fase Tacagua muestran abundantes signos de intenso tectonismo y las rocas han sido desplazadas por un número importante de fallas.

Un alto porcentaje de bloques y fragmentos de roca que se encontraron en los conos de deyección pertenecen a las unidades litológicas que afloran a elevaciones medias y altas en el Cerro El Avila (Esquistos de San Julián, Gneiss de Peña de Mora, Metagranitos y en general rocas metaígneas

La mayoría de los desarrollos urbanos han sido construidos en conos de deyección, los cuales han sido formados por la contribución de depósitos fluviales normales y por flujos torrenciales ocasionales. Aun cuando los depósitos aluviales no han sido datados, se puede estimar que son de edad Plioceno tardío u Holoceno.

6. CARACTERISTICAS DE LAS CUENCAS Y DE LOS FLUJOS TORRENCIALES.

Las cuencas donde se generaron flujos torrenciales presentan características diferentes, algunas de las cuales se indican en forma resumida en la Tabla No. 1.

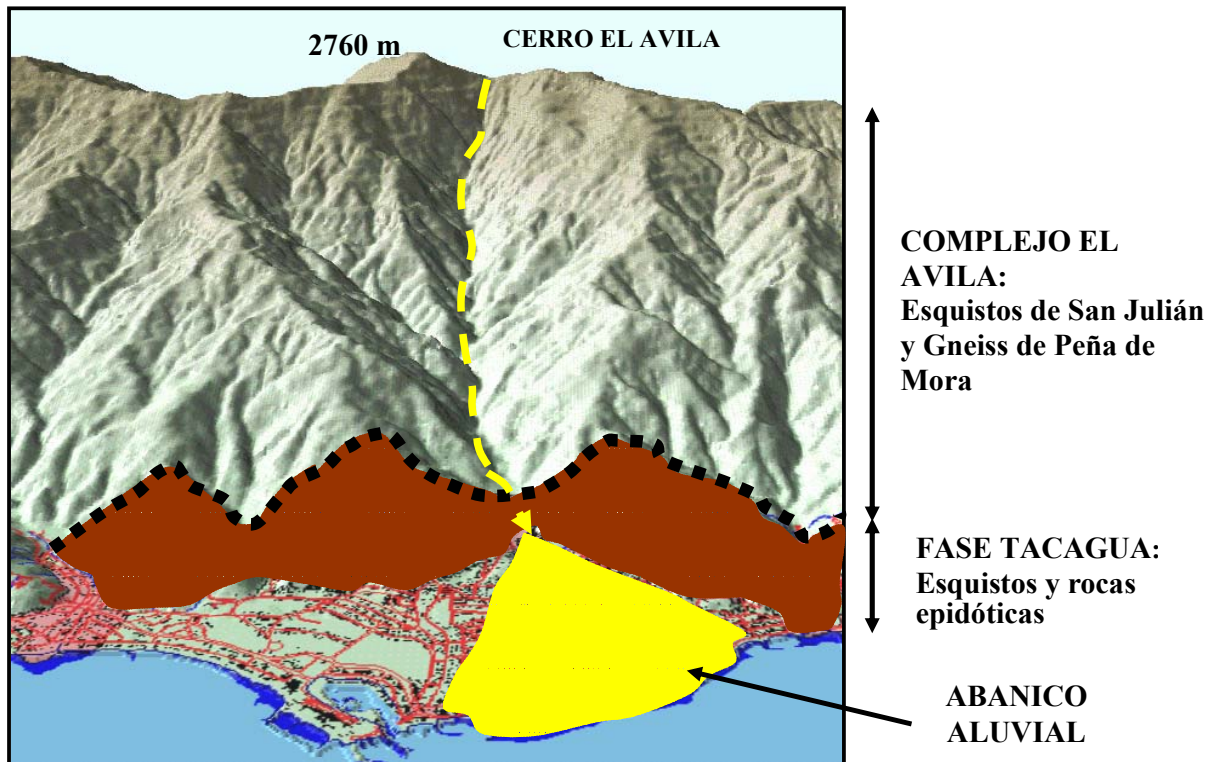


Fig. 5. Vista tridimensional de la cuenca de San Julián, mostrando diferencias en relieve debido a variaciones en la resistencia de la masa rocosa. (Modificada de DIGECAFA, 1999).

Puede observarse en dicha Tabla que las máximas elevaciones sobre el nivel del mar corresponden a las Cuencas del Río Cerro Grande (2750 m), Camurí Chico (2350), Río Macuto (2300 m), y Río Uria (2150). Contrasta, por ejemplo, el hecho de que la cuenca de Quebrada Seca que tiene apenas 5.3 km² de área, fue afectada por numerosos deslizamientos en forma de flujos superficiales al igual que la cuenca del Río Naguayá que tiene 33.4 km². Los daños aguas abajo, sin embargo, fueron comparativamente mayores en Quebrada Seca que en Naguayá. Este hecho puede explicarse porque el tramo inferior del Río Naguayá tiene una longitud de 3.3 km. con una pendiente pequeña (3 %), mientras que el tramo inferior de Quebrada Seca tiene una longitud de 1.4 km. con una pendiente de 7.4%.

Durante los reconocimientos de campo se pudo observar que en algunas cuencas los depósitos de los flujos torrenciales mostraban bloques de roca en contacto, sin matriz alguna. Esta observación sugiere que la fase de fluido drenó fuera del depósito después de la sedimentación, y que el fluido era de baja resistencia y viscosidad, probablemente solo agua, permitiendo choques entre los clastos y manteniendo una alta velocidad.

En otras cuencas los depósitos de flujos torrenciales mostraron clastos y grandes bloques de rocas y una abundante matriz de material más fino constituida por grava, arena, limo y arcilla. Estas observaciones han sido también previamente reportadas por Johnson (1997) en el Río Columbia, Oregon. Otras cuencas en el Estado Vargas fueron afectadas, tanto por auténticos flujos de lodos (mudflows) o por flujos hiperconcentrados.

Tabla 1. Características de algunas cuencas afectadas por los flujos torrenciales de Diciembre de 1999. (Grases et al, 2000).

Nombre	Area (km ²)	Máx. Elev. (msnm)	Longitud cauce (km)	Cuenca alta		Tramo inferior		Caudal máximo	
				Pendiente cauce	L (km)	Pendiente cauce	L (km)	q máx. m ³ /seg/km ²	Q máx m ³ /seg
Piedra Azul	24.8	1950	8.7	0.25	2.0	0.048	2.1	11.2	278
Osorio	4.6	1700	4.0	0.60	1.2	0.044	0.5	22.0	101
Punta de Mulatos	5.7	1960	4.4	0.60	1.5	0.067	0.7	20.0	114
La Alcantarilla	1.5	1050	3.6	0.40	2.4	0.087	1.2	20.0	30
Macuto	14.0	2300	8.7	0.40	1.6	0.063	1.6	13.2	185
El Cojo	6.8	1550	5.9	0.60	1.2	0.040	0.5	17.6	120
Camurí Chico	11.2	2350	7.7	0.55	1.4	0.057	0.8	14.3	160
San Julián	23.6	2490	9.5	0.60	2.0	0.061	3.3	13.2	310
Quebrada Seca	5.3	1240	4.0	0.60	1.0	0.074	1.4	22.0	117
Cerro Grande	26.6	2750	7.7	0.90	0.8	0.036	2.3	14.3	380
Tanaguarena	2.1	940	2.6	0.80	0.4	0.110	0.7	24.2	51
Uria	11.6	2150	6.9	0.90	0.3	0.075	2.0	14.3	166
El Tigrillo	2.9	1030	3.1	0.90	0.5	0.170	1.0	23.4	68
Naiguatá	33.4	2000	11.8	0.55	2.1	0.030	3.3	8.6	287
Camurí Grande	42.9	2196	10.3	0.65	2.0	0.027	2.3	10.1	433

Otro aspecto que será igualmente importante de definir, es si realmente los flujos torrenciales ocurrieron a lo largo del cauce principal de la cuenca, o se limitaron a pequeñas cuencas de tributarios que luego aportaron el material al cauce principal. En los recorridos realizados por el autor, las evidencias de campo sugieren que el flujo torrencial de la cuenca de Camurí Chico, por ejemplo, ocurrió en una de sus quebradas tributarias.

Los expertos chinos trabajando en conjunto con ingenieros venezolanos han estimado algunos parámetros para las cuencas de Cerro Grande y Carmen de Uria, los cuales se indican en la Tabla 2. Puede observarse que los valores de caudal pico indicados en la Tabla 2, son relativamente altos en comparación con otros reportados en la literatura técnica. Sin embargo, hay que mantener presente que la estimación del caudal pico basada en observaciones de líneas o niveles de barro, utilizando la ecuación del vértice forzado (forced vortex equation), es muy susceptible a la hipótesis relacionada con la forma de la superficie de flujo (lineal, convexa o cóncava) Jakob et al (1997).

De acuerdo a Sassa (1985), los flujos torrenciales son capaces de moverse con velocidades hasta de 16 m/seg. y en pendientes tan bajas como 4°. En el informe presentado por la Japan International Cooperation Agency (2000), se estimaron caudales pico para el flujo de lodo y piedras de 401 m³/seg y 941 m³/seg para las cuencas de Camurí Chico y San Julián, respectivamente.

Detalles de observaciones y mediciones realizadas por el USGS pueden consultarse en el excelente reporte realizado por Wieczorek et al (2002).

Tabla 2. Parámetros estimados para los flujos torrenciales de Cerro Grande y Carmen de Uria. (Expertos chinos en cooperación con ingenieros venezolanos). (Zhang, S. et al 2000, comunicación personal).

	CERRO GRANDE	CARMEN DE URIA
CAUDAL PICO	1200 m ³ / seg.	1300 m ³ / seg.
VELOCIDAD	8 m / seg.	7 m / seg.
DURACION	9 horas	17 horas
ACUMULACION DE SEDIMENTOS	1.3 x 10 ⁶ m ³	1 x 10 ⁶ m ³
PESO UNITARIO	20 kN / m ³	22 kN / m ³

7. PROCESOS DURANTE EL EVENTO.

7.1 Deslizamientos superficiales en forma de flujo

Este es el proceso geodinámico que se desarrolló con más frecuencia en las laderas al Sur del Litoral Central, y en general se pueden considerar como precursores a los flujos torrenciales. Se trata de deslizamientos esencialmente traslacionales de suelos residuales y/o coluviales, generalmente con espesores menores de 2 m, que desarrollan escarpas muy largas desde los topes de fila hasta el pie de laderas naturales, y arrastran consigo la capa vegetal y hasta grandes árboles con raíces desarrolladas dentro de dichos suelos. En algunas publicaciones han sido denominados deslaves.

La Figura 6 muestra una fotografía tomada después del evento, en una ladera adyacente al Viaducto No. 2 de la Autopista Caracas-La Guaira. Puede observarse el patrón típico de deslizamientos en forma de flujos superficiales traslacionales. Otros ejemplos de este tipo de flujos fueron observados en laderas naturales de la mayoría de las cuencas, principalmente en Naiguatá, Carmen de Uria, Quebrada Seca, San Julián y Camurí Chiquito. La Figura 7 muestra una fotografía aérea de la cuenca de Quebrada Seca, destacando un número importante de flujos superficiales traslacionales.

Un análisis de las fotografías aéreas después del evento permite observar que los flujos superficiales fueron más frecuentes en las laderas naturales entre Macuto y Naiguatá. Desde Macuto hacia el Oeste hasta la Quebrada Piedra Azul, los flujos superficiales fueron menos frecuentes, al igual que entre Naiguatá y Camurí Grande y de Camurí Grande hasta Anare, con excepción de una zona de laderas al Este de Care.

En las áreas donde se notan más flujos superficiales, se ha estimado que un 30% a 40% del área ha sido afectada por denudación. Una estimación del área total afectada por denudación considerando todas las cuencas, podría estar alrededor de 10% del área total expuesta a las intensas lluvias.

Un total de 15 muestras fueron obtenidas de típicos flujos superficiales en laderas naturales de diferentes cuencas. Las propiedades básicas de estos suelos se resumen en la Tabla 3. Aun cuando se trata de suelos residuales originados por meteorización in situ, se determinaron propiedades tales como Límites de Atterberg (LL y LP) y límites de contracción (SL), solo con el objeto de tener parámetros de referencia. Los resultados muestran que la mayoría de los suelos pueden ser clasificados de acuerdo al Sistema Unificado de Suelos como SM o SC. Basados en el porcentaje pasante el tamiz No. 200, los suelos pueden ser agrupados en dos tipos los cuales se muestran en las Figuras 8 y 9.



Fig. 6. Foto tomada después del evento de Diciembre 1999, mostrando los típicos deslizamientos en forma de flujos traslacionales. Ladera adyacente a Autopista Caracas-La Guaira.

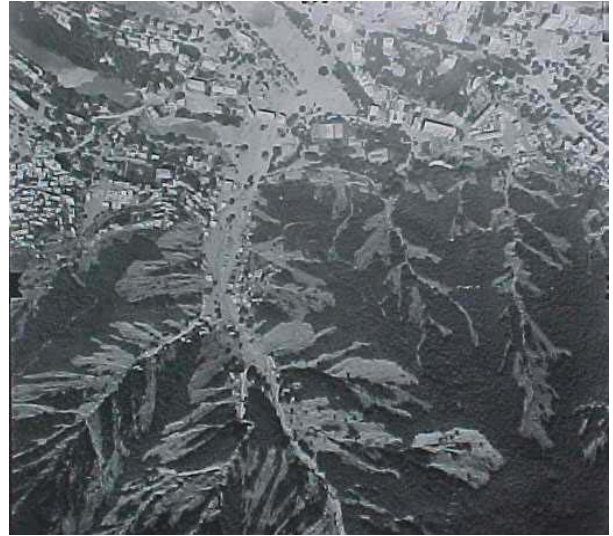


Fig. 7. Fotografía aérea de la cuenca de Quebrada Seca, mostrando el patrón de deslizamientos en forma de flujos traslacionales superficiales.

Flujos superficiales similares generados por lluvias intensas, han sido reportados previamente por muchos investigadores tales como Harp et al (1995), Johnson y Sitar (1990), Eisbacher y Clague (1981), y Hollingsworth y Kovacs (1981). Con base en las ideas de estos dos últimos autores, los resultados de algunos ensayos de laboratorio ejecutados en los suelo afectados por flujos superficiales, fueron representados gráficamente en las Figuras 10a a 10d, relacionándolos con la pendiente de la ladera natural antes de la ocurrencia del evento. Adicionalmente se correlacionaron con la pendiente de la ladera, los porcentajes pasante el tamiz No. 40 y el tamiz No. 200, y los valores de límite líquido y de contracción.

Tabla 3. Propiedades de las muestras de suelo tomadas en flujos superficiales.

NUMERO DE MUESTRA Y CUENCA	PENDIENTE DE LA LADERA (°)	w (%)	LL	IP	SL	Gs	% PASANTE No. 40	% PASANTE No. 200	USCS
1. Naiguatá	39	11.8	36.3	8.8	22.2	2.86	32.79	22.81	SM
2. Naiguatá	35	9.5	24.8	5.5	15.7	2.87	28.69	23.06	SC
3. Naiguatá	48	6.4	22.3	0.1	18.0	2.80	23.77	17.71	SM
4. Naiguatá	42	6.6	-	NP	-	2.78	25.19	20.50	SM
5. Naiguatá	31	5.7	25.6	5.7	15.0	2.71	12.11	8.47	SC
6. Uria	39	7.1	25.5	6.1	14.4	2.71	20.19	16.51	SC
7. Uria	35	9.6	26.5	4.1	18.1	2.71	25.92	20.29	SM
8. Cerro Grande	39	9.3	26.5	3.7	17.8	2.64	20.33	16.48	SM
9. Cerro Grande	37	11.3	25.7	8.2	15.9	2.75	34.83	28.32	SC
10. Cerro Grande y Quebrada Seca	31	10.0	29.0	10.0	13.1	2.74	33.81	29.21	SC
11. Qda. Seca	32	7.9	-	NP	-	2.72	13.75	9.76	SW
12. Qda. Seca	44	8.1	32.9	8.1	10.8	2.63	40.42	31.54	SM
13. Camurí Chico	42	9.4	28.1	9.4	14.1	2.80	30.41	25.42	SC
14. Camurí Chico	39	6.6	36.8	14.6	12.5	2.70	30.44	25.74	SC
15. Camurí Chico	45	6.5	25.3	2.8	15.5	2.74	17.65	14.62	SM

Los resultados son muy similares a los obtenidos por Hollingsworth y Kovacs. Basados en estos gráficos, se puede concluir que para la ocurrencia de deslizamientos en forma de flujos superficiales, los porcentajes pasante No. 40 y No. 200 del suelo, deben ser mayores en laderas con menores pendientes. Los gráficos que relacionan el límite líquido y el de contracción revelan que estos límites en el momento de la falla, aumentan a medida que la pendiente de la ladera disminuye. Se requieren investigaciones posteriores para corroborar la posible aplicación en la zona afectada por los flujos torrenciales en el Estado Vargas, de la metodología utilizada por los citados autores para predecir el potencial de ocurrencia de deslizamientos en forma de flujos superficiales.

En las cuencas media y alta del Estado Vargas, la mayoría de los deslizamientos superficiales afectaron predominantemente la cubierta vegetal y probablemente un espesor muy pequeño (< 0.5 m) de suelo residual, exponiendo la masa rocosa debajo de ellos y dejando algunos bloques de roca en posición crítica. Es conveniente mencionar que múltiples deslizamientos en forma de flujos superficiales, ocurrieron aun en áreas con vegetación gruesa y bien desarrollada, incluidas dentro de la zona del Parque Nacional El Avila.

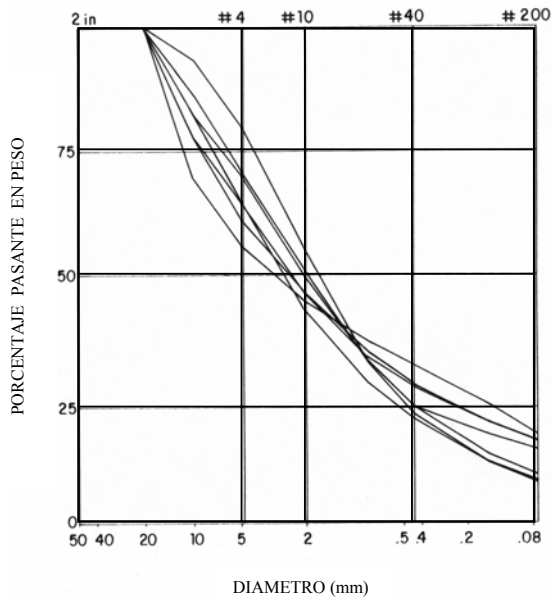


Fig. 8. Curvas granulométricas para suelos del Grupo 1.

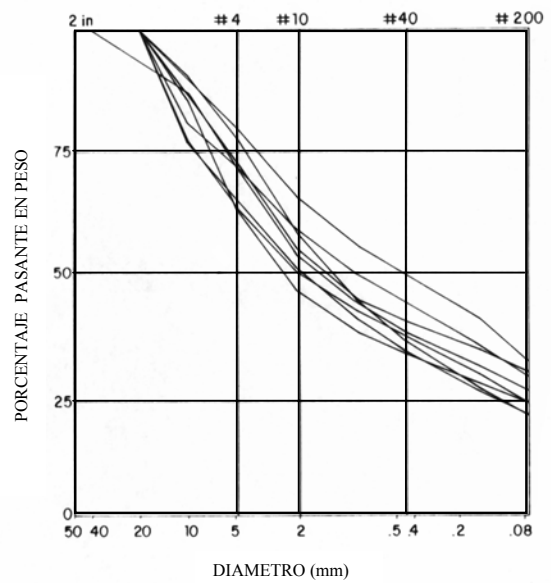


Fig. 9. Curvas granulométricas para suelos del Grupo 2.

De acuerdo a los análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélites, aún cuando es geológicamente posible diferenciar diez unidades litológicas, la ocurrencia de los flujos superficiales en laderas naturales no aparenta tener relación con el tipo de roca. En otras palabras, los flujos superficiales se desarrollaron en todas las litologías.

Los deslizamientos en forma de flujos superficiales pueden, en forma sencilla, explicarse por la saturación progresiva de dichos suelos, pérdida progresiva de la succión, y por consiguiente de su resistencia al corte, principalmente de su resistencia cohesiva. Debido a su forma típica, caracterizada por una longitud significativa en comparación con su ancho y profundidad, los flujos superficiales pueden en forma simple, ser modelados mediante el procedimiento de talud infinito (Salcedo, 2000).

Los resultados de análisis de estabilidad de flujos superficiales, considerando el efecto de las raíces, publicados por Wolle & Hachich (1989), indican que se requiere un ancho mínimo para la activación de este tipo de deslizamiento y que por lo tanto, no ocurrirán mientras no se alcance la saturación de ese mínimo ancho de suelo, siempre y cuando la hipótesis de eliminación de la succión como iniciador del evento, sea aceptada. Los resultados también explican las observaciones de campo en cuanto a que las escarpas son múltiples, angostas, aisladas y pocas veces únicas y anchas. Los valores calculados de dicho ancho mínimo (6 a 15 m) dependiendo de los parámetros adoptados son, de acuerdo a los autores, compatibles con las observaciones de campo. Parece entonces razonable suponer que escarpas más anchas (20 a 30 m) son realmente el resultado de una serie de deslizamientos contiguos.

Con el fin de realizar un análisis comparativo con los resultados de Wolle y Hachich, se midió en campo el ancho de 133 deslizamientos superficiales en forma de flujo, ubicados en las áreas más afectadas durante las intensas lluvias de 1999. Estos flujos superficiales ocurrieron en laderas de las cuencas de Camurí Chico, Quebrada Seca y Naiguatá

La selección de los deslizamientos en forma de flujo fue realizada con extremo cuidado de forma de evitar medir aquellos que aparentaban ser el resultado de flujos superficiales contiguos. La distribución de frecuencia de anchos de flujos superficiales se muestra en la Figura 11. Puede observarse que los anchos más frecuentes medidos están entre 10 y 20 m, y que 68% de los anchos medidos están entre 10 y 25 m. Estos valores son similares a los observados por Wolle y Hachich. De manera de tener una idea de la cantidad de material aportado por los deslizamientos superficiales a los flujos torrenciales, se realizó un cálculo en las cuencas de Quebrada Seca y Naiguatá. Para ello se determinó el área afectada por dichos flujos superficiales, asumiendo una masa de suelo con un espesor de 1.0 m.

Los resultados indican que solamente para las laderas de la cuenca baja, donde afloran rocas de la Fase Tacagua, el material movilizado fue de 285.000 m³ y 486.000 m³, para la cuenca de Quebrada Seca y Naiguatá, respectivamente.

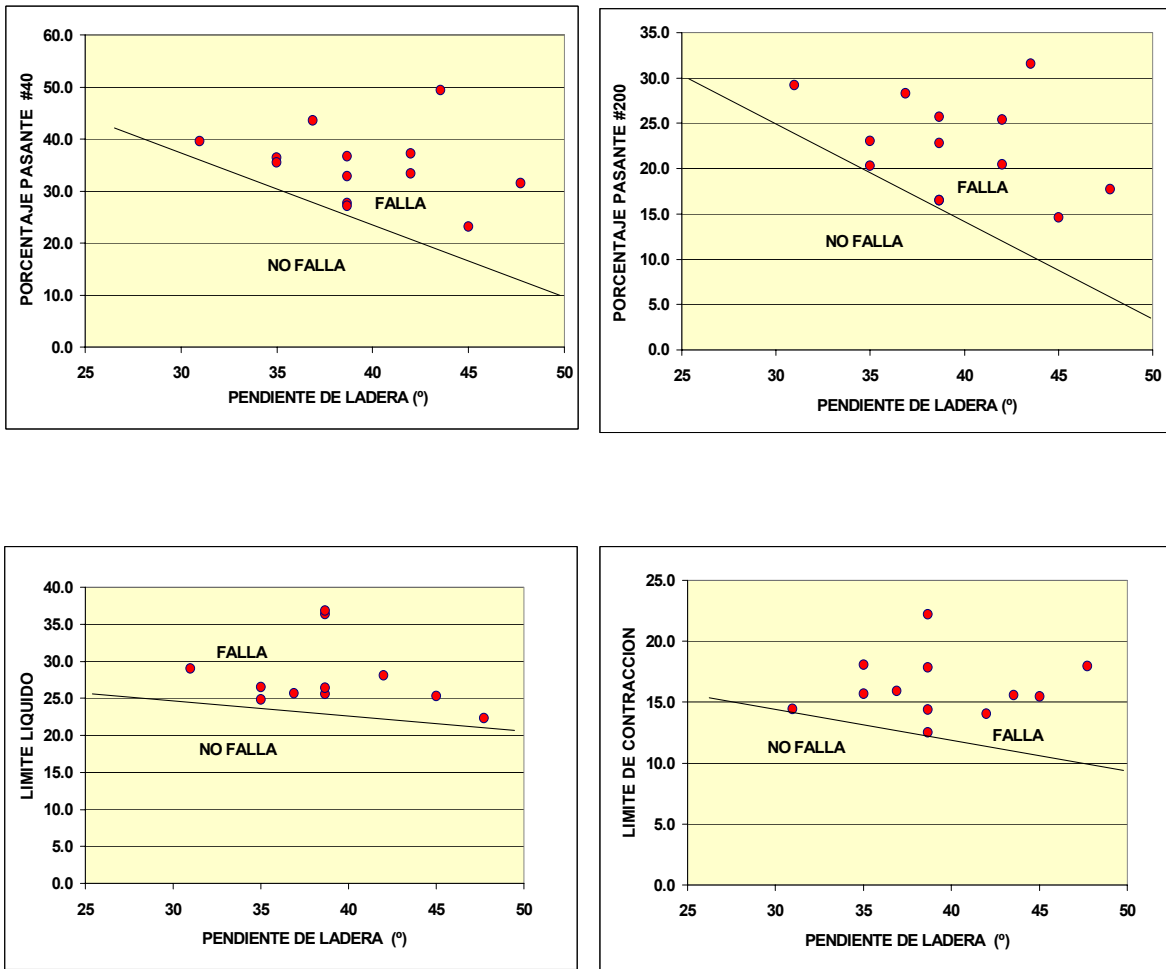


Fig. 10. Relación entre algunas propiedades geotécnicas y la pendiente de laderas afectadas por flujos superficiales traslacionales, durante el evento de Diciembre 1999.

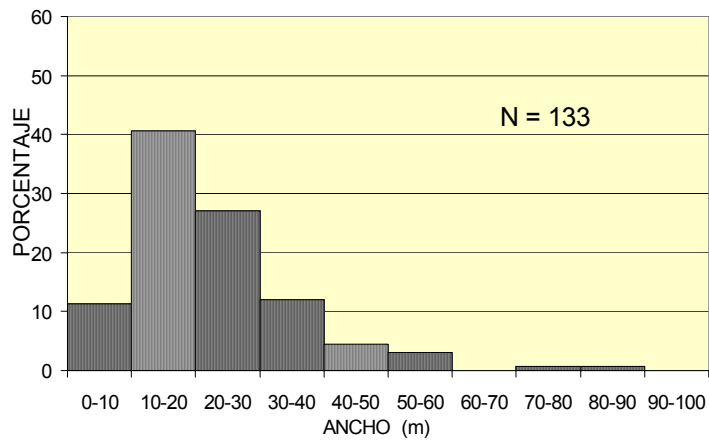


Fig. 11. Distribución de frecuencia. Ancho de deslizamientos en forma de flujos traslacionales individuales. (Cuencas de Camurí Chico, Quebrada Seca y Naiguatá).

Si se toman en cuenta todos los deslizamientos en forma de flujos superficiales para toda la cuenca, los cuales no pueden ser medidos en forma precisa porque no se dispone a la fecha de fotografías aéreas de la cuenca alta, se estima que el material aportado por los flujos superficiales probablemente alcance 3 y 6 veces más los volúmenes previamente mencionados, para la cuenca de Quebrada Seca y Naiguatá, respectivamente. En resumen, se estima que el material movilizado en las laderas de la cuenca de Quebrada Seca alcanza unos 900.000 m³, y aproximadamente 3 millones de metros cúbicos en la cuenca de Naiguatá. Estimaciones realizadas por la misión de la Japan International Cooperation Agency y el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales de Venezuela (2000), revelan cifras de 1.6 millones de m³ y de 670.000 m³ de sedimentos depositados en los conos de San Julián y Camurí Chiquito, respectivamente.

7.2 Deslizamientos en masas rocosas

Además de los flujos superficiales, durante los recorridos de campo y vuelos en helicóptero se observaron, aunque con mucho menor frecuencia y en cantidades significativamente menores en comparación con flujos superficiales, deslizamientos que involucraron masas rocosas. Típicos ejemplos se detectaron en las cuencas medias y altas de Piedra Azul, Macuto, El Cojo, Camurí Chiquito y San Julián. Fallas del tipo planar y fallas cuneiformes a nivel local, también fueron observadas durante el trabajo de campo.

7.3 Formación de diques naturales constituidos por troncos de árboles, bloques y fragmentos de rocas, y otro sólidos.

Durante los recorridos de campo se observaron numerosas evidencias en sitios donde se generaron diques naturales de troncos de árboles, bloques y fragmentos de rocas y otros sólidos tales como vehículos y escombros, los cuales se rompieron posteriormente por el empuje del flujo torrencial detrás de los mismos.

Ejemplos típicos de diques naturales se observaron en la Quebrada Catuche. La Figura 12 muestra una foto tomada mirando hacia aguas abajo, de un dique natural que se formó en una zona al pie del Cerro El Avila, en la quebrada Catuche. Este dique natural forzó al flujo torrencial a cambiar su dirección hacia la ciudad formal dirigiéndose hacia la Calle Los Mecedores y posteriormente a la Calle Sabana del Blanco, causando severos daños en numerosas viviendas. Puede observarse en el lado izquierdo de la Figura 12, los bloques de roca depositados debido al impacto del flujo torrencial contra el dique natural temporal.



Fig. 12. Dique natural formado en la quebrada Catuche durante el evento, el cual originó el desvío del flujo torrencial hacia la ciudad formal y luego colapsó.

Otro excelente ejemplo de formación de diques naturales durante el evento, pudo observarse en la Calle Casablanca de la Urbanización Palmar Este en el Cono de deyección de San Julián. (Véase Figura 13). En dicha foto puede apreciarse claramente que la caída de un tronco de árbol en forma perpendicular al eje de la calle, en conjunto con bloques de rocas, generó un dique natural que impidió que el flujo torrencial siguiera su curso por dicha calle, evitando que las viviendas allí construidas sufrieran daños.

La formación de diques naturales respalda los testimonios de personas que sobrevivieron la catástrofe, quienes describieron la ocurrencia de “olas” después de periodos donde aparentemente el nivel de agua disminuía y daba la impresión de que lo peor ya había pasado. Este factor fue responsable de un incremento significativo en el número de víctimas.



Fig. 13. Dique natural formado durante el evento en el abanico aluvial de San Julián, el cual permaneció estable durante los flujos torrenciales de Diciembre 1999.

7.4 Efecto de troncos de árboles

Los troncos de árboles actuaron como auténticos torpedos o misiles, destruyendo paredes y columnas de viviendas y apartamentos de edificios, tal como se puede apreciar en la Figura 14. En el Litoral Central, un gran número de troncos de árboles fue transportado hasta la costa y depositados en la playa.



Fig. 14. Daño causado por un tronco de árbol en una vivienda de la quebrada Catuche, Caracas.

7.5 Impactos de bloques de rocas

Los impactos de bloques de rocas a viviendas y edificaciones en general fueron responsables de graves daños a estructuras. Las Figuras 15 y 16 muestran típicos tamaños de rocas transportados por los aludes torrenciales.



Fig. 15. Bloque de roca transportado por el flujo torrencial. Cuenca San Julián.



Fig. 16. Depósitos del flujo torrencial de Camurí Chico, mostrando un bloque de roca transportado sobre sedimentos gravo-arenosos.

Durante los reconocimientos de campo fue posible observar bloques de roca con pesos estimados entre 500 y 2000 toneladas, y evidencias de bloques grandes de roca transportados por una matriz más fina (Véase Figura 17). En la Figura 18 se muestran dos edificios, ubicados en el cono de deyección de San Julián, donde se observan secciones colapsadas debido a la falla de las columnas de concreto reforzado por el impacto de bloques de roca. La habilidad que tienen los flujos de detritos para transportar y soportar grandes bloques individuales de roca, ha sido

estudiada por Rodine y Johnson (1976). Los autores describen como flujos torrenciales cargados con material grueso pueden transportar grandes bloques de roca y aún fluir en pendientes suaves.



Fig. 17. Bloques de roca transportados sobre sedimentos granulares más finos en el cauce de Quebrada Osorio.

Algunos investigadores como Zhang (1993) han estudiado la fuerza de impacto generada por flujos torrenciales. Esta fuerza consiste en dos partes, una debida a la presión dinámica del fluido y una fuerza de choque de un bloque de roca individual. Solamente como información de registros medidos en campo, Zhang reportó fuerzas de impactos medidas en China con presiones dinámicas del fluido hasta de 500 t/m^2 , y fuerzas de impacto hasta de 318 toneladas para el caso de un bloque individual.

Considerando los daños severos que causan los bloques de roca a las obras de ingeniería, las medidas correctivas típicas están orientadas al diseño de presas para bloquearlos en la parte media y alta de las cuencas.

7.6 Evidencias de erosión en terrazas antiguas y reactivación en algunos conos de deyección

Con relación a los grandes bloques transportados por el flujo torrencial de Diciembre 1999 en varias de las cuencas afectadas, hay diferencias de criterios en cuanto a su origen. Unos profesionales apoyan la hipótesis de que dichos bloques vinieron transportados de la parte superior de la cuenca, producto de deslizamientos en las laderas. Otros consideramos que la mayor parte de los bloques grandes de rocas estaban en el cauce, en terrazas aluviales y dentro del cono de deyección existente, y simplemente fueron erosionados y movidos de su posición hacia aguas abajo.

Debido a que el mayor porcentaje de fragmentos de rocas depositados por el flujo torrencial son subredondeados a redondeados, y muy pocos de ellos son angulares a subangulares, también ha sido un punto de discusión si un bloque angular de una roca de alta resistencia proveniente de un deslizamiento, puede redondearse en solamente dos días por la acción del flujo torrencial.

De acuerdo a las observaciones detalladas de campo realizadas por el autor de este trabajo, hay suficientes evidencias de que algunos bloques quedaron al descubierto y ni siquiera fueron movidos de su posición, sin embargo todo el material alrededor de ellos fue completamente erosionado. Esta aseveración puede ser confirmada mediante la observación de la foto de la Figura 19, tomada en el Río Naiguatá.

Otros sitios inspeccionados por el autor revelan erosión de los sedimentos de los cauces y de viejas terrazas aluviales exponiendo en los cortes verticales tanto depósitos aluviales como flujos torrenciales prehistóricos (Véase Figura 20). Claras evidencias de reactivación de conos de deyección y de erosión de sedimentos de terrazas antiguas, fueron observadas por el autor de este

trabajo, en las cuencas de Naiguatá, San Julián, Quebrada Seca, Carmen de Uria, Camurí Chico y El Cojo.

En resumen, en opinión del autor, la mayoría de los bloques de rocas transportados por los flujos torrenciales vinieron de la erosión de los sedimentos existentes en la garganta de las quebradas y ríos y de la reactivación de los conos de deyección. Un porcentaje muy pequeño de bloques de rocas estaba en el lecho del río, depositados allí por deslizamientos y desprendimientos antiguos de rocas, y fueron transportados aguas abajo. Un porcentaje todavía más pequeño de rocas vino de deslizamientos en masas rocosas que se originaron en las laderas de las cuencas medias y altas durante la lluvia intensa de Diciembre 1999

Es conveniente destacar, además, que el autor encontró en campo muchas evidencias de flujos torrenciales prehistóricos. El hecho de que en muchos de los conos de deyección se encuentren bloques de rocas metaígneas, las cuales pertenecen a unidades litológicas que afloran en las cuencas medias y altas, es una fuerte evidencia de que en el pasado ocurrieron flujos torrenciales más grandes que el evento de Diciembre 1999, y/o múltiples eventos de menor magnitud que fueron progresivamente transportando dichos bloques desde niveles superiores hasta la garganta y conos de deyección.

Las evidencias de erosión durante el evento de Diciembre 1999, han sido tratadas en forma más detallada por Salcedo y Martínez (2002).



Figura 18. Vista de edificios dañados estructuralmente por el impacto de bloques de roca. (Cono de San Julián). El flujo torrencial pasó a través del tercer piso del edificio mostrado en la última foto.



Fig. 19. Bloque de roca que permaneció en sitio, erosionándose el material que lo circundaba. Nótese aureola de meteorización color negruzca, en la parte superior del bloque que estaba expuesta. (Río Naiguatá).



Fig. 20. Evidencias de erosión en terrazas antiguas en la margen Este del Río San Julián. La altura de la terraza en este sitio, es de 8 metros.

8. DAÑOS E IMPACTOS SOCIO-ECONOMICOS Y AMBIENTALES.

Los daños e impactos generados por el desastre de Diciembre 1999, han sido evaluados por el Consejo Nacional de la Vivienda (CONAVI), por la Comisión designada por la “Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), la Oficina del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Corporación Andina de Fomento (CAF), y por la CEPAL. El siguiente resumen ha sido elaborado con base en la información de tales referencias, complementándolos con noticias de prensa y alocuciones oficiales del Ministro de Ciencias y Tecnología.

- Numerosas viviendas total y parcialmente destruidas. De acuerdo al reporte del Consejo Nacional de la Vivienda (CONAVI) (Villanueva, 2000), solamente en el Estado Vargas más de 8.000 unidades residenciales fueron severamente dañadas, 67% de ellas totalmente destruidas, y 33% parcialmente destruidas. Un total de 3.140 apartamentos de 700 edificios residenciales fueron completamente o parcialmente destruidos. Estos edificios fueron afectados bien por sedimentación de barro, rocas y escombros del flujo torrencial en sus sótanos y primeros pisos, o dañados estructuralmente por el impacto de bloques de roca. El número de viviendas afectadas y las pérdidas económicas por afectación de redes de agua potable y aguas servidas se resumen en la Tabla 4. La Tabla 5 muestra la estimación de pérdidas económicas por sectores en todo el país. El 72% de la población del Estado Vargas (240.000 personas) fue afectada por el desastre. El Gobierno Nacional tuvo que implementar un Plan de adjudicación de viviendas para atender a 55.653 familias damnificadas.

Tabla 4. Daños estimados (Estado Vargas) (Fuente: alocución Ministro de Ciencias y Tecnología, 2000).

VIVIENDAS	
100% DESTRUIDAS	5342
PARCIALMENTE DESTRUIDAS	2667
TOTAL VIVIENDAS AFECTADAS	8009
ACUEDUCTOS	
REDES DE AGUA POTABLE	5000 M
COSTO	US\$ 615,000
REDES DE AGUAS SERVIDAS	
COSTO	US\$ 770,000

- Aun cuando no existe información oficial acerca del número de víctimas, diferentes instituciones han estimado cifras muy variadas, generalmente entre 5.000 y 50.000 muertos. Defensa Civil ha reportado que 114.000 personas fueron evacuadas del Estado Vargas y que la mayoría de ellas fueron trasladadas a carpas y sitios de refugios temporales ubicados en diferentes zonas del país. Los Aeropuertos de Maiquetía y La Carlota funcionaron como centros de operación, desde donde los afectados fueron ubicados en 1.200 refugios provisionales a nivel nacional.
- Según la PAHO (Panamerican Health Organization) Nueve hospitales y 251 Centros ambulatorios fueron afectados en diversos grados en los Estados Vargas, Miranda, Falcón y Yaracuy. Todos los centros hospitalarios del país fueron declarados en emergencia.

Tabla 5. Estimación de pérdidas económicas por sectores en todo el país. (Comisión OCHA – PNUD – CAF, Enero, 2000)

SECTOR	SUBSECTOR	SUBTOTAL Millardos de Bolívares	SUBTOTAL Millones de dólares
INFRAESTRUCTURA	Vías de comunicación (troncal)	60	90
	Vías de comunicación (rural)	30	46
	Puentes	50	76
	Represas y diques de control	45	68
	Sistema de agua potable	80	120
	Sistema de aguas servidas	40	60
	Puertos y Aeropuertos	2	3
	Escolleras costeras	30	46
	Torre toma	6	9
	Remoción de escombros	30	46
SALUD	Hospitales	14	21
	Ambulatorios	7	11
VIVIENDA	Unifamiliares	200	303
	Multifamiliares	100	150
	Iglesias y monumentos	100	150
EDUCATIVO	Universitario y laboratorios	50	76
	Liceos y equipamiento	20	30
	Escuelas y equipamiento	32	49
ENERGIA ELECTRICA	Sub-estaciones	70	106
	Líneas de transmisión (Torres)	5	8
	Redes de distribución	50	76
SERVICIOS	Policía y bomberos	10	15
	Puertos y aeropuertos	6	9
	Remoción de tóxicos	30	46
PRODUCCION Y COMERCIO	Industrias	4	6
	Microempresas	7	11
	Agricultura	16	24
	Ganadería	14	22
TRANSPORTE	Privado (Vehículos)	3	5
	Público (autobuses)	10	15
	Público (taxis)	1	1.5
TURISMO (Infraestructura) Y PARQUES NACIONALES	Clubes privados	40	61
	Hoteles y Servicios	2	3
	Parques nacionales	5	7.5
	Playas: limpieza y consolidación	50	76
SEGUROS Y REASEGUROS	Todo riesgo, incluida inundación	5	7.5
BANCA	Préstamos irrecuperables	5	7.5
GRAN TOTAL		1234	1860

En el lado Sur del Cerro El Avila, la crecida de la quebrada Cotiza inundó el Hospital Oncológico Luis Razzetti. Los equipos y áreas de radiología, medicina nuclear, anatomía patológica, laboratorios, historias médicas, quedaron sepultados por una capa de 1.5 m de agua y lodo. También se inundaron en su planta inferior el Hospital Rízaques y las áreas de emergencia de los Hospitales Periférico de Catia y de Coche. El desbordamiento de la quebrada Anaúco en el lado Sur del Avila, inutilizó la maternidad Santa Ana de San Bernardino.

- Cuarenta escuelas quedaron fuera de operación, lo que representa un 30% de la infraestructura física educativa.
- Dos unidades del Cuerpo de Bomberos quedaron tapiadas.
- El servicio de electricidad interrumpido en el Litoral Central. Caída de postes de alta y baja tensión y deslizamientos en vías de mantenimiento de redes eléctricas.
- Más de 52000 suscriptores de la Compañía Nacional de Teléfonos en el Litoral Central quedaron incomunicados. La red de fibra óptica quedó destruida en uno de los tramos de la Autopista Caracas-La Guaira que fue afectado por erosión y deslizamientos. El cable submarino entre Camurí y Carúpano fue afectado por un corte en el lecho marino.
- El servicio de agua potable fue interrumpido en el Litoral Central. Según Hidrocapital 5000 metros de redes de agua potable con diámetros entre 12 cm y 50 cm fueron totalmente destruidos. Una planta de cloración quedó totalmente destruida. El sistema que surte a las poblaciones de Guarenas, Guatire y Caucagua, quedó fuera de servicio. Más de cinco Estaciones de bombeo del lado Este del Litoral quedaron inutilizadas. De las 18 estaciones que prestan servicio a Catia La Mar, quedaron solo 6 con posibilidad de operar una vez que se restituyan las tuberías.
- El sistema de aguas servidas del Litoral Central se ha estimado que se perdió en un 70%. La ruptura de los sistemas de cloacas representa un impacto ambiental importante por la contaminación orgánica correspondiente.
- La Autopista Caracas-La Guaira, principal arteria vial entre Caracas y el Litoral, fue afectada por numerosos deslizamientos de taludes de corte y por pérdida de la plataforma de la vía en un tramo de unos 60 m. En el Estado Zulia tres carreteras quedaron bajo las aguas, y en el Estado Falcón colapsaron dos vías entre Coro y Churuguara y la vía entre Chichiriviche y Sanare. La región oriental del país se incomunicó por colapso de la carretera de la Costa. Numerosos deslizamientos ocurrieron a lo largo de la carretera del Litoral Central interrumpiendo totalmente el paso. Se estimó que la vialidad troncal en el Estado Vargas fue destruida en un 85%.
- Las crecidas de las quebradas adyacentes al Puerto de La Guaira arrastraron numerosos contenedores que estaban allí almacenados, llevando muchos de ellos hasta el mar. Algunos de estos contenedores contenían desechos tóxicos lo que ameritó la pronta intervención de especialistas del Ministerio del Ambiente y de Recursos Renovables, y asesores extranjeros. Hubo necesidad de desviar los barcos a puertos alternos como Puerto Cabello y Guanta. Se ha estimado que debido a las limitaciones en el funcionamiento del Puerto, el Estado deja de percibir unos US\$ 40,000.00 diarios durante los 45 días que se estimó duraría la paralización.
- Las comunicaciones aéreas en el Aeropuerto Internacional de Maiquetía fueron suspendidas por dieciocho días, ocasionando pérdidas a las líneas aéreas que se estima superan los diez millones de dólares.
- La represa El Guapo en el Estado Miranda, colapsó completamente, inundando todas las poblaciones y vías de comunicación aguas abajo. La alerta implementada por la Gobernación del Estado Miranda, una vez que se inició el proceso de falla de la represa, disminuyó significativamente el número de víctimas.
- El volumen importante de flujo torrencial que fue transportado en las diferentes cuencas hacia el mar, originó cambios importantes en la morfología de las playas, modificando el frente costero. En algunos casos la costa se desplazó hasta 300 m de su posición original. La gran cantidad de sedimentos también trajo como consecuencia cambios en la textura sedimentaria de las playas y cambios batimétricos importantes. Gran cantidad de escombros, troncos de árboles y materia

orgánica se depositaron en las playas. Después de las obras de despeje y remoción de escombros, se determinó que el litoral central había ganado 1.020 Hectáreas de nuevas tierras.

- Se produjo una contaminación orgánica, biológica y química de las playas, con el consecuente impacto sobre la biota marina y en la dinámica oceanográfica de dichas playas. El impacto más directo en la biota marina es la pérdida de hábitat por acumulación de material alóctono. Este impacto genera una alta mortalidad de organismos sésiles que quedaron sepultados desde la zona litoral hasta una profundidad estimada entre 2 y 3 m. A partir de ese intervalo el impacto más significativo es la alta resuspensión de sedimentos que genera mortalidad al obstruir los mecanismos de respiración de muchos organismos.
- El impacto sobre las pesquerías se reduce fundamentalmente al impacto socio-económico por la afectación de un número de familias de pescadores que habitaban en las zonas de desastre y que además de perder sus viviendas, también perdieron sus botes, motores, aparejos de pesca, redes, etc.
- En cuanto a la flora, gran parte del denominado bosque seco que cubre la franja altitudinal hasta 600 m, se encuentra altamente erosionado, estimándose que un 30% de esas áreas están afectadas.
- La fauna del Parque Nacional El Ávila y la Cordillera Central debe haber sufrido un tremendo impacto por la catástrofe. Muchos mamíferos, reptiles, insectos, aves y otros animales deben haber muerto durante el evento. El instinto de conservación de estos animales debe haber permitido que muchos ejemplares se salvaran. Las aves posiblemente fueron las más afectadas por la pérdida de sus nidos.
- En la Tabla 5 no se han considerado las pérdidas económicas indirectas, las cuales dependiendo de la naturaleza de la afectación pueden llegar a exceder las pérdidas directas. Un ejemplo típico, de acuerdo al Informe de la Comisión OCHA-PNUD-CAF, es la Represa de El Guapo, cuya reposición como estructura de retención de agua, se estima en unos 60 millones de dólares; no obstante la disrupción asociada debido a interrupción del suministro directo de agua a numerosos pueblos durante 2 o 3 años, interrupción de la principal arteria vial hacia el Oriente del país, pérdidas agropecuarias y destrucción de la flora arbórea cuya reposición requiere de decenas de años, reconstrucción de viviendas y otras afectaciones propias de la inundación, implica pérdidas económicas indirectas no cuantificadas en las tablas mencionadas.
- Una vez finalizada la etapa de emergencia, que incluyó el rescate y evacuación por vía aérea (helicópteros) y marítima de unas 135.000 personas, la tarea más importante fue la remoción de más de 15 millones de metros cúbicos que obstaculizaron tanto la vialidad principal y vías secundarias como los canales de más de 25 cauces afectados por flujos torrenciales. Esta actividad requirió de una organización que fijara las normas y estrategias no solo desde el punto de vista técnico sino en cuanto al financiamiento, la forma de contratación, inspección y supervisión. En cuanto a movimiento de tierras se configuraron equipos de trabajos según su complejidad y tipo de material a ser removido. Una estimación de los costos requeridos para atender unos 45 km. de vialidad donde sería necesario remover unos 1230 millones de metros cúbicos, dio como resultado una suma estimada mensual de ocho millones de dólares. La remoción de tierras y su disposición o bote en el mar requirió previamente la definición por parte de especialistas en ingeniería de costas y otras disciplinas, de las zonas más apropiadas para bote de dichos materiales con el fin de no alterar la dinámica oceanográfica. Asimismo, se definieron las zonas donde se colocarían los bloques de rocas que servirían para la construcción de escolleras. Era necesario por lo tanto que la remoción de tierras y escombros se realizara respetando el concepto integral de recuperación de playas y consolidación de terrenos recuperados al mar, y tomando en cuenta las líneas maestras de reconstrucción definidas por los distintos grupos de urbanistas de las Universidades Central de Venezuela, Metropolitana y Simón Bolívar.
- El grupo de urbanistas de las distintas Universidades definió para cada sector la vocación del mismo (residencial, vacacional, ciudad balneario, residencial-recreacional –turístico, etc.) y los

criterios para el aprovechamiento de las tierras en función de sus características. Asimismo se elaboró un plan maestro de desarrollo que incluye la ordenación del territorio y la definición de áreas bajo régimen especial (ABRAE) donde se incluyen aquellas áreas sujetas a estudios y en las cuales se prohíben temporalmente nuevas construcciones y remodelaciones mayores.

Para la definición del Plan Maestro fue necesaria, además de la intervención de urbanistas y arquitectos, la participación de geólogos, ingenieros hidráulicos, ingenieros de costas y otras disciplinas. Los aspectos legales referentes a la tenencia de la tierra y los aspectos socio-económicos, también fueron considerados dentro del Plan Maestro de Desarrollo.

- Cabe destacar que para atender toda la problemática generada por el desastre de Diciembre 1999, en el Estado Vargas concretamente, el Gobierno Nacional creó la denominada Autoridad Unica de Area para el Estado Vargas (AUEV) presidida por el Ministro de Ciencias y Tecnología Ing. Carlos Genatios. Esta institución fue la encargada de impulsar el Plan Maestro de Reconstrucción teniendo como objetivo general la planificación y coordinación de los planes y programas de ordenación del territorio, requeridos para el desarrollo integral del área.

La AUEV trazó los lineamientos del Plan Territorial del Litoral Central, tomando como eje el enfoque del desarrollo sustentable acorde con la vocación y potencial de desarrollo de la región, el cual gira alrededor de la recreación, el turismo, los servicios de comunicaciones y comercio. Luego se creó la Corporación de Desarrollo del Estado Vargas (CORPOVARGAS) encargada de la ejecución de dicho plan.

- La comunidad internacional manifestó su apoyo y colaboración con Venezuela, enviando considerable ayuda material, técnica y financiera, a través de las embajadas acreditadas en Caracas y las misiones diplomáticas y consulares de Venezuela en el exterior. El aporte recibido de 78 países y 28 organismos internacionales fue de 645,56 millones de dólares, sin contar aquellas donaciones de las que no se dispone valor monetario.
- En la Tabla 6 se resumen las pérdidas económicas estimadas por la CEPAL, y en la Tabla 7 se resumen las pérdidas económicas totales, las cuales se estimaron inicialmente en 1.790 Millones de dólares, sin embargo, una evaluación realizada después de un año de la tragedia, alcanza cifras del orden de 4.000 millones de dólares en daños materiales, solamente en el Estado Vargas.

Tabla 6. Cuadro resumen de estimación de pérdidas económicas en el Estado Vargas. (DOLARES AMERICANOS) (CEPAL, Enero, 2000).

VIVIENDA ¹	160.340.438
INFRAESTRUCTURA ²	85.941.714
EQUIPAMIENTO URBANO ³	130.745.296
TOTAL (US\$)	377.027.448

(1) Incluye cantidad de viviendas (rancho, casa-barrio, apartamento urbano, apartamento de descanso, casa de descanso) 100% destruidas. Cantidad de viviendas parcialmente destruidas. Costos aproximados de reposición y reparación.

(2) Incluye calzadas, aceras, movimiento de tierras, sistemas de recolección de aguas de lluvia, alcantarillado, agua potable, y electricidad. Costos aproximados de reconstrucción y reparación de la infraestructura urbana.

(3) Incluye parques y áreas verdes, áreas deportivas, educación, obras asistenciales, otros equipos colectivos, expendios de gasolina, y comercios. Costos aproximados de reposición y reparación del equipamiento urbano.

Tabla 7. Daños estimados (Estado Vargas)
 (Fuente: alocución Ministro de Ciencias y Tecnología, 2000)

VIVIENDAS	
100% DESTRUIDAS	5342
PARCIALMENTE DESTRUIDAS	2667
TOTAL VIVIENDAS AFECTADAS	8009
ACUEDUCTOS	
REDES DE AGUA POTABLE	5000 m
COSTO	US\$ 615,000
REDES DE AGUAS SERVIDAS	
COSTO	US\$ 770,000

9. PREDICCIÓN DE FLUJOS TORRENCIALES, CON BASE EN REGISTRO DE LLUVIAS.

Muchos investigadores han propuesto correlaciones entre precipitaciones de lluvias y deslizamientos, todas ellas orientadas a predecir eventos catastróficos como los flujos torrenciales de Diciembre 1999. Entre las metodologías publicadas se pueden citar las publicadas por Vargas (1971), Aboshi (1972), Lumb (1975), Gudicini e Izawa (1977), Okuda et al (1981), Brand et al (1984), Rat (1984), Wollw y Hachich (1989), Johnson y Sitar (1990), y Bhandari et al (1991).

Aboshi (1972) sugirió que se puede predecir la falla de laderas correlacionando la lluvia total caída durante dos semanas antes del día previo, y la lluvia de dicho día. Esta correlación se muestra en la Figura 21a. Si se representan los registros de la Estación Maiquetía, se puede deducir que para el día 14 de Diciembre, el evento se encontraba en la región definida en el gráfico como “desastre severo”. Puede verse en el mismo gráfico elaborado a una escala diferente en la Figura 21b, cuanto lejos se estaba el 16 de Diciembre de 1999, de la curva que define el umbral de grandes desastres. La experiencia japonesa con este tipo de gráficos es muy valiosa. Según Sassa (1985) en Japón existen 62.272 torrentes susceptibles a ser afectados por flujos torrenciales y por tal razón se ha hecho un gran esfuerzo para desarrollar medidas preventivas, instrumentación y sistemas de alerta.

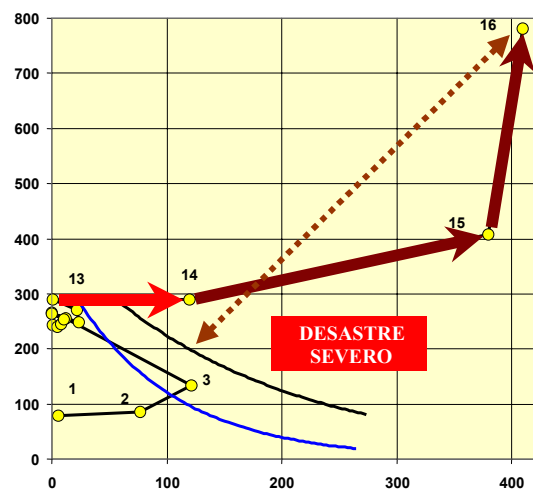
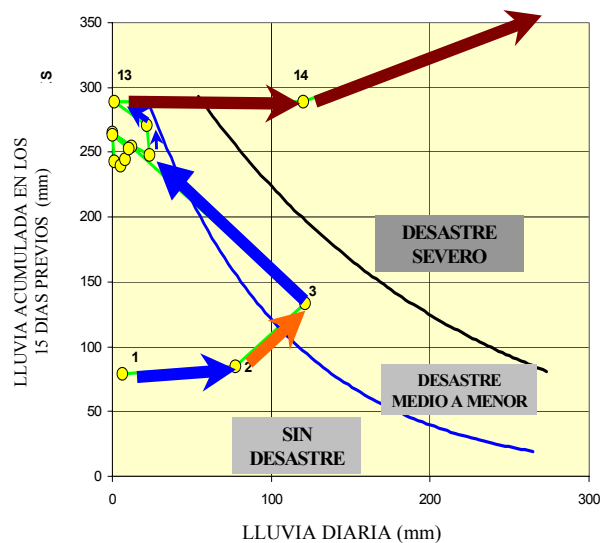


Figura 21(a) y (b). Registro de lluvias de Diciembre 1999 en la Estación Maiquetía, representados en el gráfico de Aboshi.

Una evaluación de los registros de lluvias de Diciembre 1999 basada en las recomendaciones arriba indicadas, llevan a la conclusión de que la mayoría de los procedimientos sugeridos en la literatura técnica pudieron explicar la ocurrencia de los flujos torrenciales. Una investigación detallada de los distintos flujos torrenciales que se generaron en las diferentes cuencas, permitirá desarrollar nuestras propias curvas de umbrales con el fin de predecir este tipo de eventos. Lamentablemente, para el momento de la ocurrencia del evento, solamente una estación de registro de lluvias estaba operativa, la cual no es representativa de las lluvias que han debido precipitarse sobre el Cerro El Avila. De cualquier manera, considerando que más de 25 cuencas fueron afectadas por flujos torrenciales, estamos ante una oportunidad de iniciar un programa extensivo de investigación con el fin de comprender la iniciación y mecanismos de estos eventos con el fin de diseñar las medidas correctivas y de mitigación de los mismos.

10. OBRAS DE CONTROL DE TORRENTES

Para la fecha de elaboración del presente artículo (Diciembre, 2005), se han construido un total de 22 presas incluyendo tanto las del tipo abiertas como cerradas, en once de las cuencas afectadas durante el evento de 1999. La primera presa abierta en construirse, fue diseñada con dientes de concreto (Figuras 22 y 23), y demostró su eficiencia como presa de retención de sedimentos y troncos de árboles, tal como puede verse en las fotos de la Figura 24, las cuales fueron tomadas al final de su construcción en Diciembre del 2000, y luego de unas precipitaciones importantes que ocurrieron en Diciembre del año 2001. La mayoría del resto de las presas ha sido construida con cestas de gaviones revestidas de concreto, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 25. El comportamiento de este último tipo de presas, podrá evaluarse en futuras precipitaciones importantes.



Fig. 22. Foto aérea de la garganta de la Cuenca Guanape, mostrando ubicación de la presa de retención de sedimentos.



Fig. 23. Presa abierta con área cerrada para acumulación de sedimentos y canal de concreto, en Cuenca Guanape.



Fig. 24 Presa abierta de concreto en la Cuenca Guanape (Punta de Mulatos). Fotos comparativas tomadas en Diciembre de 2000 al final de construcción, y luego de lluvias fuertes en Diciembre 2001.



Fig. 24 Presa abierta de gaviones revestidos con concreto.
Presa Las Comadres, afluente de la Quebrada Piedra Azul.

11. COMENTARIOS FINALES.

Considerando su extensión, magnitud y características especiales, los flujos torrenciales catastróficos de Diciembre 1999, pueden probablemente ser clasificados como el desastre más importante del siglo en su tipo. Este evento que sorprendió a Venezuela sin el desarrollo de una cultura de prevención de desastres, definitivamente representará un hito en nuestra historia y se requerirán nuevas estrategias y un cambio de mentalidad para desarrollar una agenda política en favor de la prevención de desastres.

La ingeniería de la reconstrucción y nuevas regulaciones territoriales tendrán que considerar parámetros adicionales para evitar desarrollos urbanos en áreas vulnerables. En las áreas afectadas por los flujos torrenciales y en otras áreas vulnerables, será necesario, como una de las más importantes actividades, realizar la cartografía y sectorización de zonas de amenaza. Será necesario iniciar un proceso de educación y campañas informativas no solamente para la población sino para los líderes nacionales y los tomadores de decisiones. Los factores socio-económicos y políticos asociados a la prevención de desastres han sido recientemente discutidos por Mora (1999). Será igualmente necesario instalar sistemas de alerta y entrenar a la población de como vivir en áreas clasificadas como de alta amenaza por flujos torrenciales. Es bien conocido que una vez ocurrido el desastre por flujos torrenciales, el costo de recuperación es anormalmente alto, por lo tanto, los esfuerzos que se puedan realizar para prevenir este tipo de eventos no solamente permitirán salvar vidas sino que representarán una disminución importante en los costos.

Dado que los flujos torrenciales en la Costa central Venezolana son mayormente activados por lluvias intensas, para implementar sistemas de alerta y evacuación será necesario definir un índice de precipitación. La experiencia obtenida por otros países como Japón, China y Austria revela que no es fácil establecer una lluvia standard para tales propósitos. De cualquier forma, será necesario evaluar y analizar los flujos torrenciales pasados en relación con otros factores tales como topografía, geología, vegetación, características de las cuencas, etc.

Finalmente, es importante mencionar un factor que debería ser considerado en la etapa de la ingeniería de la reconstrucción. De acuerdo al autor de este trabajo, existen claras evidencias de campo de que el evento de Diciembre 1999 no fue el evento más grande que ha ocurrido en el

área. Una de estas evidencias puede ser observada en los cortes que resultaron por la erosión en los lechos y terrazas de los ríos y en los conos de deyección, donde existen bloques de rocas metaígneas del Complejo El Avila, los cuales pertenecen a unidades litológicas que solamente afloran en las cuencas medias y altas. Evidentemente la existencia de este tipo de rocas en los conos de deyección también podría ser explicada mediante la ocurrencia de diferentes eventos menores que fueron arrastrando progresivamente dichos bloques hacia aguas abajo. También tenemos que tomar en cuenta que muchas otras áreas de Venezuela son vulnerables y pueden ser afectadas en el futuro por flujos torrenciales; en particular debe ser mencionada la zona Norte de la ciudad de Caracas al pie del Cerro El Avila, donde muchas urbanizaciones han sido construidas sobre conos de deyección con evidencias de flujos torrenciales prehistóricos.

Singer (1974 y 1977), cartografió varios flujos torrenciales en el Valle de Caracas, estimando que probablemente fueron activados por sismos y que ocurrieron entre los años 1100 y 1500.

AGRADECIMIENTOS.

El autor desea agradecer a J. Ortas, E. Martínez, J. M. Martínez y N. Flores por su cooperación y consejos durante la realización del trabajo. El autor desea asimismo expresar un agradecimiento muy especial al Consejo Nacional de la Vivienda, particularmente a J. Baldó y F. Villanueva quienes me dieron la oportunidad de colaborar durante la fase de emergencia y post-emergencia del evento, suministrando además material y valiosas informaciones sin los cuales no hubiese sido posible la elaboración del presente artículo. Finalmente, el autor expresa su sincero reconocimiento a la contribución de los habitantes del Estado Vargas y de las áreas en el área metropolitana de Caracas que fueron directamente afectadas por los flujos torrenciales de Diciembre 1999.

REFERENCIAS.

- Aboshi, T. (1972). "Concentrated rainfall and slope failure." (In Japanese). Sekou-gijutu. Vol. 5. No. 11. Cited in *Manual for Zonation on Areas Susceptible to Rain-induced Slope Failure*. Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE. Japanese Geotechnical Society, July 1977.
- Bhandari, R. Senanayake, K., and Thayalan, N. (1992). "Pitfalls in the prediction on landslide through rainfall data". Landslides. *Proc. of the 6th International Symposium. Christchurch. New Zealand. Balkema Rotterdam*. pp. 887-890.
- Brand, E, Premchitt, Phillipson, H (1984). "Relationship between rainfall and landslide in Hong Kong." *Proc. 4th International Symposium on Landslides*. pp. 377-384.
- Eischbacherr, G. and Clague, J (1981). Urban landslides in the vicinity of Vancouver, British Columbia, with special reference to the December 1979 storm. *Canadian Geotechnical Journal*. 18. pp. 205-216.
- Grases, J. Amundaray, J, Malaver, A., Feliziani, P., Franceschi, L., and Rodríguez, J. (2000). "Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en Diciembre de 1999." Informe Comisión. OCHA-PNUD-CAF.
- Gudicini, G. and Iwasa, D (1977). "Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment." *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 13-20. Symposium Landslides and other Mass Movements.
- Harp et al (1995). "Landslides triggered by the January and March 1995 storms in Southern California." *Landslides News*. No. 9, December. pp. 15-18.
- Hollingsworth, R., and Kovacs, G. (1981). "Soil slumps and debris flows: Prediction and protection." *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. Vol. XVIII. No. 1. pp. 17-28.

- Ikeya, H. (1989). "Debris flows and its countermeasures in Japan." *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 40. pp. 15-33.
- Jakob, M., Hungr, O., and Thomson, B. (1997). "Two debris flows with anomalously high magnitude." *Proc. of First International Conference on Debris Flows: Hazards mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*. San Francisco, California. pp. 382-394.
- Japan International Cooperation Agency and Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (2000). "Proyecto de Control de Torrentes de las Cuencas de los Ríos San Julián y Camurí Chiquito." Informe inédito. 261 p.
- Johnson, K and Sitar (1990). "Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation." *Canadian Geotechnical Journal*. 27. (6). pp. 789-801.
- Johnson, S. (1997). "Tumalt Creek debris flows and debris avalanches in the Columbia River Gorge East of Portland, Oregon." *Proc. of First International Conference on Debris Flows: Hazards mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*. San Francisco, California. pp. 395-404.
- Lee, H., Ellen S. and Kayen, R (1988). "Predicting transformation of shallow landslides into high speed debris flows". *Proc. 5th Int. Symposium on Landslides*. Balkema. pp. 713-718.
- Lumb, P. (1975). "Slope failures in Hong Kong." *Quarterly Journal of Engineering Geology*. (8). pp. 31-65.
- Mora, S. (1999). "Disaster Prevention and the development agenda in Central America: Socioeconomic and political factors." In *Slope Stability Engineering*. Yagi and Jiang. Balkema, Rotterdam.
- Okuda, S. Suwa H., Okunishi, K., Yokoyama, K. and Ogawa, K (1981). "Synthetic observation on debris flow. "Part 7. Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. No. 24B-1. pp. 411-448 (In Japanese).
- Rodine, J. and Johnson A. (1976). "The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes." *Sedimentology* 23. pp. 213-234.
- 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. y Martínez, E. (2002). "Evidencias de erosión profunda durante los flujos torrenciales de Diciembre 1999, en el Estado Vargas, Venezuela. Memorias 1er. Simposio Latinoamericano de Control de Erosión. Bucaramanga, Colombia. Editor: Jaime Suárez Díaz.
- Sassa, K (1985). "Motion of landslides and debris flows." *Proc. XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco. Theme Lecture. Session 3A.
- Singer, A. (1974). "Acumulaciones catas-tróficas de posible origen sísmico, y movimientos neotectónicos de subsidencia en la parte oriental del Valle de Caracas." *Primer Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Caracas.
- Singer, A (1977). "Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas, Venezuela." *V Congreso Geológico Venezolano*. Caracas. pp. 1861-1892.
- Takahashi, T, (1991). *Debris Flows*. IAHR. Monograph. A.A. Balkema. 165 p.
- Tianchi, L. et al (1992). "Mountain hazards and environment in China." Institute of Mountain Hazards an Environment. Southwest Jiatong University Press.
- Vargas, M (1971). "Effect of rainfall and ground water levels." *Proc. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 4th International Symposium on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. pp. 138-141. New York.
- Villanueva, F. (2000). "Documento sinótipco de los análisis, conclusiones y recomendaciones de la comisión de expertos en Hidráulica, Geotecnia, Estructuras y Urbanismo." Informe del Consejo Nacional de la Vivienda, Ministerio de Infraestructura. Caracas.
- Wan, Z. and Wang, Z. (1994). "Hyperconcentrated Flow." Monograph. Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research. Beijing. People's Republic of China. A.A. Balkema.

- Wieczorek, G., Larsen, M., Eaton, S., Morgan, B. & Blair, L. (2002). Debris flow and flooding deposits in coastal Venezuela associated with the storm of December 14-16, 1999. USGS Geological Investigation Series. Map I-2772, 2 Plates.
- Wolle, C. and Hachich, W. (1989). "Rain-induced landslides in Southeastern Brazil." *Proceedings of the XII International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil. pp. 1639-1642.
- Zhang, Schucheng (1993). "A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China." *Natural Hazards* 7. pp. 1-23.