

## A general overview of the debris flows of december 99 in Venezuela

José Luis López<sup>1</sup>, David Pérez-Hernández<sup>2</sup> y Reinaldo García-Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Apartado Postal 47725, Los Chaguaramos, Caracas 1041-A. Tel. 605-3131, 605-3040 (Fax).

<sup>2</sup>Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Venezuela.

E-mail: jlopez@imf.ing.ucv.ve

### Abstract

The torrential flows that occurred in Venezuela in December 1999 produced the worst natural disaster in this country and maybe in Latin America. In this paper a general overview of the debris flows that took place in about 20 streams along the north central Venezuelan coast is presented. First, the major debris flow events that have occurred in Venezuela are summarized, and then the main hydrologic and sedimentologic aspects of the 1999 mudflows are discussed. The magnitude of the maximum flow discharges, and the characteristics and volumes of sediment accumulation in some basins, based on field observations, indicate that the torrential flows that took place in Venezuela were a unique event, generating hyperconcentrated flows in the morning of December 16, 1999 in most of the streams in the State of Vargas.

**Key words:** Debris flows, disaster, Venezuela.

## Una visión panorámica de los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela

### Resumen

Las lluvias torrenciales ocurridas en Venezuela en Diciembre de 1999 produjeron la peor catástrofe natural que se haya producido en Venezuela, y una de las peores de Latinoamérica. En este trabajo se realiza una evaluación integral de los flujos de lodos y escombros ocurridos en unas 20 quebradas del Litoral Central. Inicialmente se resumen los principales aludes torrenciales ocurridos en Venezuela y posteriormente se efectúa una caracterización hidrológica y sedimentológica de los flujos de barro ocurridos en Diciembre de 1999. La magnitud de los caudales pico del flujo, y las características y los volúmenes de acumulación de sedimentos en algunas cuencas, indican que el evento fue de carácter extraordinario generando flujos hiperconcentrados en la mañana del 16 de Diciembre en la mayoría de las cuencas del Estado Vargas.

**Palabras clave:** Flujos de barro, desastre, Venezuela.

### Introducción

Las lluvias que se produjeron en el Estado Vargas, Venezuela, el 15 y 16 de Diciembre de 1999 causaron la peor tragedia de origen hidrometeorológico de que se tenga conocimiento en el país, y posiblemente en Latinoamérica. Casi simultáneamente, como en una reacción en cade-

na, ocurrieron crecientes extraordinarias en la mayoría de las quebradas del Litoral Central, arrastrando consigo peñones, árboles y sedimentos finos, hasta depositarlos en los abanicos fluviales o conos de deyección, que en algunos casos se extendieron más allá de la línea de costa, ganándole terreno al mar. Barrios y urbanizaciones enteras fueron barridos por las avalanchas de lo-

dos y escombros que descendieron de la montaña. Defensa Civil reporta 64.700 casas dañadas y más de 23.000 destruidas. Las pérdidas en vidas humanas se calculan aproximadamente en 15.000 personas y los daños materiales superan los dos mil millones de dólares.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Corporación Andina de Fomento (CAF) publicaron un extenso reporte describiendo las causas y los efectos de las lluvias caídas en Venezuela en Diciembre de 1999 [1]. CONAVI [2] elaboró un informe técnico recomendando medidas y acciones a tomar a corto plazo para solventar y minimizar la problemática generada por los deslaves. Aguirre y Jáuregui [3] realizaron un estudio hidrológico e hidráulico de los ríos Naiquatá y Camurí Grande, proponiendo medidas correctivas para prevenir una tragedia similar a futuro. El objetivo principal de este trabajo es presentar una visión global y panorámica de los aludes torrenciales que ocurrieron en Diciembre de 1999 en el Estado Vargas, enfatizando los aspectos hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos de los diferentes cauces y cuencas afectadas.

### **Aludes Torrenciales en Venezuela**

Los flujos de barro y escombros en Venezuela no han sido tan frecuentes. El testimonio escrito más antiguo sobre la ocurrencia de aludes torrenciales en nuestro país se remonta a la tormenta de Febrero de 1798 en la región de La Guaira, reportada por el Barón Alejandro de Humboldt [4], quien se refiere a la lluvia de sesenta horas de duración que ocasionó una creciente extraordinaria del Río Osorio, en el Puerto de La Guaira, arrastrando troncos de árboles y masas de rocas de un volumen considerable. Una tormenta más extraordinaria y catastrófica azotó la región central del norte del país en Febrero de 1951, abarcando Caracas y las poblaciones del Litoral entre Choroni y Los Caracas [5]. Un número considerable de ríos y quebradas crecieron arrastrando automóviles y grandes troncos y peñones, estimándose un balance de más de 30 personas muertas o desaparecidas [6]. El evento más catastrófico en nuestro país era, hasta el presente, el reciente caso del Río Limón cerca de la ciudad de Maracay, donde una lluvia de larga duración produjo los aludes torrenciales de Sep-

tiembre de 1987 ocasionando más de 300 víctimas humanas.

### **Deslizamientos y Flujos Torrenciales en América Latina**

Los aludes torrenciales han sido mucho más frecuentes en América Latina, y en particular en las ciudades que se han desarrollado al pie de la Cordillera de Los Andes. Entre los más recientes puede mencionarse el deslizamiento del Río Paute, cerca de la ciudad de Cuenca, Ecuador, en 1993, mejor conocido como el Desastre de La Josefina [7]. Ayala *et al.* [8] reportan cuatro grandes eventos relacionados con flujos de barro en Chile, en el periodo entre 1987 y 1993, los cuales causaron centenares de víctimas y pérdidas de decenas de millones de dólares. El evento más dramático ha sido el causado por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia el 14 de Noviembre de 1985, el cual produjo el rápido derretimiento de la capa de hielo del nevado, originando flujos y coladas de barro que destruyeron la ciudad de Armero, matando aproximadamente a 21.000 personas [9]. El evento más reciente ocurrió cuando el Huracán Mitch pasó por Centroamérica, generando aludes torrenciales que destruyeron el pueblo Casita del Volcano en Nicaragua, dejando un total de 2.000 víctimas [10]. Otros eventos de menor magnitud que ocurrieron en algunos estados de México en 1999 han sido reportados por Caldino y Bonola [11].

### **Breve Descripción del Área del Desastre**

La región norte costera de Venezuela, donde se localiza el Estado Vargas, se encuentra adyacente al Mar Caribe y está compuesta por una región montañosa (Serranía del Litoral) que se extiende paralela a la línea del mar alcanzando alturas máximas cercanas a los 2800 m. La distancia entre los picos de las montañas y la línea de costa oscila entre 6 a 10 km. Entre la montaña y el mar, en una franja estrecha de tierra cuyo ancho varía entre 200 y 2000 m, han tenido lugar desarrollos urbanísticos y recreacionales que conforman el Estado Vargas (Figura 1), con una población cercana a las 300.000 personas. Las áreas más pobladas se han asentado sobre las gargantas y conos de deyección de las quebradas

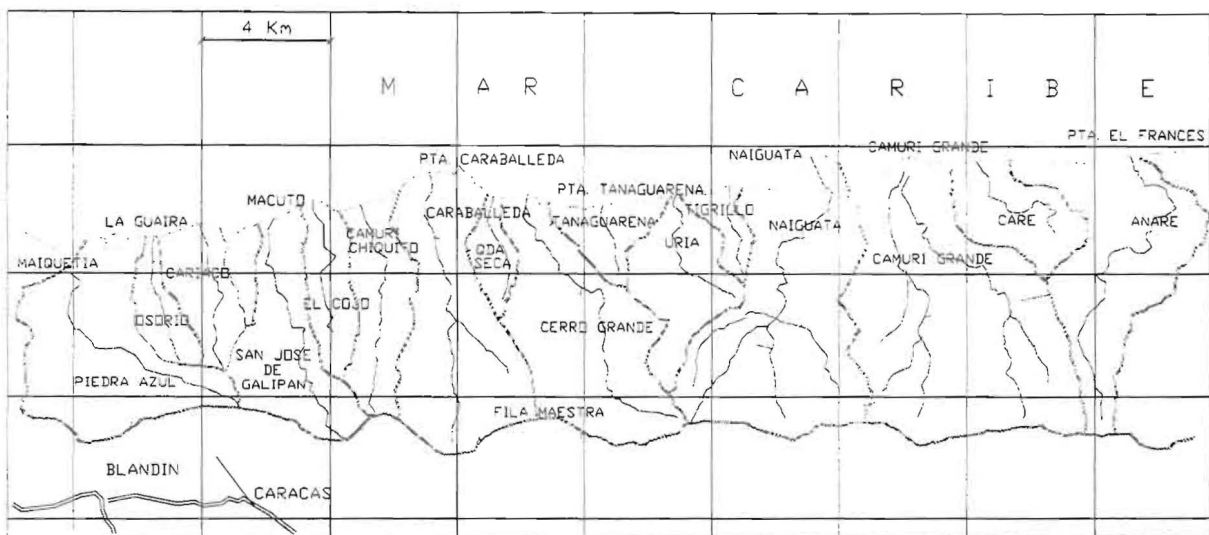


Figura 1. Mapa de ubicación del área del desastre.

o torrentes, así como también sobre las laderas y pendientes de la montaña. A unos 15 km al sur de esta serranía, se asienta la población de Caracas sobre un valle que se ubica a 900 m.s.n.m. La mayoría de estos cauces son efímeros, mostrando caudales solamente durante la estación lluviosa entre los meses de Mayo y Septiembre. La precipitación promedio es de 520 mm a nivel del mar.

**Características del Fenómeno Hidrometeorológico**

Las altas precipitaciones en la región norte de Venezuela fueron causadas por una persistente vaguada actuando durante los primeros 20 días del mes de Diciembre de 1999. Las "vaguadas" son flujos de los vientos en la altura con sentido de desplazamiento oeste-este y se asocian a la generación de extensos campos nubosos e intensas precipitaciones que se mantienen por aproximadamente 5 días, aunque su influencia puede sentirse por mayores lapsos de tiempo, manifestándose su acción en Venezuela durante el final e inicio de la época lluviosa. Un resto de frente frío proveniente del norte, aunado a la presencia de la zona de alta presión del Atlántico Norte, contribuyó a bloquear la circulación en la altura (Figura 2), con lo cual la persistencia y desarrollo de la nubosidad en la región costera se acentuó, formándose un sistema frontal debido

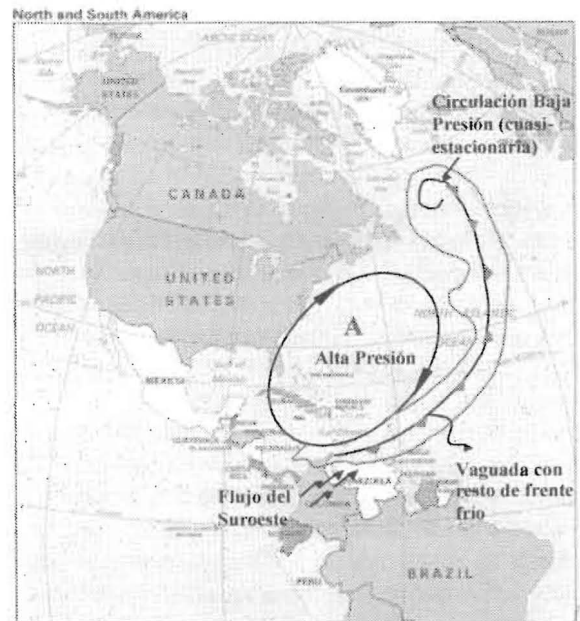


Figura 2. Mapa sinóptico mostrando el patrón general de circulación atmosférica basado en imagen satélite GOES el 16/12/99 (Fuente: Dirección de Hidrología y Meteorología, MARN).

al suministro continuo de masas de aire húmedas procedentes desde los Andes de Colombia y dirigido hacia las costas de Venezuela. Para mediados del mes de Diciembre la actividad de la vaguada se incrementa, cubriendo el frente nuboso una superficie de 20.000 km<sup>2</sup>, abarcando varios

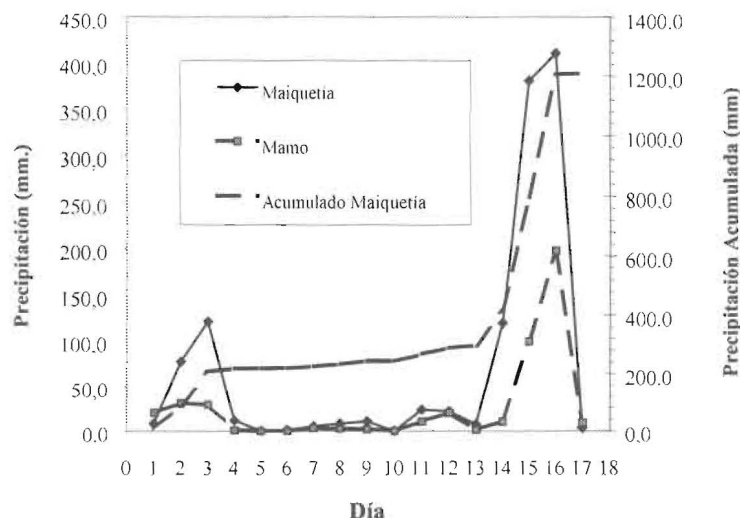


Figura 3. Datos diarios de precipitación en estaciones de Maiquetía y Mamo durante el mes de Diciembre de 1999.

estados en la zona norte costera del país en una extensión aproximada de 900 km [12].

La Figura 3 presenta los registros de precipitación obtenidos en las estaciones de Maiquetía (43 m.s.n.m), y Mamo (81 m.s.n.m) para el mes de Diciembre [12, 13]. Los datos indican un período continuo de lluvias de baja intensidad entre Diciembre 1 y Diciembre 13, acumulándose en Maiquetía casi 300 mm, continuando con altas precipitaciones que alcanzaron un total de 911 mm durante los días 14, 15 y 16, hasta totalizar 1207 mm para el 18 de Diciembre. En Mamo, sin embargo, la cantidad acumulada de lluvia durante el período de 17 días fue de 438 mm. Esta notable discrepancia entre los datos de estas estaciones localizadas casi a la misma elevación y a una distancia aproximada de 8 km, indica la necesidad de un análisis más detallado de esta información. Los datos anteriores se refieren a valores medidos en estaciones ubicadas cerca del nivel del mar, ya que no se dispone de registros en la parte alta de la montaña. Sin embargo, debido al efecto de la barrera orográfica, la magnitud de las lluvias en las partes altas de las cuencas es casi el doble que a nivel del mar, como se ha evidenciado en mediciones efectuadas en numerosas estaciones en otros eventos significativos, por lo que se deduce que las lluvias que ocurrieron son verdaderamente extraordinarias.

Las precipitaciones extremas de Diciembre de 1999 produjeron el colapso de las laderas de

las montañas y generaron aludes torrenciales en la gran mayoría de los torrentes del Estado Vargas, lo cual se inició casi simultáneamente en las primeras horas de la mañana del día 16 de Diciembre. El desplome de los taludes, por saturación de los suelos que cedieron ante la elevada cantidad de lluvia, provocó deslizamientos que destruyeron las viviendas construidas sobre las laderas y terrazas de los conos de deyección. Flujos de lodos y rocas se produjeron en la parte alta y media de la cuenca arrasando con casas, edificios, carreteras y toda la infraestructura ubicada en las gargantas y conos de deyección de los torrentes (Figura 4).

### Lluvia Crítica para generación de Deslizamientos

En la Figura 5 se presenta una curva que define la condición crítica de ocurrencia de falla de taludes en función de la precipitación (intensidad y duración), basado en experiencias Japonesas [14]. A esta figura le hemos incorporado datos de los tres eventos torrenciales más importantes ocurridos en nuestro país en los últimos años: la tormenta de 1951 en El Litoral Central, el caso del Río Limón, en 1987, y la más reciente de Diciembre de 1999. En todos los casos se observa que los puntos se ubican a la derecha de la curva, donde ocurre el colapso de los taludes, confirmando la validez del modelo para los tres eventos ocurridos en Venezuela.



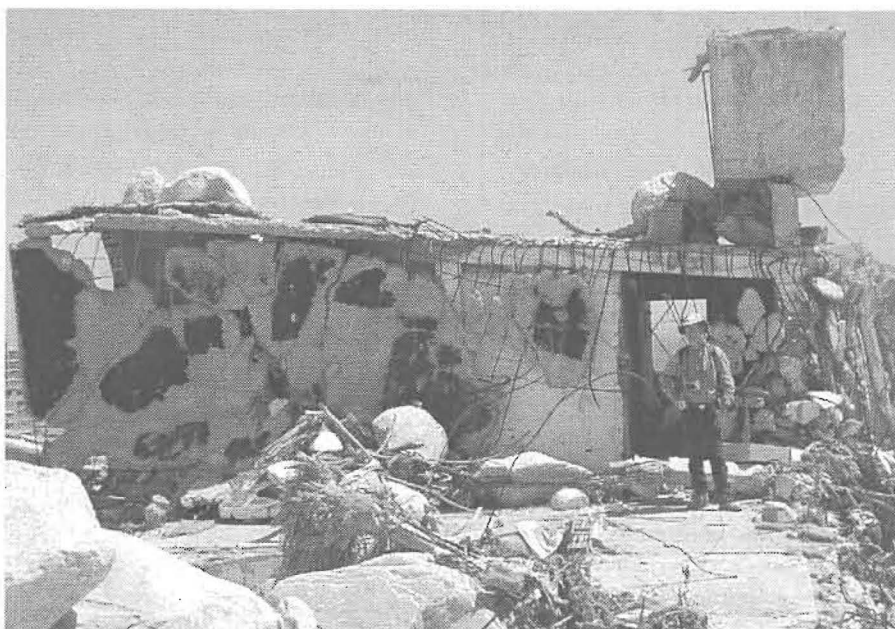


Figura 4. Daños producidos por impacto de peñones en el cono de deyección del río San Julián.

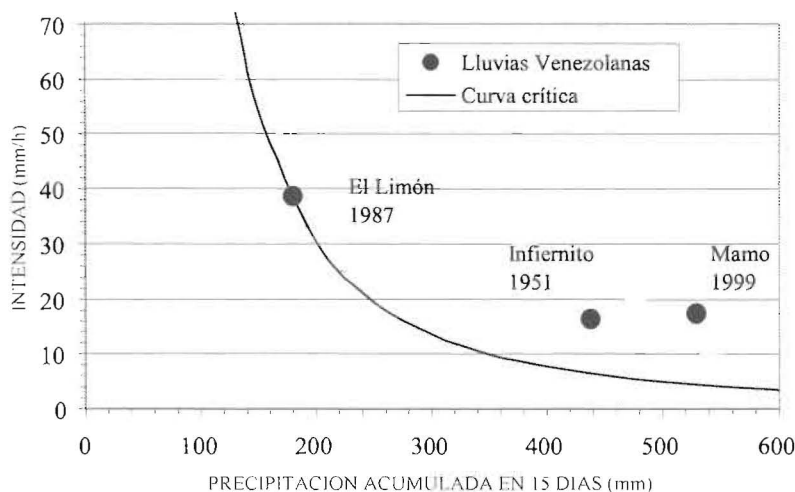


Figura 5. Condición crítica para falla de taludes de acuerdo a experiencias japonesas [14].

### Aspectos Geológicos y Geomorfológicos

La montaña del Ávila forma parte de la Cordillera de la Costa de Venezuela que abarca una superficie de 30.000 km<sup>2</sup>. Esta cordillera, al igual que los Andes, representa un joven sistema orográfico que inicia su emergencia a partir del Terciario (Mio-plioceno), como resultado de complejos procesos geológicos asociados a la actividad de la placa suramericana, siendo afectada en su evolución por diastrofismo, metamorfismo y ero-

sión geológica [15]. Las tasas actuales de emergencia tectónica estimadas en la Cordillera de la Costa de Venezuela, son del orden de 1 m por cada 100 años, valores estos análogos a los observados en las montañas Alpinas.

En la montaña del Ávila están expuestas unidades geológicas con edades comprendidas entre el Precámbrico y el Reciente. Las mayores unidades están representadas por formaciones o fases constituidas predominantemente por rocas metamórficas y sedimentarias. Las más antiguas del Precámbrico están representadas por el Me-

tagranito de Naiguatá, rocas ígneas de Tócome, esquistos de San Julián (esquistos gnéisicos-feldespáticos), y Peña de Mora (augen-gneiss, gneiss cuarzo-micáceo), el cual fue el responsable del aporte de fragmentos de rocas, bloques y peñones de grandes dimensiones. El grupo Caracas del Mesozoico, constituido por las formaciones Las Mercedes (esquistos calcáreos y grafitosos, mármoles grafitosos), y la formación Las Brisas (esquistos cuarzo-feldespáticos, cuarcitas, meta-areniscas, filitas y meta-conglomerados), ha sido generador de suelos residuales y gravo-arenosos. El grupo Complejo de la Costa (Mesozoico), representado por la fase Tacagua (mármoles, esquistos epidóticos, calcáreos, actinolíticos, y cloríticos), ha suministrado el mayor aporte de suelos meteorizados finos de color rojizo, y fragmentos litológicos. Tres fases adicionales del grupo lo constituyen la fase Antimano (mármoles con inyecciones de cuarzo y esquistos calcáreos), la fase Nirgua (anfíbolitas y esquistos anfibólicos), y la fase de Serpentinitas y Peridotitas. El Cuaternario está representado por sedimentos y detritos dispuestos en las zonas costero-litorales, formados por arenas, gravas y materiales finos, conteniendo bloques y peñones de gran tamaño.

Depósitos de terrazas, conos y playas se extienden ampliamente entre las áreas montañosas de estas cuencas torrenciales y el Mar Caribe. Las primeras representan depósitos antiguos y algunas se presentan levantadas a decenas de metros sobre el nivel de mar, como las de Playa Grande (65 m.s.n.m) y Cabo Blanco (45 m.s.n.m) asiento del Aeropuerto Internacional de Maiquetía. Los conos aluviales son estructuras muy comunes y están ampliamente desarrollados en la mayoría de estos cauces, a través de una extensión de 1 a 2 km, sobre los cuales se han asentado las poblaciones del litoral. De la inspección de fotografías aéreas previas a la tragedia, se observa que la mayoría de los cauces presentan en su desembocadura al mar, salientes topográficos como un reflejo de procesos activos de suministro y deposición de sedimentos probablemente atribuibles a eventos precedentes similares al ocurrido en Diciembre pasado.

### Perfiles Longitudinales

El aspecto geomórfico más notable de la montaña de El Ávila es su abrupto relieve y las

elevadas pendientes de las cuestas y faldas de la montaña en la mayoría de las cuencas que tienen sus divisorias en la Fila Maestra. En la Figura 1 se ha indicado la localización de las cuencas principales que drenan el flanco norte de El Ávila, y en la Tabla 1 se presentan algunas de las características geométricas de sus cauces. Estos datos han sido medidos u obtenidos de la información cartográfica existente en escalas 1:100.000 y 1:25.000. Los perfiles longitudinales se muestran en la Figura 6. La mayoría de estos cauces presentan ejes axiales coincidiendo con la orientación de los cauces principales a través de fallas con dirección nor-oeste, siendo los de mayor longitud Cerro Grande, San Julián, Camurí Grande y Naiguatá, los que han disectado más profundamente las unidades geológicas como consecuencia del mayor grado de erodabilidad en las cuestas y estar los fondos de valles altamente tectonizados y sujetos a procesos diastróficos. Esto se refleja en la mayor concavidad de los perfiles longitudinales produciéndose cambios notables de pendiente entre la garganta de los torrentes y los tramos superiores ubicados por encima de la cota 500 m.s.n.m. Los valores de las pendientes (%) por encima de este nivel se indican en un recuadro en dicha figura, notándose que duplican los valores promedios de cada torrente presentados en la Tabla 1. La máxima pendiente promedio corresponde a la Quebrada Cariaco, con un valor de 32,7 %.

### Volúmenes Acumulados y Características del Material del Lecho

Los aludes torrenciales de Diciembre de 1999 fueron capaces de modificar sustancialmente la línea de costa en los sitios de descarga de estos cauces al mar, y acumular grandes volúmenes de sedimentos en las gargantas y conos de deyección. En particular, se hace mención al caso de Carmen de Uria, donde el cono de deyección penetró costa afuera 200 m a lo largo de una franja de ancho aproximado igual a 500 m, lo cual representa una superficie de 10 Has. Dado que el espesor promedio de sedimentos en la línea de costa fue de 12 m, se conformó una especie de delta expuesto a la atmósfera, con un volumen total estimado de 1.5 millones de m<sup>3</sup>. Este cálculo no toma en cuenta el volumen de

Tabla 1  
Características fisiográficas de las cuencas más representativas del área de estudio

Torrente	Área (Km <sup>2</sup> )	Max. Elev. de la Cuenca (M.S.N.M.)	Long. Cauce (Km)	Pendiente Promedio (%)	Pendiente en Cono (%)	Área Deposition (Has)	Vol. Depositado (106 m <sup>3</sup> )
Piedra Azul	24,8	1950	9,0	17,3	4,8	25,6	0,5
Osorio	4,6	1700	5,0	32,0	4,4	17,8	0,3
Cariaco	5,7	1960	5,5	32,7	6,7	18,1	0,3
Macuto	14,0	2300	8,0	21,5	6,3	25,4	0,5
El Cojo	6,8	1550	5,5	19,6	4,0	16,4	0,3
Camurí Chico	11,2	2350	7,5	16,0	5,7	82,7	1,6
San Julián	23,6	2490	9,8	21,6	5,0	127,0	2,6
Qda. Seca	5,3	1240	3,8	25,3	6,2	74,1	1,5
Cerro Grande	26,6	2750	10,5	20,2	2,5	47,0	1,5
Uria	11,6	2150	7,5	29,3	6,3	16,0	1,6
Naiguatá	33,4	2000	12,0	12,3	1,6	66,7	0,7
Camurí Grande	42,90	2190	10,2	19,6	2,7	79,0	1,6
Total:						13,0	

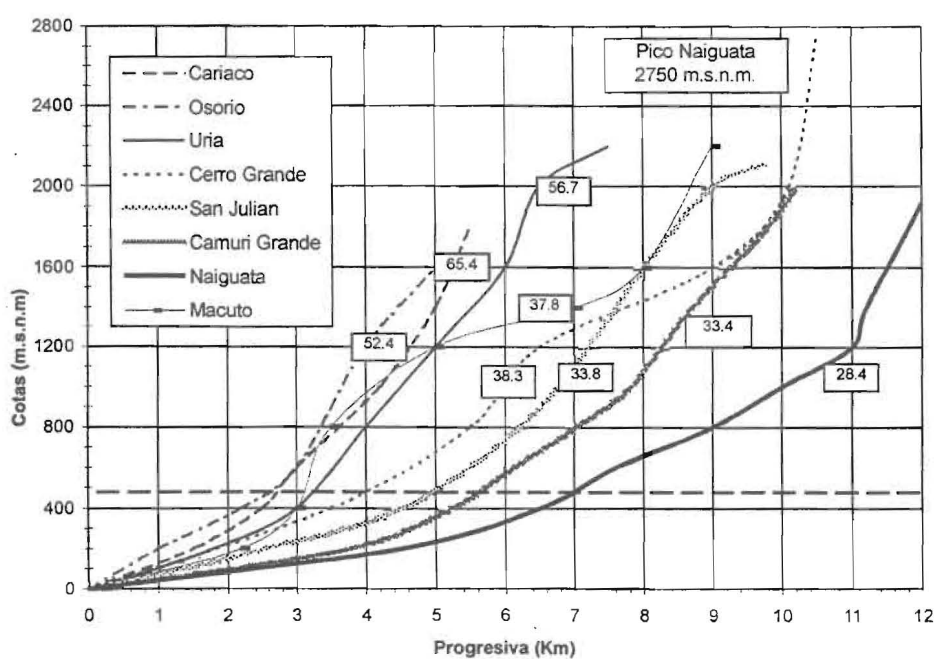


Figura 6. Perfiles longitudinales de los principales torrentes (vertiente norte del Ávila).

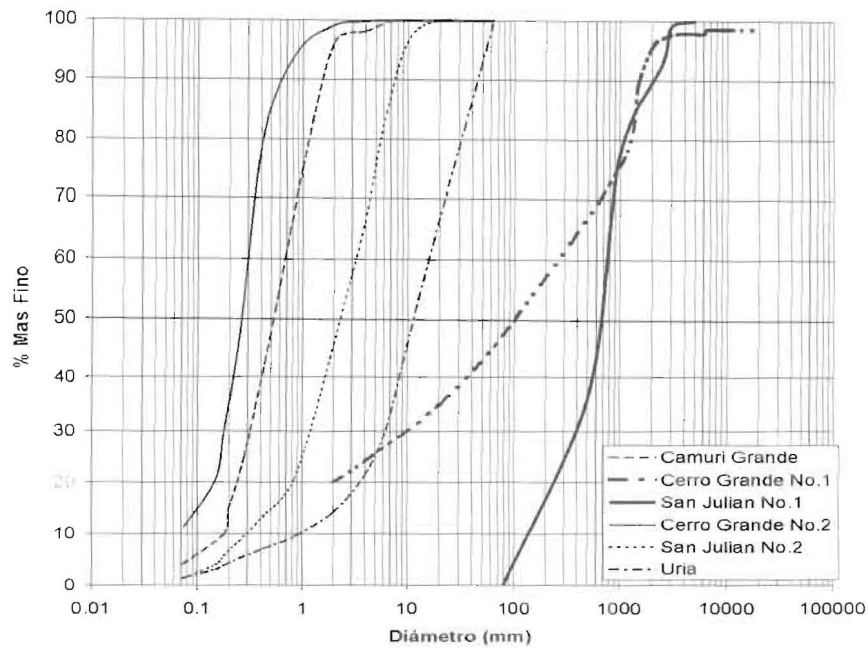


Figura 7. Curvas granulométricas del material del lecho.

material fino transportado por corrientes marinas, el cual creó una pluma de concentración de sedimentos que se extendió por 400 m mar adentro, siendo fácilmente visible en las aerofotografías de esa fecha. El volumen total depositado en Carmen de Uria ha sido estimado en 1,63 millones de  $m^3$ , considerando el material adicional acumulado en la garganta y cono de deyección. Partiendo de que el área de la cuenca hidrológica es de  $11.6 km^2$  y considerando que el mayor porcentaje de deposición ocurrió en la zona costera, puede determinarse que la tasa de erosión en Carmen de Uria en el periodo de 20 días fue de  $140.500 m^3/km^2$ , valor extremadamente alto comparado con las tasas medias anuales de producción de sedimentos en cuencas montañosas del país con mayores áreas de drenaje, las cuales están en el orden de  $500$  a  $1500 m^3/km^2$  por año.

En la Tabla 1 se presentan los volúmenes depositados en los conos de deyección de las quebradas más importantes, estimados a partir de inspecciones de campo y de observaciones aerofotográficas, donde se midieron las áreas de sedimentación. Los volúmenes de sedimentación para Cerro Grande y Uria toman en cuenta la deposición en el mar, mientras que los valores estimados en las restantes cuencas se refieren solamente a los volúmenes acumulados en los conos de deyección. El volumen total de sedimentos acumulado para las 12 quebradas consideradas

es de 13 millones de  $m^3$ . Se estima, que para toda la franja costera este valor es cercano a los 20 millones de  $m^3$ .

La Figura 7 presenta las características granulométricas del material de lecho en algunos cauces del área de interés. Las muestras de material con tamaños inferiores a las gravas ( $D < 6,4 cm$ ) se captaron a nivel superficial en fecha posterior a la ocurrencia del evento. Las fracciones más gruesas (cantos y peñones) se analizaron mediante contabilidad de las partículas del lecho a lo largo de una sección longitudinal representativa de dicho material, ubicada en las partes altas de los conos de deyección. Las fracciones finas muestran una distribución bastante uniforme con diámetros medios variando entre  $0.1$  y  $10 mm$ . El porcentaje máximo de arcillas y limos se registró en el río Cerro Grande con un valor de 12%, mientras que el mínimo es de 2%, lo que indica que existe una disponibilidad de material arcillo-limoso apropiado para generarse flujos de lodos del tipo viscoso. Un estimado del conjunto basado en observaciones de campo y en el uso de fotografías dieron como resultado unas proporciones de 50% peñones, 20% cantos, 20% gravas, y 10% de arenas y limos, para el Río San Julián. Valores típicos para el lecho del cono aluvial de Cerro Grande son: 40% peñones, 16% cantos, 25% grava, 7% arena y 12% limos y arcillas.



Tabla 2  
Dimensiones, factores de forma y pesos de peñones medidos en Camurí Chico y San Julián

Cauce	Longitud de ejes (m)			Factor Forma $c/\sqrt{a b}$	Volumen $V = 1/6 \pi a b c$	Peso (ton)	Peso Correg. (ton)
	a	b	c				
Camurí	5,10	4,10	2,00	0,44	21,90	61,3	49,0
Camurí	7,80	7,60	5,00	0,65	155,19	434,5	347,6
Camurí	11,30	5,00	3,30	0,44	97,62	273,3	218,7
Camurí	15,00	9,00	4,00	0,34	282,74	791,7	633,3
Camurí	5,10	4,10	2,00	0,44	21,90	61,3	49,0
Camurí	12,00	8,20	2,40	0,24	123,65	346,2	277,0
Camurí	10,00	4,70	3,50	0,51	86,13	241,2	192,9
San Julián	8,20	7,50	4,41	0,56	142,01	397,6	318,1
San Julián	5,00	2,60	1,00	0,28	6,81	19,1	15,2
San Julián	5,60	4,30	1,70	0,35	21,43	60,0	48,0
San Julián	4,30	3,20	2,50	0,67	18,01	50,4	40,3
San Julián	6,10	3,50	2,60	0,56	29,06	81,4	65,1
San Julián	7,20	6,10	1,60	0,24	36,79	103,0	82,4
San Julián	2,30	1,70	1,60	0,81	3,28	9,2	7,3

Tamaños máximos de peñones medidos en las zonas del cono de deyección y garganta de los ríos Camurí Chico y San Julián, se presentan en la Tabla 2, calculándose adicionalmente los factores de forma y volúmenes de estas partículas asociándolos a elipsoides de dimensiones en sus ejes máximo, medio y mínimo iguales a: a, b y c, respectivamente. Los valores del factor de forma indican que los peñones no presentan altos grados de redondez, encontrándose valores cercanos a 0.7 en dos casos cuyos pesos exceden las 300 toneladas. En San Julián, sin embargo, se encontró un peñón con un factor de forma de 0,81 cuyo peso es cercano a 7 ton. Algunos de estos peñones se ubican en los conos de deyección a distancia considerable del ápice, lo cual es indicativo de un transporte producido por un flujo de alta viscosidad, tal como el peñón observado en San Julián, a unos 800 m aguas abajo de la garganta, con dimensiones de 8.20 m x 7.50 m x 4.41 m.

### Caudales Máximos de las Crecientes

Una de las características relevantes del evento de Diciembre de 1999 en Venezuela fue la ocurrencia de caudales extraordinarios en algunas cuencas que hacen necesario considerar el efecto de controles en los canales a medida que se transitaban las crecientes. Los autores manejan la hipótesis de que los caudales pico fueron generados por el rompimiento de presas o diques naturales que se formaron en las gargantas de varios ríos por acumulación de sedimentos, grandes peñones, árboles y escombros. Esta hipótesis se basa en observaciones realizadas en el campo y en los relatos de numerosos sobrevivientes entrevistados en la zona del desastre, los cuales coinciden en reportar la presencia de grandes olas de lodo y escombros, de varios metros de alto, en la mañana del 16/12/99.

Tabla 3  
Comparación de caudales pico estimados con distintos métodos

Río	Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Caudal máximo de creciente según Creager (m <sup>3</sup> /s)	Caudal para T <sub>R</sub> = 100 años (m <sup>3</sup> /s)	Caudal pico calculado en base a marcas de inundación (m <sup>3</sup> /s)	Caudal generado por rompimiento de una presa de H=15 m (m <sup>3</sup> /s)
Cerro Grande	26,6	850	360	1.232	1.078
Uria	11,6	400	180	1.670	1.725

Para sustentar esta hipótesis a continuación se presentan estimaciones realizadas de los caudales en las quebradas de Cerro Grande y Uria, tomando en cuenta las marcas de inundación observadas en campo. En Cerro Grande se encontró una sección de control en forma de vertedero donde existía una toma de agua antes de las crecientes de Diciembre de 1999. En ese lugar se pudieron ubicar marcas de inundación que permitieron medir la sección transversal del flujo. Para calcular el caudal máximo de la creciente se utilizó la fórmula típica para un vertedero rectangular corregida por efecto del flujo de barro [16, 17]:

$$Q = 2/3 m \mu (2g)^{0.5} B H^{1.5} \quad (1)$$

donde,  $Q$  es el caudal,  $\mu$  es el coeficiente del vertedero,  $B$  es el ancho del canal,  $H$  es la altura efectiva de flujo,  $m$  es un factor para flujo de lodos, y  $g$  es aceleración de la gravedad.

Utilizando los valores medidos en campo ( $B = 15,5$  m,  $H = 12$  m) y las constantes  $\mu = 0,72$  y  $m = 0,9$  [17], se obtiene un caudal máximo aproximado de  $Q = 1.232$  m<sup>3</sup>/s, y una velocidad de 6,7 m/s.

Para la población de Carmen de Uria, cerca de la entrada de la garganta del río Uria, se observó una curva y marcas de inundación que permitieron estimar las profundidades máximas del flujo y la sobre-elevación del nivel del agua en la curva. En este caso para estimar el caudal se utilizó la fórmula clásica para la velocidad en curvas [18]:

$$V = [(\Delta H \cdot R \cdot g) / B]^{0.5} \quad (2)$$

donde  $R$  es el radio de curvatura de la curva, y  $\Delta H$  es la sobre-elevación del agua.

Tomando en cuenta los valores medidos:  $B = 32,7$  m,  $\Delta H = 1,75$  m y  $R = 110$  m, la velocidad aproximada fue de  $V = 7,6$  m/s y considerando un área transversal medida de 223,2 m<sup>2</sup> el caudal resultante en Carmen de Uria fue 1.670 m<sup>3</sup>/s.

En la Tabla 3 se muestran los caudales aproximados calculados previamente y se comparan con los datos históricos de crecientes extraordinarias obtenidos del gráfico de Creager [19]. También se indican en la tabla los caudales de agua para un período de retorno de 100 años [12] y los caudales generados por rompimiento de presas, calculados estos últimos por la expresión simplificada para un rompimiento repentino [17, 20]:

$$Q = \Psi B g^{0.5} H^{1.5} \quad (3)$$

donde  $\Psi$  es igual a 0,21.

Del análisis de los resultados presentados en la tabla se desprende que los caudales calculados en base a mediciones en campo de las marcas de inundación, son muy superiores a los caudales máximos históricos de las crecientes extraordinarias [19] observadas para cuencas de área similar. Igualmente, dichos caudales son tres veces y nueve veces mayores que los caudales de agua generados por una lluvia de 100 años de período de retorno, en Cerro Grande y Uria, respectivamente. La hipótesis que manejan los autores es que durante la tormenta ocurrida en Diciembre de 1999 en Venezuela se crearon condiciones necesarias, mas no suficientes, para generar los caudales pico observados. Es decir, los valores extraordinarios de los caudales calculados son resultado de mecanismos diferentes a los producidos solamente por lluvias efectivas. Los caudales calculados para rompimiento de presas son muy cercanos a los estimados en base a las

manchas de inundación. Esto indica que es muy probable que los caudales máximos pudieron producirse por rompimiento de presas o diques naturales formados en las gargantas de los torrentes por acumulación de sedimentos, restos vegetales y grandes troncos de árboles.

### Conclusiones

Las lluvias que se produjeron en Diciembre de 1999 en Venezuela fueron extraordinarias. La extensión, magnitud y consecuencias del evento hidrometeorológico supera a otros eventos similares ocurrido en Venezuela y en otros países del caribe. La distribución areal y temporal de la precipitación, con una larga duración, determinó la generación simultánea de crecientes en un conjunto de torrentes a lo largo de una extensión de 50 km, las cuales produjeron aludes torrenciales favorecidos por las altas pendientes y susceptibilidad a la erosión geológica de los suelos y rocas. Los aludes produjeron un número estimado de víctimas cercano a las 15.000 personas y los daños materiales superan los 2 mil millones de dólares. La catástrofe, en términos de pérdidas de vidas humanas, se produce principalmente debido a la incontrolada ocupación urbana de los abanicos fluviales, gargantas de las quebradas y laderas de los cerros circundantes.

Las observaciones de campo indican que varios tipos de flujo se produjeron durante la tormenta, asociados a la presencia de distintos tipos de movimientos de masas y a las características de las formaciones geológicas. En algunas cuencas ocurrieron flujos de lodos con presencia abundante de material fino, y en otras se produjeron flujos con predominio de grandes bloques y arrastres de restos vegetales. Los valores extraordinarios de caudales máximos observados son probablemente consecuencia de la formación y rompimiento de diques naturales formados por la acumulación, en los lechos de las quebradas, de sedimentos y troncos de árboles suministrados por las cuencas altas.

El transporte de grandes bloques arrastrados hasta los conos de deyección y línea de costa, con pesos en el orden de cientos de toneladas, sugieren la existencia de flujos hiperconcentrados con altas viscosidades que facilitaron la suspensión y movilidad de dichos materiales. Esto tam-

bién se confirma por las fotografías tomadas por lugareños en el momento del evento, así como por las marcas irregulares no uniformes dejadas por las crecientes, y la turbidez del agua en la zona costera. En su penetración al mar, los aludes torrenciales crearon una nueva línea de costa depositando sedimentos en una extensión aproximada de 1000 Has. El volumen total depositado en los conos de deyección por los flujos torrenciales, se estima aproximadamente en 20 millones de metros cúbicos.

### Referencias Bibliográficas

1. Grases, J. (coordinador): "Efecto de las Lluvias Caídas en Venezuela en Diciembre de 1999", Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Corporación Andina de Fomento (CAF), CDB Publicaciones, Caracas, Venezuela, Abril, 2000.
2. CONAVI, 2000. "Documento Sinóptico de los Análisis, Conclusiones y Recomendaciones de la Comisión de Expertos en Hidráulica, Geotecnia, Estructuras y Urbanismo, convocada por el Consejo Nacional de la Vivienda por Instrucciones del Ministerio de Infraestructura", Informe Técnico, Caracas, Venezuela.
3. Aguirre, J., y Jáuregui, E.: "Hydrologic and Hydraulic Study of Naguayata and Camurí Grande Rivers in Vargas State, Venezuela", en Flood and Sediment Disaster caused by the 1999 Heavy Rainfall in Venezuela, Research Report on Natural Disasters, Japan, February, 2001.
4. Humboldt, Alejandro de.: "Viaje a las Regiones Equinocciales del Nuevo Continente en los años de 1799 a 1804", Monte Avila Editores, Edición de 1985, Caracas, Venezuela.
5. Sardi, Victor: "Gastos Máximos de los Ríos y las Quebradas del Litoral Central", Colegio de Ingenieros de Venezuela, Revista No. 275, Febrero, 1959.
6. Sucre Alemán, O.: "Daños causados por la Tormenta del 15 al 17 de Febrero de 1951", Informe Inédito, Instituto Nacional de Obras Sanitarias, Caracas, Venezuela, 1951.

7. Zevallos, O., Fernández M., Plaza, G., and Klinkicht, S.: "Sin Plazo para la Esperanza", Reporte sobre el Desastre de la Josefina, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1993.
8. Ayala, L., López, A., Tamburrino, A., and Vera, G.: "Aspectos Hidrometeorológicos e Hidrodinámicos de algunos Eventos Aluvionales recientes en Chile", Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, Noviembre, 1994.
9. Aguirre, J. y Moncada, A.: "Regímenes en el Flujo de Barros y Escombros", Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIV, Núm.1, pp.5-12, Enero-Abril, 1999.
10. Must, Vince: "Huracan Mitch", National Geographic, November, 1999.
11. Caldino Ignacio, and Bonola Isaac: "Viscosidad de Mezclas Agua-Arcilla en relación con los Flujos de Lodos y Debris", XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, Octubre, 2000.
12. Matute, M., Pérez, R., Reyna, J., y Limongi, S.: "Aspectos Climatológicos del Desastre Natural de Diciembre de 1999 en la Zona Norte Costera de Venezuela", MARN, Febrero, 2000.
13. Fuerza Aérea Venezolana (FAV). "Análisis de las Situaciones Meteorológicas que afectaron el Area Norte Costera del País durante el mes de Diciembre del año 1999", Servicio de Meteorología, Ministerio de la Defensa, Venezuela, 2000.
14. Japanese Geotechnical Society: "Manual for Zonation on Areas Susceptible to Rain-induced Slope Failure", July, 1997.
15. Garner, H.F.: "Stratigraphic-Sedimentary Significance of Contemporary Climate and Relief in Four Regions of the Andes Mountains", Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 70, pp.1327-1368, October, 1959.
16. Henderson, F.M.: "Open Channel Flow", MacMillan Series in Civil Engineering, 1966.
17. Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE): "Research Report on Debris Flow Disaster Mitigation in Cerro Grande and Uria in Vargas, Venezuela", Academia China de Ciencias, Mayo, 2000.
18. Chow, V.T.: "Open Channel Hydraulics", McGraw Hill Company, 1959.
19. Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J.: "Engineering for Dams", Vol. 1, John Wiley & Sons, New York, 1945.
20. Stoker, J.J.: "Water Waves", Interscience Publishers, New York, 1957.

Recibido el 25 de Septiembre de 2000  
En forma revisada el 20 de Abril de 2001