

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR ALUDES TORRENCIALES

EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería
Hidráulica por el
Ing. Noya López, María Esperanza

Caracas, Octubre 2002

ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR ALUDES TORRENCIALES
EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN

Ing María Esperanza Noya López

Trabajo de Grado presentado a la
ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería
Hidráulica

Caracas, Octubre de 2002

Certifico que he leído este Trabajo de Grado y que lo encuentro apropiado tanto en su contenido como en su formato y apariencia externa

Prof. José Luis López S.

Tutor

Fecha

APROBACIÓN DEL JURADO

Trabajo de Grado Aprobado en
nombre de la Universidad por el
siguiente Jurado:

Coordinador

Dedicado:

A Dios, a la memoria de mi padre, a mi madre, a mi hermano... a mis seres queridos.

Al pueblo de Vargas, en especial a aquellos que lo perdieron todo.

A mi mamá porque sin ella yo no estuviese aquí.

Al personal del Instituto de Mecánica de Fluidos, por la oportunidad, por los conocimientos y por la amistad... en especial al equipo del Proyecto Ávila.

Al Prof. José Luis López por su orientación y dedicación.

Al Prof. Reinaldo García por ser el jefe que es.

Al Prof. José Rafael Córdova por su colaboración y su paciencia.

Al equipo de Mapas de Riesgo del Instituto Geográfico Nacional Simón Bolívar y la Lic. Alicia Moreau; al Dr. Ali Neuman y al Dr. Pedro Basabe del Cuerpo de Socorro Suizo, por la oportunidad de haber estado con ellos.

A Jimmy O'Brien, por ser asesor y amigo.

A María Isabel Vivas, por ser cómplice en espacio y tiempo.

A Marco Tulio Bello, por su amistad y por optimizar mi tiempo.

A Luis Belmonte, por la lucha en las causas comunes.

A todos gracias.

RESUMEN

Los Aludes Torrenciales de diciembre de 1999 produjeron una gran devastación en el Edo. Vargas. Importantes cambios en el paisaje, pérdidas económicas y de vidas humanas fue el saldo del fenómeno. Los Mapas de Amenaza se han establecido como una herramienta fundamental para la planificación del ordenamiento urbano y se espera que para planes de emergencia, ubicación de refugios y selección de vías de escape en las diferentes zonas estudiadas ante la ocurrencia de fenómenos naturales como los Aludes Torrenciales.

En este trabajo se desarrolló la metodología necesaria para la elaboración de Mapas de Amenaza por Aludes Torrenciales. En estos mapas se representan las zonas con amenaza alta, media, baja o inexistente a ser afectadas por aludes torrenciales.

Para ello se analizaron las causas y consecuencias del evento de diciembre de 1999, sobre la cuenca del río San José de Galipán y más específicamente sobre el área de estudio en la población de Macuto.

Se aplicó esta metodología a la cuenca del río San José de Galipán en el área de Macuto. Se estudiaron las características hidráulicas, topográficas e hidrológicas de la zona, con el propósito de la caracterización de la cuenca. Se recabó información acerca del fenómeno hidrometeorológico ocurrido en diciembre de 1999. Se aplicaron varios modelos matemáticos como herramientas fundamentales para este estudio, entre ellos destacan el HEC-HMS y el FLO2D. Para ambos modelos fue necesario calibrar el modelo de la cuenca. En la calibración del modelo matemático FLO-2D se empleó la topografía digital del año 1998. Se buscó repetir la mancha de inundación que se produjo en el evento de diciembre de 1999 y las profundidades del flujo, ajustando entre otros parámetros la concentración volumétrica máxima de sedimentos. Una vez calibrada el modelo para

el FLO-2D se simuló la inundación del flujo para las crecientes de diseño establecidas en los criterios del estudio. Se empleó la topografía más actualizada, la de septiembre del 2000. La topografía del área de estudio se discretizó en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme. A cada elemento se le asignó sus coordenadas de ubicación, la elevación o cota del terreno promedio, el coeficiente de rugosidad (n de Manning) y los factores de reducción del flujo que atraviesa la celda para la simulación del bloqueo por edificaciones y otras obstrucciones.

Los resultados del modelaje con el FLO2D para la topografía más actualizada se emplearon en la elaboración del Mapa de Amenaza de la cuenca. El Mapa de Amenaza indica que gran parte del área urbanizada de Macuto que se encuentra en el cono de deyección del río, está en áreas de alta peligrosidad.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	7
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
3. INFORMACIÓN BÁSICA RECOPIADA.....	21
3.1. FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	22
3.2. ORTOFOTOMAPAS	22
3.3. TOPOGRAFÍA DIGITAL	23
3.4. TOPOGRAFÍA	24
3.5. HIDROLOGÍA	24
3.6. GRANULOMETRÍA	25
4. DESCRIPCIÓN DE LA TORMENTA DE DICIEMBRE DE 1999	26
4.1. REGISTROS HIDROLÓGICOS	30
4.2. ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SEDIMENTOS GENERADOS EN LA TORMENTA DE DICIEMBRE DE 1999	32
5. CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN.....	35
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	35
5.2. EVOLUCIÓN DEL CAUCE DEL RÍO ENTRE 1937 Y 1999.....	45
5.3. CAMBIOS EN EL PERFIL LONGITUDINAL.....	55
5.4. CAMBIOS EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES.....	64
5.5. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DEL LECHO	69
6. METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	76
6.1. INFORMACIÓN BÁSICA A EMPLEAR, ESCOGENCIA DE LA BASE TOPOGRÁFICA	77
6.2. PROGRAMA HEC-HMS.....	77
6.3. PROGRAMA COORDENADAS.....	77
6.4. PROGRAMA GRID DEVELOPER SYSTEM GDS	78
6.5. PROGRAMA RETÍCULA.....	79
6.6. MODELO MATEMÁTICO FLO2D.....	79
6.7. PROGRAMA AMENAZA	84
6.8. CRITERIOS DE SIMULACIÓN	84
7. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA TORMENTA DE DICIEMBRE DE 1999	92
7.1. GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS DE FLUJO Y SEDIMENTO	95
7.2. ESTUDIO DE UNA SECCIÓN DEL RÍO	104
7.3. SIMULACIÓN CON EL FLO2D Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	115
8. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE BARROS GENERADO POR LAS TORMENTAS DE DISEÑO.....	127
8.1. ESCENARIO 1	131
8.2. ESCENARIO 2	134

<i>Análisis de la amenaza por Aludes Torrenciales</i>	<i>x</i>
8.3. ESCENARIO 3	137
9. ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA	141
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
11. REFERENCIAS.....	148
12. CURRÍCULO VITAE.....	152

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Registros históricos de lluvias torrenciales en la vertiente norte de La Cordillera de La Costa (Fuentes: Pacheco, G.,2002 y Sardi, V. ,1959)	6
Tabla 2 Clasificación del flujo de aludes torrenciales en función de la concentración del sedimento (O'Brien, 2000).	15
Tabla 3 Clasificación de la velocidad de movimiento de masa según Cruden – Varnes (Grases et al, 2000).	18
Tabla 4 Fotografías Aéreas	22
Tabla 5 Ortofotomapas.	23
Tabla 6 Planos en formato digital.	23
Tabla 7 Cartas topográficas.....	24
Tabla 8 Caudales máximos.....	24
Tabla 1 Precipitación en Maiquetía.	31
Tabla 2 Estadísticas hidrológicas SEMETFAV.	31
Tabla 11 Parámetros de la red del río.....	39
Tabla 12 Parámetros de la cuenca y del Río San José de Galipán	40
Tabla 13 Clasificación de la vegetación existente en el Litoral Central.....	44
Tabla 14 Granulometría de las muestras tomadas en el Río San José de Galipán	72
Tabla 15 Coeficiente de uniformidad.....	73
Tabla 16 Distribución horaria de las lluvias registradas en Mamo y Maiquetía.....	93
Tabla 17 Características de las subcuencas hidrológicas.....	96
Tabla 18 Determinación del número de la curva NC.	97
Tabla 19 Tiempo de concentración Kirpich.	98
Tabla 20 Distribución de la lamina de lluvia horaria cada 5 minutos (C.G.R. Ingeniería, 2000).....	101
Tabla 21 Valores pico de la tormenta de diciembre de 1999.....	102
Tabla 22 Áreas de Amenaza para el Río San José de Galipán en el área de Macuto.	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Ubicación de la cuenca del Río San José de Galipán.....	21
Figura 2 Hidrograma de Crecientes.....	25
Figura 1 Mapa sinóptico del patrón general de circulación atmosférica, según imagen satélite GOES 16/12/99 (Fuente: Dirección de Hidrología y Meteorología, M.A.R.N)	26
Figura 2 Hietograma de Mamo entre los días 14 y 17 de diciembre de 1999.....	30
Figura 5 Población de San José de Galipán, foto tomada después de diciembre de 1999, se observan los efectos de los deslaves en las montañas (Fuente: USGS).....	35
Figura 6 Dique toma destruido aguas arriba de la población de Macuto. Febrero 2001.....	36
Figura 7 Dique toma reconstruido aguas arriba de la población de Macuto. Noviembre 2001.....	36
Figura 8 Plano de Planta de la red hidrográfica de la cuenca.....	37
Figura 9 Pendientes de la cuenca del Río San José de Galipán. (Fuente: CorpoVargas, Detalle del Mapa n° 3.2. www.corpovargas.gov.ve).....	38
Figura 10 Geología y geomorfología de la cuenca del Río San José de Galipán. (Detalle del Mapa n° 3.1). (Fuente: CorpoVargas, www.corpovargas.gov.ve).....	41
Figura 11 Cobertura Vegetal y uso de la tierra de la cuenca del Río San José de Galipán. (Detalle del Mapa n° 5.2). (Fuente: CorpoVargas, www.corpovargas.gov.ve).....	44
Figura 12 Fotografía aérea Misión 8 año 1936 - 1938 Esc 1:20.000.....	45
Figura 13 Fotografía aérea Misión C-8 año 1951 Esc 1:24.000.....	45
Figura 14 Fotografía aérea Misión 030422 año 1.962 Esc 1:9.000.....	45
Figura 15 Fotografía aérea Misión 030435 año 1.965	46
Figura 16 Fotografía aérea Misión 030198 año 1.975 Esc 1:25.000	46
Figura 17 Fotografía aérea Misión 030178 año 1.991 Esc 1:5.000.....	46
Figura 18 Fotografía aérea Misión 030602 año 1.998 Esc 1:5.000.....	46
Figura 19 Fotografía aérea Misión 601 año 1.999 Esc 1:5.000	46
Figura 20 Vista de la población de Macuto después de los aludes torrenciales de diciembre 1999. La línea roja indica el sitio del cauce original.....	49
Figura 21 Población de Macuto. Parte baja del cono de deyección, se observa la deposición de sedimentos, piedras, vegetación y escombros. Vista desde la Av. Intercomunal hacia aguas abajo. Diciembre 1999.	50
Figura 22 Población de Macuto. Parte alta del cono de deyección. Se observa el material depositado por el río, la destrucción de viviendas y los deslaves en las laderas de las montañas. Diciembre 1999.	51
Figura 23 Mapa de Distribución de Sedimentos y Desbordamiento de Flujo de Lodo y Piedras del Río San José de Galipán. JICA.....	53
Figura 24 Imagen de satélite IKONOS del sector Galipán (Fuente: (Arismendi et al, 2000)	54
Figura 25 Perfil Longitudinal del Cauce principal del Río San José de Galipán.....	55
Figura 26 Detalle del plano de la confluencia en la Qda. Los Perros.	56
Figura 27 Detalle del cruce de la carretera en la confluencia de cauces en la Qda. Los Perros, vista desde aguas arriba (Fuente: IMF)	57
Figura 28 Detalle del cruce de la carretera en la confluencia de cauces en la Qda. Los Perros, vista desde aguas abajo.	58
Figura 29 Saltos en la Qda. Los Perros.....	58
Figura 30 Detalle de salto en la Qda. Los Perros.....	59

Figura 31 Dique natural en el cauce principal del Río San José de Galipán.	60
Figura 32 Detalle del estrechamiento del cauce principal.	60
Figura 33 Depósitos de sedimentos en el cauce excavado.	62
Figura 34 Comparación de perfiles a lo largo del cauce original – Macuto.	63
Figura 35 Comparación de perfiles a lo largo del cauce desplazado – Macuto.	63
Figura 36 Topografía digital antes Dic 99. Secciones transversales.	64
Figura 37 Topografía digital Después Dic 99. Secciones transversales.	65
Figura 38 Sección 1 Prog 0 + 000.	66
Figura 39 Sección 2 Prog 0 + 215.82.	66
Figura 40 Sección 3 Prog 0 + 335.21.	67
Figura 41 Sección 4 Prog 0 + 621.17.	67
Figura 42 Sección 5 Prog 0 + 885.96.	68
Figura 43 Sección 6 Prog 1 + 092.94.	68
Figura 44 Vista del Río San José de Galipán en la parte baja de la cuenca.	69
Figura 45 Vista del material arrastrado por el Río San José de Galipán en la parte media de la cuenca.	70
Figura 46 Vista hacia la pared del Picacho de Galipán, detalle del torrente de escombros.	70
Figura 47 Curvas Granulométricas de las muestras tomadas en Macuto.	73
Figura 48 Relaciones de probabilidad – intensidad – amenaza (propuesta PREVENE (Basabe et al., 2001)).	89
Figura 49 Distribución horaria de la precipitación en Mamo y Maiquetía entre los días 14 al 17 de Diciembre de 1999.	95
Figura 50 Representación esquemática de la cuenca del Río San José de Galipán.	96
Figura 51 Hietograma de la lluvia de Tr = 500 años – C.G.R. Ingeniería.	99
Figura 52 Hidrograma de la creciente de Tr = 500 años – C.G.R. Ingeniería.	99
Figura 53 Comparación de Hidrogramas generados con los métodos SCS y Onda Cinemática (KW) con el hidrograma generado por C.G.R. Ingeniería.	100
Figura 54 Hidrograma de caudales líquidos generado por el método SCS de la tormenta de diciembre de 1999.	102
Figura 55 Tanque de almacenamiento de agua, aguas arriba de la población de Macuto.	104
Figura 56 Sección de estudio en el año 1998.	105
Figura 57 Sección de estudio en el año 1999-2000.	105
Figura 58 Árbol en la sección de estudio (febrero 2001).	107
Figura 59 Árbol en la sección de estudio, visto desde el tanque (noviembre 2001).	107
Figura 60 Secciones transversales del río en los años 1998 y 1999-2000.	108
Figura 61 Sección transversal del río en la topografía digital de 1998.	110
Figura 62 Caudal V. Profundidad del flujo para diferentes valores de rugosidad en la sección transversal del río en año 1998.	111
Figura 63 Sección transversal de la topografía digital de 1999-2000.	112
Figura 64 Caudal V. Profundidad del flujo para diferentes valores de rugosidad en la sección transversal del río en año 1999-2000.	113
Figura 65 Topografía Digital antes diciembre 1999 en el área de la población de Macuto.	115
Figura 66 Río San José de Galipán. Secciones de estudio del cauce.	116
Figura 67 Perfil longitudinal en el área de estudio del Río San José de Galipán (año 1998). Se observa la superficie del terreno usada y el fondo del canal.	117
Figura 68 Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos	

para la tormenta de 3 días de duración de diciembre del 99.	118
Figura 69 Escenario 1. Canal. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	120
Figura 70 Escenario 1. Canal. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.	120
Figura 71 Escenario 1. Canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	121
Figura 72 Escenario 1. Canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	121
Figura 73 Escenario 2. Canal. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	124
Figura 74 Escenario 2. Canal. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.	124
Figura 75 Escenario 2. Canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	125
Figura 76 Escenario 2. Canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.....	125
Figura 77 Topografía Digital de Septiembre del 2000 en el abanico fluvial del Río San José de Galipán.	127
Figura 78 Sitio de estudio Macuto. Perfil longitudinal del Río San José De Galipán (Septiembre 2000). Se observa la superficie del terreno usada y el fondo del canal.....	128
Figura 79 Río San José de Galipán. Secciones de estudio del cauce.....	130
Figura 80. Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos (Tr = 10 años) del Río San José de Galipán.....	131
Figura 81 Escenario 1. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 10 años).	133
Figura 82 Escenario 1. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 10 años).	133
Figura 83 Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos (Tr = 100 años) del Río San José de Galipán.	134
Figura 84 Escenario 2. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 100 años).....	136
Figura 85 Escenario 2. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 100 años).	136
Figura 86 Río San José de Galipán. Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos (Tr = 500 años).....	137
Figura 87 Escenario 3 Con canal. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).....	139
Figura 88 Escenario 3 Con canal. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).....	139
Figura 89 Escenario 3 Con canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).	140
Figura 90 Escenario 3 Con canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).	140
Figura 91 Sitio de estudio Macuto. Mapa de Amenaza.....	142

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Hidrogramas de crecidas para la cuenca del río San José de Galipán elaborado por C.G.R.

Ingeniería.

Anexo 2 Granulometría de Ingeroca para Amigos de Defensa Civil.

Anexo 3 Valores del hidrograma de la creciente de 3 días de diciembre de 1999.

Anexo 4 Archivos de datos del programa FLO-2D para la simulación de la creciente de diseño de

Tr = 500 años, escenario 3 con canal.

Anexo 5 Caudales de la sección de estudio en el año 1998 y en el año 1999-2000.

Anexo 6 Mapa de Amenaza.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	Área total
d ₁₀	Diámetro del Tamiz pasante del 10 % de la muestra
d ₆₀	Diámetro del Tamiz pasante del 60 % de la muestra
Dd	Densidad de drenaje
ds	Tamaño sedimento
u	Velocidad
Fd	Frecuencia de drenaje
h	Hora
Kc	Índice de Compacidad o de Gravelius
km	Kilómetros
Lt	Longitud total de los cursos de agua
m	Metros
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
P	Perímetro de la cuenca
s	Segundos
TSM	Temperatura superficial del mar
U	Coefficiente de Uniformidad
α β σ	Coefficientes empíricos definidos por un análisis reológico del material
<i>h</i>	Rugosidad según Manning

GLOSARIO GENERAL

ALUD TORRENCIAL: Avalancha propia de las zonas con fuerte pendiente que se origina por diversas causas: vibración, desprendimientos de sólidos o vegetación por la acción de lluvias prolongadas y de alta intensidad.

AVENIDA: Aumento súbito del volumen de un curso fluvial como consecuencia de un aporte de agua superior a su capacidad de almacenamiento, que puede conducir a su desbordamiento e inundación. Pueden clasificarse en continuas y discontinuas. Las avenidas continuas están asociadas a las características de la cuenca y suelen tener un período de retorno bajo. Las discontinuas se asocian principalmente a fenómenos climáticos y tienen un período de retorno alto.

CAUCE: Lecho de toda corriente fluvial, sea permanente u ocasional.

CICLÓN EXTRATROPICAL: Cualquier ciclón que no tiene origen tropical. Generalmente se le considera como ciclón migratorio frontal que se presenta en latitudes altas y medias. También se le llama tormenta extratropical o baja extratropical.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD: Indica la pendiente media de la parte central de la curva granulométrica, comprendida entre el 60 y 10%. Cuanto más inclinada es la curva granulométrica, más se acerca el conjunto de granos a uno de esferas del mismo tamaño.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

CONO DE DEYECCIÓN: Masa de materiales no cohesivos dispuestos en forma de abanico que han sido depositados por un curso de agua al pie de una zona con mucha pendiente.

DENSIDAD DE DRENAJE (Dd): Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la

cuenca y su área total.

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

DESLAVES: Aludes torrenciales o avalanchas de barro, roca, detritos y restos de vegetación.

DETRITOS: Materiales resultantes de la descomposición de rocas sólidas en partículas, tales como arena, fango, cuyo origen son rocas más antiguas.

EFFECTO O FUERZA DE CORIOLIS: Fuerza por unidad de masa que se forma a partir de la rotación de la tierra y que actúa como una fuerza de desviación. Depende de la latitud y de la velocidad del objeto en movimiento. En el hemisferio norte, el aire es desviado hacia el lado derecho de su ruta, mientras que en el hemisferio sur el aire es desviado hacia el lado izquierdo de su ruta.

EROSIÓN: Conjunto de procesos geológicos superficiales que modifican la forma de las rocas.

ESCALA SINÓPTICA: Dimensión de los sistemas migratorios de alta y baja presión en la troposfera cubriendo una área horizontal de 1000 a 2500 Km.

ESCORRENTÍA: Parte del agua procedente de la lluvia que no se evapora, deposita ni infiltra, sino que corre por la superficie terrestre.

EVAPORACIÓN: Proceso físico por el cual un líquido, como el agua, se transforma a su estado gaseoso, como el vapor de agua. Es el proceso físico opuesto a la condensación.

EVAPOTRANSPIRACIÓN: Cantidad de agua que se transfiere de la superficie de la tierra a la atmósfera. Se forma por la evaporación del agua líquida o sólida y de la transpiración de las plantas.

Sinónimo de evaporación total.

FORMACIÓN GEOLÓGICA: Conjunto de estratos de características litológicas similares.

FRECUENCIA DE DRENAJE (F_d): Es la relación entre el número total de cauces y el área de la cuenca.

$$F_d = \frac{\Sigma \text{segmentos}}{A}$$

FRENTE: Superficie de contacto o frontera entre dos corrientes de aire de propiedades distintas, que comporta variaciones bruscas de temperatura y humedad. Los frentes pueden clasificarse como estacionarios y móviles. Los móviles son de mayor importancia en términos meteorológicos y son de tres tipos: cálidos, fríos y ocluidos.

FRENTE FRÍO: Zona frontal de una masa de aire frío en movimiento que empuja aire más cálido a su paso. Generalmente, con el paso de un frente frío, disminuye la temperatura y la humedad, la presión aumenta y el viento cambia de dirección. La precipitación ocurre generalmente dentro o detrás del frente. En el caso de un sistema de desplazamiento rápido puede desarrollarse una línea de tormentas precediendo al frente.

HURACÁN: Es el nombre de un ciclón tropical con vientos sostenidos de 65 nudos (117 km / h) o más que se desarrolla en el Atlántico Norte, Mar Caribe, Golfo de México y al este del Pacífico Norte. Este mismo ciclón tropical es conocido como tifón en el Pacífico Occidental y como ciclón en el Océano Índico.

IMÁGENES DE SATÉLITE: Son imágenes tomadas por el satélite meteorológico, revelan información como el flujo del vapor de agua, el movimiento de los sistemas frontales y el desarrollo de un sistema tropical. Las imágenes continuas en pantalla ayudan a los meteorólogos en sus pronósticos. Las imágenes pueden ser tomadas de manera visible en las horas de luz del día o también usando IR o rayos infrarrojos que revelan la temperatura de las nubes tanto de día o de

noche.

ÍNDICE DE COMPACIDAD O DE GRAVELIUS (K_c): Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca. Cuanto más irregular es la cuenca, mayor es el índice de compacidad y la concentración del escurrimiento en función del tiempo es más lenta.

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{A^{1/2}}$$

LLUVIAS: son las formas más frecuentes de precipitación. Están formadas por gotas líquidas de diámetro variable.

MOVIMIENTO DE MASAS: Conjunto de procesos por los cuales los materiales terrestres, con frecuencia previamente afectados por la meteorización, se movilizan en masa por la acción de la gravedad terrestre. Los movimientos pueden ser rápidos como los desprendimientos, caídas, hundimientos y deslizamientos; o lentos como la soliflucción y la reptación.

ORDEN DE LA CUENCA: es la medición de la ramificación del cauce principal en la cuenca hidrográfica, está dado por el número de orden del cauce principal.

PELIGROSIDAD: Cuantifica la probabilidad de ocurrencia de eventos naturales futuros que pueden afectar en forma adversa las obras construidas y la vida de sus ocupantes.

PENDIENTE: Grado de inclinación, ya sea expresada como una porción entre intervalo vertical (reducido a la unidad) y su equivalente horizontal, o como medida angular referida a la horizontal.

PERÍODO DE RETORNO: es el inverso de la probabilidad de que ocurra un evento determinado en el lapso de un año. Lapso promedio de tiempo entre eventos naturales de magnitud o intensidad comparables. Es cercanamente igual a la inversa de la probabilidad anual de excedencia.

PRECIPITACIÓN: Cualquier y todas las formas del agua, en estado líquido o sólido, que cae de las nubes hasta llegar a la tierra. Esto incluye la lluvia, llovizna, llovizna helada, lluvia helada, granizo, hielo granulado, nieve, granizo menudo y bolillas de nieve.

RELACIÓN DE BIFURCACIÓN: es la relación entre el número de ríos de cualquier orden y el número de cauces en el siguiente orden.

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

RELACIÓN DE LONGITUD: es la relación que hay entre la longitud media de los segmentos de orden u, con la longitud media de los segmentos de orden menor u-1.

$$R_L = \frac{\overline{L_u}}{\overline{L_{u-1}}}$$

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN: es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del caudal de equilibrio. Es el tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

Fórmula de Kirpich:

$$T_c = 0,0195 \left[\frac{L_c^3}{H} \right]^{0,385}$$

ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL (ITCZ): Área en los hemisferios norte y sur donde convergen los vientos alisios, generalmente localizada entre los 10 grados al norte y sur del ecuador. Es una amplia área de baja presión donde tanto la fuerza de coriolis como la baja presión gradual son débiles, permitiendo la formación ocasional de perturbaciones tropicales. Durante el verano en el hemisferio norte, cambia de lugar siguiendo los rayos solares más perpendiculares, por ejemplo,

avanzando hacia el norte sobre el sur de Asia y el Atlántico Norte.

VAGUADA O ZONA DE BAJA PRESIÓN: Es un área alargada de baja presión atmosférica que se asocia con un área de circulación ciclónica mínima. 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. Área estrecha y alargada de bajas presiones atmosféricas entre dos áreas de presiones más elevadas.

1. INTRODUCCIÓN

El flujo de aludes torrenciales es conocido también como flujo de barro y escombros, las partículas finas son soporte del material grueso, el cual se lubrica con el agua al moverse. Ocurre cuando el material sólido que represa una corriente de agua se pone en movimiento por acción de ella, se rompe violentamente, el flujo tiene gran ímpetu y gran capacidad destructiva.

Para que ocurra el flujo de aludes torrenciales es necesario o que ocurra un movimiento sísmico o que llueva, entonces el material comenzará a moverse y se desplazará largas distancias, aún en pendientes suaves y uniformes, iguales o menores al ángulo de reposo del material del lecho.

La parte frontal del flujo se presenta como un frente móvil y la profundidad del mismo se incrementa abruptamente. Las piedras más grandes se acumulan en el frente, donde además hay muy poca agua, por lo que esta parte del fenómeno se denomina "flujo de rocas". La parte frontal del flujo, donde se concentran las rocas más grandes, continúa por unos pocos segundos, la parte siguiente es un flujo de barro con un caudal que disminuye gradualmente. El flujo va acompañado con un ruido ensordecedor.

En diciembre de 1999, a lo largo de la costa del litoral central de Venezuela y en varias quebradas al norte de Caracas ocurrieron importantes aludes torrenciales ocasionados por las intensas lluvias caídas en el país en ese mes, que afectaron de manera dramática la región, causando una gran devastación y pérdidas de vidas humanas.

Estos aludes no se pueden evitar, pero conociendo sus características y los efectos de estos sobre la región, se podrían tomar medidas preventivas y correctivas para disminuir las pérdidas económicas, evitar las humanas, mediante la construcción de obras hidráulicas que controlen y encaucen los aludes alejándolos de las zonas pobladas en riesgo.

1.1. ANTECEDENTES

Los cambios físicos que ocurren en la Tierra vienen dados por la acción de los elementos en el tiempo. Por una parte, por el lento proceso de erosión y arrastre de sedimentos de los ríos, y por otra el ambiente cambia de manera dramática por eventos de corta duración, horas o días, pero de gran intensidad, magnitud y consecuencias.

Los aludes torrenciales, las inundaciones y los deslaves han sido frecuentes en la Cordillera de La Costa, tanto en la vertiente Norte como Sur. Se desencadenan usualmente bajo los efectos de huracanes, frentes fríos, vaguadas y nortes, que actúan sobre la costa.

A continuación se hace una reseña de las inundaciones y eventos torrenciales más importantes ocurridos en el Litoral Central.

Existen registros históricos desde el siglo XVI, donde se reseñan los efectos de las lluvias. Para el año 1578, D. Juan de Pimentel escribió sobre deslizamientos provocados por las fuertes lluvias del invierno de ese año (Pacheco, G., 2002). En el siglo XVII se presentaron lluvias torrenciales en Caracas, no se conocen los efectos sobre la vertiente norte de la Cordillera, tal vez por la baja densidad demográfica de las áreas pobladas, por las limitadas fuentes de información y que al no causar daños sobre los bienes y las personas no fueron noticia (Pacheco, G., 2002).

Entre el 12 y 14 de octubre de 1780 las lluvias torrenciales y vientos ocasionados por el paso de un huracán, afectaron el Puerto de La Guaira "...*La torrencial lluvia falseó además el terreno de las estribaciones de la serranía, en que se asentaban algunos puntos de defensa, como el de Gavilán en Macuto, el cual puso en peligro la estabilidad de sus muros, que quedaron en muy mal estado, amenazando con derrumbarse...*" (Pacheco, G., 2002).

Del 11 al 13 febrero de 1798 se desarrolló una tormenta debida a la presencia de un norte sobre La

Guaira. Los ríos que atraviesan las poblaciones de Macuto, Maiquetía y La Guaira arrastraron piedras, barro y árboles. En el Expediente al Alto Tribunal de Caracas se reportó el arrastre de piedras, sedimento fino y vegetación, la destrucción de puentes y otras estructuras, quedando la muralla, en la Guaira, como único punto de comunicación entre ambas partes del pueblo (Sardi, V., 1959)

Para el siglo XIX son pocas las referencias encontradas sobre aludes torrenciales en la vertiente norte de la Cordillera. Se sabe de un fuerte temporal sobre La Guaira para el 22 de octubre de 1817; lluvias torrenciales para el 31 de diciembre de 1822; en el año 1845 inundaciones en el Río Osorio; en 1881 inundaciones en la Quebrada Curucutí. La última década de este siglo presentó copiosas lluvias y el efecto del paso de varios huracanes siendo los años más notables 1892, 1895, 1896, 1899 (Pacheco, G., 2002).

Para el año 1909, Macuto, La Guaira y Maiquetía sufrieron lluvias y vientos huracanados, los ríos inundaron las poblaciones arrastrando barro y piedras (Pacheco, G., 2002).

En agosto de 1912 fuertes lluvias afectaron las poblaciones al este de Anare (Sardi, V., 1959).

El 14 de enero de 1914 se describió una tormenta de tales proporciones que la crecida del río, así como los derrumbes arrasaron con viviendas, personas y plantaciones. Se midió más de 1200 mm y con duración de cerca de 6 horas. (Sardi, V., 1959)

El 15 de agosto de 1924 lluvias torrenciales desbordan el Río Osorio, ocurren deslaves y avenidas de barro y piedras. Se estimó en 580 mm de agua caídos en pocas horas (Pacheco, G., 2002).

1938 fue un año de intensas precipitaciones que afectaron distintos puntos de la geografía del país, como la Cordillera de la Costa, la Serranía del Interior, la región de Barlovento y otras regiones del occidente. Para el 17 del noviembre se desbordaron los ríos Osorio en la Guaria y El Colorado en

Maiquetía. Se reportan cauces desbordados que cubren más de un metro de altura sobre el nivel de la calle, obstrucciones de piedras y fango dejados por las crecidas y derrumbes en la avenida que comunica Macuto y Maiquetía. El 29 de este mes, un temporal más fuerte que los que habían ocurrido días antes, azotó el litoral concentrándose en el sector del Río Piedra Azul y de las quebradas Curucutí y Mañonga. Con el derrumbe de algunos cerros quedaron ciertas calles enterradas con poco más de dos metros de sedimentos (Pacheco, G., 2002). El 25 de noviembre de 1938 se destruyen viviendas y se pierden vidas humanas en Maiquetía (Sardi, V., 1959).

El 9 de mayo de 1944 debido a las lluvias torrenciales, el Río Mamo se desborda destruyendo viviendas, la carretera principal y otras estructuras. La C.A. Electricidad de Caracas registró en sus pluviómetros 405.8 mm en la Planta de Caoma (Sardi, V., 1959).

El 4 de agosto de 1948 entre las poblaciones de Piedra Azul y Camurí Chiquito se desata una tormenta en la parte media y alta de las cuencas. Se registró a la altura de 1618 msnm una precipitación de 455 mm, en cambio a niveles cercanos al mar se registraron lluvias de 34 y 67 mm, para ese día (Sardi, V., 1959), siendo afectado el sector comprendido entre Piedra Azul y Camurí Chico con inundaciones de barro y escombros.

El evento del 15 y 16 febrero de 1951 fue antecedido por dos semanas continuas de lluvias. Afectó las poblaciones de Caracas, San José de Galipán, Choroní, Ocumare de la Costa, Arrecife, Catia La Mar, Maiquetía, La Guaira, Punta de Mulatos, Macuto, El Cojo, Caraballeda, Tanaguarena, Naiguatá, Anare y Los Caracas. Aumentaron el caudal de los ríos o quebradas Choroní, Chuao, Paraulata, Maya, Limón, Chichiriviche, Úrica, Mamo, Tacagua, La Zorra, Piedra Azul, Osorio, Punta de Mulatos, Macuto, El Cojo, Camurí Chiquito, San Julián, Cerro Grande, Uria, Naiguatá, Anare, Los Caracas y muchas otras quebradas de las que no se llevaban registro (Sucre, O., 1951). La tormenta se ubicó

cerca de la zona El Infiernito; al este de la cuenca Cerro Grande los efectos de esta fueron menores (C.G.R. Ingeniería, 2000). Además del daño a los bienes y a la población, avanzó la línea de costa en los sitios de las desembocaduras de los cauces.

Para el 25 del mismo mes se repite el fenómeno en Mamo y Arrecifes, y el 26, en los Caracas (Pacheco, G., 2002).

En 1954 lluvias de fuertes proporciones afectan a Los Caracas (Pacheco, G., 2002).

A finales de enero de 1969, lluvias torrenciales aumentan los caudales de los cauces afectando las poblaciones entre Caruao y Caraballeda.

En 1987, la ciudad de Maracay fue afectada por el alud torrencial que ocurrió en el Río El limón el 06 de septiembre, teniendo su centro en el Picacho de Rancho Grande, aquí se registró 183 mm de agua en seis horas.

En 1993 con el paso del huracán Bretch parte del territorio nacional se vio afectado mas no así el Litoral Central (Pacheco, G., 2002).

El evento más catastrófico hasta ahora ocurrido es el de diciembre de 1999, desató aludes torrenciales en las cuencas de ríos y quebradas entre Maiquetía y Camurí Grande, y numerosos deslizamientos en las laderas de las montañas ...“La evidencia de los deslaves parece indicar que dentro de la zona de mayor precipitación... hubo una región entre Camurí Chico y Uria donde la tormenta se concentró con mayor fuerza, desde la cota 1500 hasta el nivel del mar”... (C.G.R. Ingeniería, 2000). Los cauces desbordados arrastraron barro, piedras y escombros, destruyendo a su paso estructuras, edificaciones, vías de comunicación, vehículos, llevándose también vidas humanas. Además de que físicamente este evento fue de mayores proporciones, las poblaciones estaban y están asentadas invadiendo el cauce y los conos de deyección de la mayoría de los ríos y

quebradas.

La literatura señala como los eventos de mayor magnitud a los ocurridos en los años 1798, 1938, 1948, 1951, 1987 y 1999. En la Tabla 1 se presenta en forma esquemática los registros históricos de lluvias torrenciales que han afectado la vertiente norte de la Cordillera de la Costa desde la época de la Colonia hasta el año 1999.

Tabla 1 Registros históricos de lluvias torrenciales en la vertiente norte de La Cordillera de La Costa (Fuentes: Pacheco, G.,2002 y Sardi, V. ,1959)

AÑO	LOCALIDAD
1528	Cordillera de la Costa
1740	Osorio, La Guaira
1780	Osorio, La Guaira, Macuto
1797	Osorio, La Guaira
1798 Febrero 11 al 13	Maiquetía, La Guaira, Macuto
1817 Octubre 22	La Guaira
1822 Diciembre 31	La Guaira
1845	Osorio
1881	Curucutí
1892	La Guaira
1895	La Guaira
1896	La Guaira
1899	La Guaira
1909	Maiquetía, La Guaira, Macuto
1912 Agosto	Anare a Caruao
1914 Enero 14	Hacienda Pto. La Cruz
1924 Agosto 15	Osorio
1927 Octubre 30	Hoya del río Agua Caliente (El Palito)
1938 Noviembre 25	Maiquetía, Osorio, La Guaira, Punta de
1944 Mayo 9	Hacienda Chichiriviche, Osorio, La Guaira,
1948 Agosto 4	Maiquetía, La Guaira, Punta de Mulatos,
1951 Febrero 15 al 17	Choroní a Caruao
1951 Febrero 26	Los Caracas, Mamo - Arrecifes
1954 Diciembre 14	Los Caracas
1969 Enero	Desde Caruao a Caraballeda

AÑO	LOCALIDAD
1972	Osorio, La Guaira
1975	Macuto
1977	Maiquetía
1978	Catía La Mar, Maiquetía
1979	Catía La Mar, Maiquetía, La Sabana
1987	Río El Limón Maracay
1999	Desde Arrecife hasta Anare

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la época de la Colonia, La Corona Española había establecido ordenanzas especiales en las Leyes de Indias para regir espacialmente la fundación de ciudades y pueblos, donde se consideraba la acción de los fenómenos naturales (Pacheco, G., 2002). Desde entonces y cada vez más, el hombre ha venido ocupando zonas de alta peligrosidad, por necesidad del espacio y por ignorancia del entorno. Muchas vidas y dinero podrían ahorrarse con una adecuada planificación del territorio, basándose en el estudio del alcance de los fenómenos naturales sobre el ambiente.

El alud torrencial es uno de esos fenómenos que ponen en riesgo la vida humana, tienen un gran poder de destructivo. Su estudio contribuye a la comprensión del fenómeno, al diseño de obras de control y protección, y a la planificación urbana.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Analizar las causas y consecuencias de los aludes torrenciales ocurridos en diciembre de 1999 en la cuenca del Río San José de Galipán.

- Desarrollo de una metodología para la determinación de zonas amenazadas por flujo de aludes torrenciales.

- Aplicación de la metodología desarrollada a la cuenca del Río San José de Galipán, en la serranía del Ávila en su ladera norte.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con la tragedia de Vargas en el año 1999 toman vigencia en el país una serie de artículos y publicaciones sobre aludes torrenciales. A partir de entonces la investigación sobre el tema ha dado pie a otro gran tiraje de ellos, tanto a nivel nacional como internacional. A continuación se hace una breve explicación del fenómeno, donde se citan aquellos documentos que han sido consultados en este trabajo.

J. Aguirre y A. Moncada en su trabajo *"regímenes en el flujo de barros y escombros"* idealizan a los flujos reales como flujos de medios continuos, fluidos homogéneos en régimen laminar o como flujos dispersivos que disipan la energía por medio de los choques y roces de las partículas y clasifican al flujo de agua con sedimentos en aluviones, flujo hiperconcentrado, flujo de barro y flujo de barro y escombros.

Los flujos de agua con sedimentos en aluviones son flujos con sedimento fino suspendido que se desplazan como un súbito aumento en el caudal, provocando inundaciones generalmente. Las partículas en suspensión no están en contacto permanente entre sí y el material grueso es arrastrado como carga de fondo. La viscosidad es mayor que la del agua. Se considera como un flujo bifásico, donde las fases sólidas y líquidas fluyen separadamente. Las concentraciones volumétricas de sedimentos son menores a un 20 %.

Los Flujos hiperconcentrados o Mud floods son flujos con alta concentración de partículas no cohesivas. La fase líquida controla el movimiento y la deposición de los sedimentos. Se considera como un flujo bifásico, donde las fases sólidas y líquidas fluyen separadamente. El flujo es turbulento, su resistencia depende de la rugosidad del contorno. La concentración volumétrica de los sedimentos puede llegar a ser hasta 40 %.

El Flujo de barro o Mudflows es un fluido muy viscoso, con un alto contenido de limo y arcillas, lo que le da la capacidad de transportar cerca de la superficie rocas de gran tamaño. La concentración volumétrica de sedimentos está entre 45 y 55 %. Puede viajar largas distancias a bajas velocidades y dejar depósitos de sedimentos en el cono de deyección.

Los flujos de barro y escombros o Debris flows son un tipo de flujo hiperconcentrado, que viaja por gravedad, son rápidos e inestables, no permanentes y pulsátiles, con una alta concentración de sedimentos finos y gruesos, agua, aire y escombros rugosos de madera. Se desarrollan en montañas de altas pendientes con velocidades de hasta 15 m/s. Las propiedades reológicas del material causan un perfil típico de velocidad horizontal y una distribución uniforme de velocidad a todo lo ancho del canal. Son flujos caracterizados por el poder destructivo del frente móvil que está compuesto de rocas. El flujo de barro y escombros no viscoso, es turbulento, la concentración de arcilla es baja, las partículas de arena están suspendidas en el flujo y las grandes rocas se mueven como carga de fondo. En el flujo de barro y escombros viscoso, los esfuerzos cortantes y las fuerzas viscosas son altas, el flujo se comporta como laminar (Wan & Wang, 1994).

El flujo de barro y escombros se presenta en oleadas, cuya forma puede ser descrita en tres partes (Hübl & Steinwendther, 2000):

- El frente está constituido por rocas de gran tamaño, incluso de varios metros de diámetro, y por un bajo contenido de agua y sedimentos, controla la velocidad de todo el flujo.
- El cuerpo, sigue al frente, se desarrolla como flujo laminar debido a su alta viscosidad; el tamaño de los sedimentos es menor.
- La cola, sigue al cuerpo, hay un incremento en la concentración del agua, la concentración de sedimentos y la viscosidad disminuyen, la matriz de sedimentos es más fina y el flujo se

torna turbulento.

La profundidad del agua decrece desde el frente hasta la cola. En las etapas de la ola donde el flujo es turbulento puede arrastrar material de fondo. Cuando una ola del flujo de barro y escombros pierde volumen progresivamente se detiene, la mezcla de sedimentos y agua reduce su velocidad hasta que se para sin perder su forma. El frente de la ola puede llegar a medir algunos metros de altura, la extensión del cuerpo y de la cola pueden alcanzar hasta cientos de metros de largo.

La producción del flujo de barro y escombros dependerá de la geología, la topografía, de las condiciones meteorológicas y de las hidrológicas. Se inicia cuando las fuerzas de corte superan las fuerzas de la gravedad. Se desencadena principalmente por cuatro mecanismos (Hübl & Steinwendther, 2000):

- Licuefacción de la masa de la capa de la tierra: ocurre durante o inmediatamente después de una lluvia intensa, al penetrar el agua en la capa del suelo, desplaza el aire que está entre las partículas, aumenta el empuje del agua en el suelo hasta que se pierde la cohesión de estas y se desencadena el movimiento.
- Licuefacción de los depósitos del torrente: ocurre cuando una masa de la capa de suelo falla y cae en el torrente, y se mezcla con el agua.
- Falla del fondo del canal: ocurre con la desestabilización del fondo del canal y de la superficie de escurrimiento, pasa rápidamente de un flujo hiperconcentrado a flujo de barro y escombros.
- Colapso de un dique natural en el canal: ocurre al fallar dique formados por la acumulación de restos vegetales, como troncos de árboles, rocas que taponan el paso y que ha elevado el nivel de las aguas, se desarrolla un flujo con altas velocidades y capacidad destructora.

Los fenómenos de inestabilidad observados en los taludes han sido clasificados como:

- Desprendimientos: ocurren cuando la masa inestable de suelo o roca cae, suele ocurrir en época de lluvia o después de una fuerte lluvia. Este tipo de fenómeno fue observado en la cuenca de Galipán (Grases et al, 2000).
- Corrimiento: es cuando una superficie del terreno falla. Sus características dependen del comportamiento mecánico del material, del tipo de mecanismo que activó la falla, como lluvias, sismos, etc.

Los corrimientos a su vez se clasifican en:

- Deslizamientos: una masa de suelo se desliza sobre otra a lo largo de una superficie de falla. Esta puede ser plana, curva o quebrada y de cuña. Cuando el deslizamiento es de rocas es parecido al desprendimiento, aunque este último su volumen es menor y las fuerzas de tracción son predominantes.
- Flujo de arcilla: es el movimiento lento de una masa compuesta con arcilla y gran cantidad de agua.
- Reptación: Movimientos muy lentos del terreno debido a su rotura.
- Corrimientos provocados por licuefacción o análogos: ocurre en terrenos no compactados e inestables compuestos principalmente por arenas finas y limos.

El flujo de barro y escombros puede ser clasificado según las características, el peso específico y la densidad de la mezcla en (Hübl & Steinwendther, 2000):

- Viscoso: el flujo es laminar, el esfuerzo cortante es alto, y frecuentemente es intermitente.
- Sub-viscoso: los esfuerzos cortantes son menores, el flujo es continuo y turbulento.

- No viscoso: es un flujo Newtoniano y muy turbulento.

De acuerdo a la composición del material sólido se clasifica el flujo de barro y escombros en (Hübl & Steinwendther, 2000):

- Flujo de barro y rocas (Mud-rock flow): compuesto de barro y piedras. Los sedimentos pueden estar compuestos desde arcillas más finas que 0.001 mm, en cantidades del 3 al 5 % de la mezcla, hasta rocas de varios metros de diámetro. La mezcla de los materiales es pobre y se parece al flujo del concreto recién mezclado.
- Flujo de barro (Mud flow): compuesto de arcilla y arena. El contenido de arcilla es mayor al 15 %. Es un flujo no-newtoniano y se puede desarrollar como flujo intermitente.
- Flujo de agua y rocas (Water rock flow): está compuesto de marble, dolomitas, limestone y rocas con lomeradas del área o granitos de las montañas. Está compuesto de arenas, gravas y boques de gran tamaño, se mueve como un flujo laminar.

En la recopilación de trabajos de J. O'Brien se caracteriza y clasifica a los flujos según los siguientes parámetros adimensionales:

- Fuerza cortante adimensional: Si $t^* = 1$, la mezcla se comporta como un flujo de Plástico de Bingham

$$t^* = \frac{t - t_y}{h \frac{du}{dy}}$$

Donde:

t : Fuerza cortante total

t_y : Esfuerzo de cedencia

h : Viscosidad dinámica de la mezcla

u : Velocidad

- Relación Dispersiva-Viscosa: A menor D_v^* mayor viscosidad en el flujo.

$$D_v^* = \frac{\mathbf{r}_s \mathbf{I}^2 d_s}{h} \left(\frac{du}{dy} \right)$$

Donde:

\mathbf{r}_s : Densidad del sedimento

\mathbf{I} : Concentración lineal de sedimento

d_s : Tamaño del sedimento

- Relación Turbulenta-dispersiva: A mayor T_d^* mayor es la turbulencia en el flujo

$$T_d^* = \frac{\mathbf{r}_m \mathbf{I}_m^2}{a_i \mathbf{r}_s \mathbf{I}^2 d_s^2}$$

Donde:

\mathbf{r}_m : Densidad de la mezcla

\mathbf{I}_m : Longitud de mezcla

a_i : Coeficiente, aproximadamente igual a 0,01

- Los flujos hiperconcentrados (Mud floods) ocurren cuando dominan las fuerzas cortantes

$$D_n^* > 400 \text{ y } T_d^* > 1$$

- Los flujos de barro (Mudflows) ocurren cuando son dominantes las fuerzas viscosas y los esfuerzos cortantes

$$D_n^* < 30$$

- Los flujos de barro y escombros (Debris flow) ocurren cuando las fuerzas dispersivas son dominantes

$$D_n^* > 400 \text{ y } T_d^* < 1$$

- Un régimen de transición existe entre

$$30 < D_n^* < 400$$

En la que la ecuación cuadrática no es aplicable.

Tabla 2 Clasificación del flujo de aludes torrenciales en función de la concentración del sedimento (O'Brien, 2000).

Tipo de Flujo	Concentración de Sedimento		Características del Flujo
	En Volumen	En peso	
Deslizamiento (landslide)	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar
Flujo de barro (Mudflow)	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido del flujo de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.

	Concentración de Sedimento		
Inundación de barro (Mud Floods)	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición fluida inmóvil.
Inundación de agua (water floods)	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo

O. Sucre A., (1951) realiza un trabajo donde describe los daños causados al crecer el caudal de los ríos, a estructuras, a bienes y a personas, por la tormenta del año 1951 que afectó a la zona Central de la costa de Venezuela y a Caracas.

Sardi, V. (1959) escribe un artículo donde además de hacer referencia a las inundaciones que han ocurrido hasta ese entonces en el siglo XX en la Cordillera de la Costa, establece una fórmula donde relaciona el gasto máximo con el área de la cuenca, la cual contribuye a tener una idea de la magnitud de las crecientes que podrían esperarse.

Grases y otros autores (2000), elaboran un libro sobre los efectos de las lluvias caídas en diciembre de 1999 en el Estado Vargas y otras regiones que también fueron afectadas del país. Hacen referencia a antiguos aludes torrenciales ocurridos como el de febrero de 1951. Hacen un análisis de las causas del evento, tanto de las climáticas, las geológicas como de las hidráulicas, y de las consecuencias ambientales, sociales y económicas. Explican que en la Cordillera de la Costa en el Litoral Central los suelos son poco profundos debido a que los promedios anuales de lluvias son moderados y las pendientes son pronunciadas en las laderas de las montañas. Los movimientos de masa que ocurrieron en el Litoral Central provocados por las lluvias de diciembre de 1999 fueron identificados para la parte alta de la Cordillera como caídas y deslizamientos de rocas, y flujo de detritos y de bloques de roca, este último en pendientes superiores a los 45°. En las zonas bajas se identificó el flujo de barros, provenientes de la formación Tacagua, estos caían en el cauce y fueron trasladados a las zonas de deposición y al mar, abarcando amplias zonas. En los cauces, los caudales aumentaron hasta ser flujos torrenciales, compuestos por agua, peñones, detritos, barro y restos vegetales.

En la Tabla 3 se muestra la clasificación de Cruden – Varnes que hacen para los movimientos de masa según su velocidad.

Tabla 3 Clasificación de la velocidad de movimiento de masa según Cruden – Varnes (Grases et al, 2000).

Clase	Descripción	Intervalo Velocidad (m/s)	Desplazamiento	Poder destructor
7	Extremadamente rápido	70 5	> 5 m/s 5 m/s	Catástrofe de violencia mayor, edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes, escape improbable.
6	Muy rápido	5 5 x 10 ⁻²	5m/s 3m/min	Pérdidas de vidas; no todas las personas pueden escapar.
5	Rápida	5 x 10 ⁻² 5 x 10 ⁻⁴	3m/min 1,8 m/h	Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
4	Moderada	5 x 10 ⁻⁴ 5 x 10 ⁻⁶	1,8 m/h 13m/mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse.
2	Lenta	5 x 10 ⁻⁶ 5 x 10 ⁻⁸	13m/mes 1,6 m/año	Construcciones de remediación pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
3	Muy lenta	5 x 10 ⁻⁸ 5 x 10 ⁻¹⁰	1,6 m/año 16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
1	Extremadamente lenta	5 x 10 ⁻¹⁰ 5 x 10 ⁻¹⁰	16 mm/año 16 mm/año	Imperceptibles sin instrumentos; construcción posible pero deben tomarse precauciones.

Pacheco, G. (2002) hace un recuento histórico desde el siglo XVI hasta el año 2000 de las lluvias torrenciales, avenidas y deslaves en la Cordillera de la Costa, y su impacto económico, físico y social sobre la población, causadas por la presencia de huracanes, frentes fríos, etc. Hace mención

también a importantes eventos ocurridos en la costa, en Maracay, Mérida, Barlovento, Valencia y en otros sitios de la geografía venezolana.

C.G.R. Ingeniería, en su informe "*Estudio crecidas cuencas del Litoral Central, DF*" hace un estudio hidrológico de varias cuencas del Litoral Central donde estima los caudales líquidos y los volúmenes de escombros correspondientes. Se trabajó con los hidrogramas para las crecientes de diseño de 10, 100 y 500 años. Calculó el volumen de detritos depositados a la salida de las cuencas en el área de los conos de deyección para el evento de diciembre de 1999.

Del Proyecto de Control de Torrentes de las Cuencas de los ríos San Julián y Camurí Chiquito, estado Vargas, Venezuela, elaborado por la Misión Japonesa del Ministerio de Relaciones Exteriores del Gobierno de Japón y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales M.A.R.N., después de los deslaves de 1.999, se obtuvo el Mapa De Distribución De Sedimentos Depositados y Desbordamiento De Flujo De Barro y Piedras Del Río San José de Galipán, que fue empleado en la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones matemáticas, tanto de la tormenta de diciembre de 1999 como para el análisis de la amenaza en la población de Macuto. Además este informe presenta los parámetros físicos característicos de las cuencas del Estado Vargas.

De profesionales de distintas áreas y de diferentes países, que participaron en el Seminario Internacional "*Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999*", se consultaron los siguientes artículos:

Arismendi, J (2000) describe y analiza la geomorfología y la cobertura natural, y describe los procesos ocurridos en la vertiente norte de la Cordillera de la Costa en diciembre de 1999. Para su trabajo hizo uso de datos de sensores remotos espaciales y aerotransportados adquiridos por los

satélites SPOT-P e IKONOS, y por ortofotomapas a escala 1:25.000.

López, J. L. et al, (2000) en su artículo llamado "*Consideraciones sobre el desastre de Carmen de Uria*", describe en palabras y en fotografías la inundación de Diciembre de 1999 basándose además en versiones de sobrevivientes, hace un estudio de la evolución fluvial del cono de deyección para el Río Uria en Carmen de Uria hasta Diciembre de 1999 y hace un análisis de los factores que causaron el desastre.

La información básica recopilada para la cuenca del Río San José de Galipán, proviene de varias instituciones oficiales, de informes realizados por delegaciones extranjeras con motivo de los aludes torrenciales ocurridos en diciembre del 1999, información bibliográfica, trabajos científicos e información tomada en campo.

3.1. FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Las siguientes fotografías aéreas fueron usadas en la identificación, reconocimiento y estudio de la cuenca del Río San José de Galipán.

Tabla 4 Fotografías Aéreas.

Misión	Procedencia	Año	Escala	Fotografías
8	Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar	1936-1938	1:20.000	534, 536, 597, 595, 871, 873, 514, 516
C-8		1.951	1:24.000	882E, 883E, 887E, 886E
030422		1.962	1:9.000	059, 058, 057
030435		1.965	-	014, 013
030198		1.975	1:25.000	477, 478, 479, 457, 456, 455
0304178		1.991	1:5.000	074, 075
030602		1.998 (Diciembre)	1:5.000	116, 117, 118, 200, 201, 133, 134, 135, 136, 186, 787, 788, 789, 790
030601		DIGECAFA	1999 (Diciembre)	1:5.000

3.2. ORTOFOTOMAPAS

Son las cartas en escala 1:25.000 de la misión de febrero de 1994, donde está ubicada la cuenca

completa del Río San José de Galipán.

Tabla 5 Ortofotomapas.

HOJA
6847- IV – SO
6847 – IV – SE
6847 – IV – NO

3.3. TOPOGRAFÍA DIGITAL

La topografía digital empleada para el estudio fue procesada por ESTEREOFOTOS C.A. para la Autoridad Única de Área del Estado Vargas. Se contó con la topografía del año 1998, la de enero del 2000 y la de septiembre del 2000. Contienen la topografía de la parte media y baja de la cuenca, la escala es 1:1.000 y las curvas de nivel son cada metro.

La topografía digital de 1998 o llamada también "*antes de diciembre 99*", fue usada en el estudio del cauce, en la simulación de la tormenta de diciembre de 1999 y la calibración del modelo FLO-2D empleado. La topografía digital enero del 2000 o llamada como "*después de diciembre 99*" se empleó en el estudio del cauce y de los efectos de la creciente. La topografía digital de septiembre 2000 fue la base del estudio hidráulico del río y del Mapa de Amenaza. Para cada una de estas topografías se elaboró el perfil longitudinal y los cortes transversales del cauce en el área de estudio.

Tabla 6 Planos en formato digital.

Fecha de realización	Planos
1.998 – 1.999	I – L44, J – I43, J – I44, K – L43, K – L44
Enero 2.000	LC – I43, LC – I44, LC – J43, LC – J44, LC – K43, LC – K44
Septiembre 2.000	L2 – I43, L2 – I44, L2 – J43, L2 – J44, L2- K43

3.4. TOPOGRAFÍA

En base a estos planos se calculó el área total de la cuenca, se obtuvo el perfil longitudinal del cauce principal del río desde su parte más alta hasta el nivel del mar y fue empleada para el estudio de la hidrología con el modelo HEC-HMS.

Tabla 7 Cartas topográficas.

Procedencia	Carta	Escala	Año
Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar	6847-IV-SO 6847-IV-SE 6847-IV-NO	1 : 25.000	1.975

3.5. HIDROLOGÍA

El hietograma empleado para generar la tormenta de diciembre de 1999 con el programa HEC-HMS fue suministrado por C.G.R. Ingeniería.

Los hidrogramas para la simulación numérica del flujo de barros y escombros en que se basan los Mapas de Amenaza, fueron tomados del "*Estudio de Crecidas de las Cuencas del Litoral Central y Distrito Federal. C.G.R. Ingeniería*" (Anexo 1). En la Figura 2 se representaron los hidrogramas de las crecientes de 10, 100 y 500 años.

Tabla 8 Caudales máximos.

Período de Retorno (años)	10	100	500
Caudal máximo (m ³ /s)	121,00	320,81	441,07

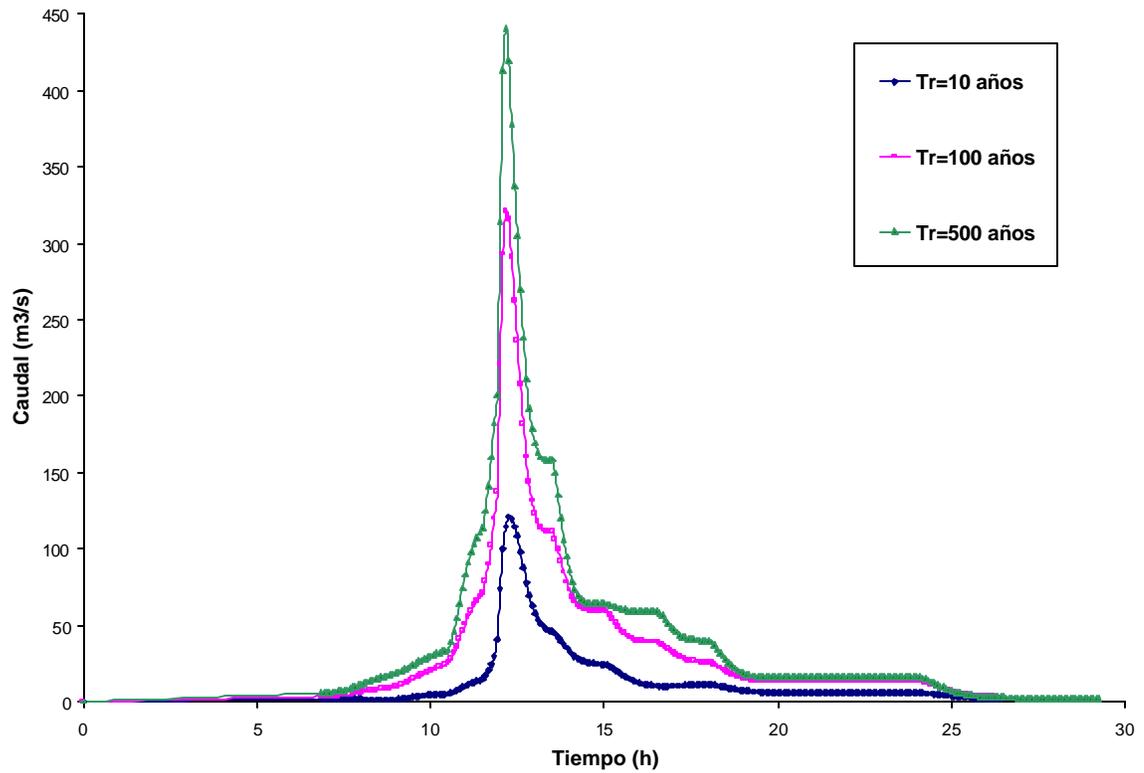


Figura 2 Hidrograma de Crecientes.

3.6. GRANULOMETRÍA

Se recopilaron curvas granulométricas del río San José de Galipán, fueron proporcionadas y por el Ing. Rodolfo Berrios y por Amigos Defensa Civil (Anexo 2), las cuales se presentan en el capítulo cinco.

sobre la vertiente norte más que por el sur (Gonzalez y Córdova, 2000). La Vaguada es un patrón sinóptico de una ondulación del viento en altura, que se mueve del Oeste hacia el Este, generando nubosidad y precipitaciones por lo menos 2 a 5 días, aunque puede durar semanas, se presenta al principio o finales de la temporada seca, pero no necesariamente en todas las temporadas (M.A.R.N., 2000)

El año 1999 fue un año inusualmente lluvioso, extendiéndose la temporada lluviosa más allá del mes de octubre. Una vaguada mantuvo su presencia sobre el Mar Caribe durante 20 días en el mes de diciembre, al ser bloqueada por la presencia de la zona de Alta Presión del Atlántico Norte. A este sistema lo mantenía bloqueado un Ciclón extratropical estacionario sobre el Atlántico Norte, que desprendió un resto de frente frío (M.A.R.N., 2000)

Desde el 29 de noviembre de 1999 la vaguada afectó el Occidente de la Costa. Para el 1 de diciembre se trasladó al Litoral Central. El 3 de diciembre ocurrieron los primeros deslizamientos y desbordes de ríos y quebradas, quedaron tapiados tramos de vías y casas destruidas. Para el 6 y el 7 la vaguada se debilitó, pero permaneció la inestabilidad atmosférica. El día 8 un frente frío reactiva la influencia de la vaguada sobre las costas venezolanas, así hasta el 17 cuando la vaguada empieza a debilitarse (M.A.R.N., 2000).

Las temperaturas superficiales del mar TSM son parámetros empleados para la comprensión de los fenómenos atmosféricos y oceánicos, ya que las masas de aire son afectadas por las superficies con las que entran en contacto. En las dos primeras semanas del mes de Diciembre de 1999, las temperaturas diarias superficiales registradas del Mar Caribe fueron menores a los valores promedios de las series de tiempo para los meses de Septiembre a febrero durante los años 1993 a 1999, calculadas a partir de las imágenes diarias AVHRR para dicho lapso (Gómez, J., 2000). Existe

una relación entre estas temperaturas y el evento de diciembre del 99, aunque no se ha determinado si la nubosidad disminuyó las TSM Caribe o si el evento fue una consecuencia de las temperaturas.

Narraciones de sobrevivientes de la tragedia cuentan sobre lo ocurrido en la población de Macuto, por ejemplo en el libro de El Nacional, Yeliza Linares habla de su experiencia, es de hacer notar que el Edificio Taguapire se encuentra a tres cuadras hacia el Oeste del río San José de Galipán:

"... Eran las 10:30 de aquella noche del 15 de Diciembre ... Desde las ventanas del edificio Taguapire comenzó a verse gente correr calle abajo... cuando comenzamos a ver cómo una ola de agua marrón perseguía por la calle a grupos de gente (...) En la primera media hora el caudal de las aguas disminuyó (...) Vimos, minutos después, como vino otra avalancha de agua, esta vez un poco más fuerte... apenas lográbamos divisar y escuchar los troncos y piedras que arrastraba el río a su paso (...) A las 11:30 p.m. la lluvia arreció y se escuchó como un trueno, pero esta vez el rugido vino de abajo y no paraba: las aguas habían tomado mayor fuerza, parecían licuar las piedras y comenzaban a empujar a un microbús(...) Allí pasamos la noche en vela, escuchando aquel ruido tormentoso de las aguas revueltas y aquella lluvia que no cesaba (...) Unos vecinos veían atónitos, por el frente, la fuerza del agua golpeando, inclemente, a un árbol, levantando una ola y chocando contra el edificio... cuando vieron como cayó abajo una casa de tres pisos: "igual puede llevarse al Taguapire". En ese instante alguien dijo: "Subamos al Pent House, porque el agua llega al primer piso"... Sentimos los golpes en las bases de la edificación, la estructura llegó a vibrar varias veces... "el cauce del río se había desviado", y era cierto, seguía lloviendo pero ya no escuchábamos los golpes en las bases. Las aguas formaron una sedimentación de fango frente al edificio y tomaron otro rumbo (...) Estábamos caminando por lo que había sido hacía pocas horas, el cauce del río. Las aguas bajaban a un lado con menos fuerza (...)" (El sábado) A las 7:00

a.m... "Ahí viene el río, viene el río, métanse en el seminario"... Pero la crecida no lo fue tanto, nunca será tanto como la del 15 de diciembre." (Linares, Y, 2000)

Otra descripción de los daños ocurridos en Macuto fue tomada del libro de J. Grases y otros sobre Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en diciembre de 1.999, donde textualmente dice:

"Las aguas acabaron con la Avenida La Playa, área de esparcimiento. La Posada del Hidalgo y el restaurante Trattoría fueron violentados. Las casas vacacionales de finales del siglo XIX fueron tapiadas por barro. El río la Veguita, uno de los más caudalosos de Vargas se trajo otro aluvión de piedras que cubrieron la plaza de Las Palomas (plaza Andrés Mata), la cual está inundada. El área de la urbanización Guanape II fue destruida por el lodo y las rocas. A la izquierda del sector Nuevo Mundo, viendo el mar, está la quebrada Nuevo Mundo, y a la derecha la quebrada La Veguita. Las máquinas habían ido a reparar los daños de las lluvias pasadas. Pero en la mañana del día 16 se empezaron a ir las casas y todo quedó tapiado. Se salvaron montados sobre el Liceo Pedro Elías Gutiérrez. A medianoche del día 15 la gente refugiada en el coro de la iglesia veía como el agua crecía y pasaban inmensas rocas sobre olas de lodo; el párroco, resignado, los absolvió esperando lo peor, pero las aguas empezaron a bajar. Las casas de la Avenida España fueron sepultadas por el lodo del río La Veguita, sobre cuya corriente"...las rocas flotaban como corchos. En la Avenida Álamo de esa población (detrás de La Guzmania) se produjo una gran obstrucción."

4.1. REGISTROS HIDROLÓGICOS

Las personas que presenciaron los aludes torrenciales en Macuto y en otras cuencas, observaron varias crecidas o avenidas en los ríos. Es posible que las lluvias aumentaran y disminuyeran su intensidad varias veces entre los días 15 y 17 de diciembre de 1999 (C.G.R. Ingeniería, 2000). Se pueden observar estos picos en el hidrograma de crecientes registrado en la estación de Mamo (ver Figura 4).

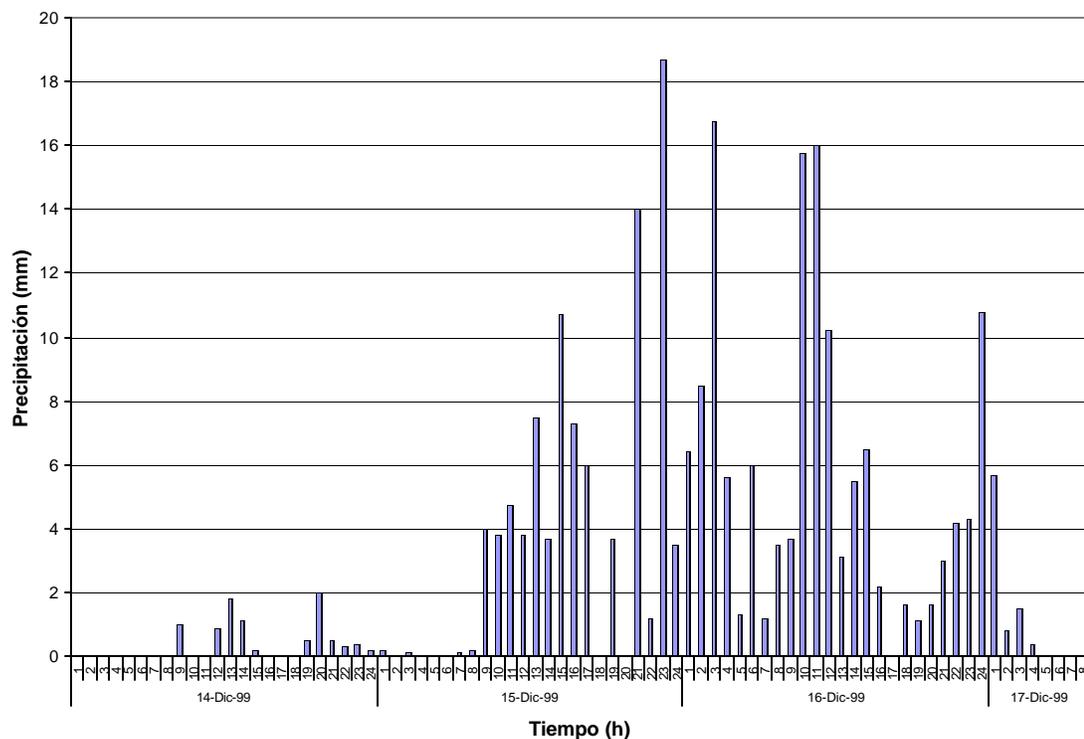


Figura 4 Hietograma de Mamo entre los días 14 y 17 de diciembre de 1999.

En Maiquetía se registraron las lluvias diarias para el mes de diciembre. En el período de tiempo entre el 01 y el 18 la precipitación total acumulada fue 1.207 milímetros. En los días 14, 15 y 16 las lluvias diarias fueron las máximas registradas en el mes (ver Tabla 9).

Tabla 9 Precipitación en Maiquetía.

Tabla 1. Diciembre de 1999	Tabla 2. Lámina de lluvia diaria Tabla 3. (mm/día)
Tabla 4. 14	Tabla 5. 120.00
Tabla 6. 15	Tabla 7. 380.70
Tabla 8. 16	Tabla 9. 410.40
Tabla 10. Total	Tabla 11. 911.10

Los valores estadísticos obtenidos por el Servicio de Meteorología de las fuerzas Armadas de Venezuela SEMETFAV del registro de precipitación de 48 años, desde 1951 hasta 1998, son los siguientes (Ministerio de Defensa, 2000):

Tabla 10 Estadísticas hidrológicas SEMETFAV.

Tabla 12. Parámetros Estadísticos	Tabla 13. Precipitación Tabla 14. (mm)
Tabla 15. Media mensual de diciembre	Tabla 16. 57
Tabla 17. Mínima absoluta de Diciembre	Tabla 18. 0
Tabla 19. Máxima absoluta de Diciembre	Tabla 20. 221
Tabla 21. Media anual	Tabla 22. 523
Tabla 23. Mínima absoluta anual	Tabla 24. 205
Tabla 25. Máxima absoluta anual	Tabla 26. 961

De la comparación de los valores de la lámina diaria para el mes de diciembre de 1999 con los parámetros estadísticos, se puede observar que el valor diario máximo registrado es el de 16 de

diciembre, y este es 7 veces mayor que el valor promedio para el mes de diciembre, y casi el doble del valor máximo registrado.

Aunque estos valores son extremos para Maiquetía, se cree que no son las intensidades máximas ocurridas, ya que hubo zonas donde ocurrió mayor devastación y no existen registros al respecto. Hidalgo en su trabajo *"la gran lluvia venezolana de diciembre 1999"* considera que el espesor de lluvia acumulado en tres días, 911 mm, está muy por debajo del espesor máximo probable para Vargas estimado en 2502 mm, y del máximo mundial registrado 3215 mm.

Igualmente, la precipitación promedio anual en las cabeceras de las cuencas del Litoral Central es el doble de la de Maiquetía, por tanto se cree que el registro de Maiquetía es inferior a la precipitación real ocurrida (Grases et al, 2000).

4.2. ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SEDIMENTOS GENERADOS EN LA TORMENTA DE DICIEMBRE DE 1999

Cuando un alud torrencial se presenta en montañas con altas pendientes en sus laderas, el lecho del río es erosionado y la densidad del fluido transportado aumenta. Igualmente cuando el lecho del río cambia de una pendiente mayor a una menor ocurre deposición del material arrastrado por el alud.

Con motivo de los aludes torrenciales de diciembre de 1999 muchas organizaciones y grupos realizaron trabajos de exploración, investigación y análisis de las cuencas afectadas en el Estado Vargas:

- C.G.R. Ingeniería (2000), reportó para la cuenca del Río San José de Galipán 12 % como área deslavada del área total de la cuenca, medición que realizó con imágenes del satélite SPOT; 1,78 km² de área deslavada en 14,8 km² del área total, estima además el área del cono de deyección en 65 ha. Para la estimación del volumen de detritos depositados a la

salida de la cuenca, construyó secciones transversales cada 5 metros en la topografía de antes y de después del evento, para Galipán el volumen calculado es 1.616.197 m³. El volumen de sedimentos transportados fue mayor ya que parte de él se depositó en el mar.

- El M.A.R.N elaboró un informe donde asumen que el caudal sólido es igual al caudal líquido, $Q_{sol} = 100\% Q_{liq} = 221.55 \text{ m}^3/\text{s}$, reportan como caudal total $Q_{tot} = 443.10 \text{ (m}^3/\text{s)}$
- JICA en su informe "Proyecto de control de torrentes de las cuencas de los Ríos San Julián y Camurí Chiquito, Edo. Vargas, Venezuela" estima el volumen de sedimento depositado en el cono de Deyección del Río San José de Galipán en 396.000 m³
- Cerato y Veronesse (2000) en su informe sobre "la estabilización de la Quebrada San José de Galipán, Estado Vargas, Venezuela", en un cálculo somero estiman que el depósito en el abanico está sobre el millón de metros cúbicos y otro tanto en el mar.
- La Universidad del Estudio de Trento determinaron una relación para el Río de San José de Galipán de $V_{total}/V_{líquido} : 1,30$
- El Gobierno de Italia en conjunto con el M.A.R.N. estimó un caudal de 200 m³/s para una creciente de 100 años de período de retorno (C.G.R. Ingeniería, 2000).
- López (2000) determinó como área de deposición de sedimentos 25,4 ha y como volumen depositado de sedimentos 640.000 m³.

Varios de los entes nacionales e internacionales han calculado el volumen total de sedimentos depositados en el cono de deyección y cada ente ha reportado una cifra distinta, con discrepancias de poco más del millón de metros cúbicos. Pero de todos estos estudios realizados, no es posible conocer el volumen real de sedimentos depositados en el mar, el volumen total de sedimentos erosionados del cauce ni el volumen de sedimentos depositados en el lecho del río.

5. CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

5.1.1. CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS

El Río San José de Galipán nace en la población de San Antonio de Galipán, el paisaje que recorre es montañoso y abrupto, hasta llegar a su parte baja donde atraviesa la población de Macuto para llegar al mar. Es la única cuenca del Macizo El Ávila intervenida por el hombre en su parte alta con desarrollos agrícolas, carreteras y caseríos (ver Figura 5).



Figura 5 Población de San José de Galipán, foto tomada después de diciembre de 1999, se observan los efectos de los deslaves en las montañas (Fuente: USGS)

Como el río tiene un flujo de agua perenne, al entrar en la población de Macuto se construyó un dique toma para abastecer de agua la población y zonas cercanas, ya que el sistema de toma y almacenamiento de agua fue destruido durante la crecida de diciembre 1999 (ver Figuras 6 y 7).



Figura 6 Dique toma destruido aguas arriba de la población de Macuto. Febrero 2001



Figura 7 Dique toma reconstruido aguas arriba de la población de Macuto. Noviembre 2001.



Figura 8 Plano de Planta de la red hidrográfica de la cuenca.

En la Figura 8 se representa la red hidrográfica de la cuenca, tomada del plano de la topografía digital escala 1:25.000. Algunos de los parámetros físicos de la cuenca de los que se listan a continuación, fueron medidos directamente de dicho plano con las herramientas que ofrece AutoCAD.

- Área de la cuenca: 15,47 km²
- Perímetro: 20,26 Km.
- Longitud del cauce principal: 9,69 Km.
- La cota superior de la cuenca: 2.300 msnm., cota inferior: 0 msnm.
- Pendiente promedio del cauce principal: 17,12 %.

- El afluente más importante es la Quebrada Los Perros, cuya pendiente promedio del cauce es 27,18 % y longitud 5,35 Km. Este se une al cauce principal en la cota 180 m.s.n.m., a 2.160 m de distancia de la desembocadura al mar.
- Las pendientes predominantes en las cuencas están entre 30 y 60 %, con algunas áreas más empinadas, igualmente se encuentran áreas con pendientes entre 10 y 30 % repartidas por toda la cuenca. Áreas menores a 10 % se encuentran entre el pie de las montañas y el mar (ver Figura 9).

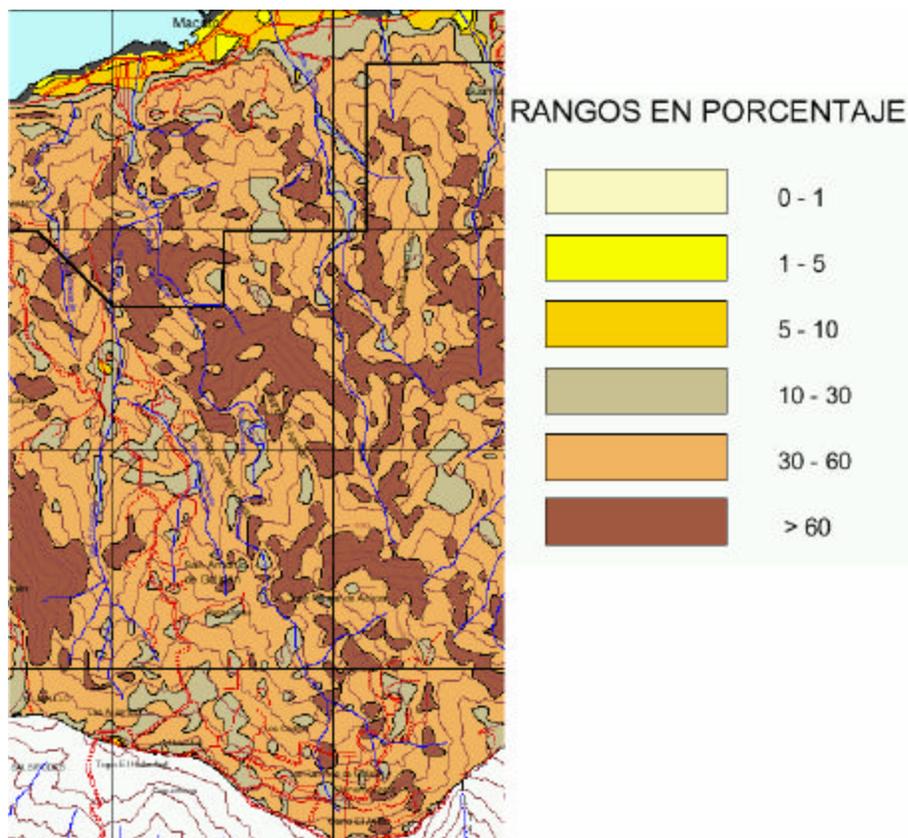


Figura 9 Pendientes de la cuenca del Río San José de Galipán. (Fuente: CorpoVargas, Detalle del Mapa n° 3.2. www.corpovargas.gov.ve).

De la aplicación de la Ley de Horton a la red del río, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 Parámetros de la red del río

Orden	Número de segmentos	Relación de bifurcación R_b	Longitud segmentos (m)	Longitud media (m) \bar{L}_u	Relación de Longitud R_L
1	82		38.458,74	469.01	
		2.73			0.64
2	30		9.037,68	301.26	
		0.75			0.87
3	40		10.438,88	260.97	
		4.44			0.88
4	9		2.056,31	228.48	

De las anteriores características y resultados se han obtenido los siguientes indicadores que clasifican y caracterizan la cuenca geoméricamente e inciden en su respuesta hidrológica:

- Índice de Compacidad o de Gravelius (Kc): 1,44
- El orden de drenaje de la cuenca es 4.
- Densidad de Drenaje (Dd): 3,88 km/km²
- Frecuencia de drenaje (Fd): 161 / 15.47 = 10,41 segmentos/ km²
- Tiempo de Concentración según Kirpich: 41 min

A continuación se muestra la Tabla 12, donde se compara y exponen los valores medidos y calculados, por diferentes personas y organizaciones, de los parámetros característicos de la cuenca y del cauce principal.

Tabla 12 Parámetros de la cuenca y del Río San José de Galipán

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA CUENCA Y DEL CAUCE PRINCIPAL	Noya ⁽¹⁾	C.G.R. I. ⁽²⁾	JICA ⁽³⁾	M.A.R.N ⁽⁴⁾	IMF ⁽⁵⁾	PNUD ⁽⁶⁾
Área de la cuenca (Km ²)	15,47	14,8	15,2		14	14
Cota superior de la cuenca (m.s.n.m.)	2300				2300	2300
Pendiente promedio de la cuenca (%)				67,2		
Perímetro de la cuenca (km)	20,26			19,5		
Longitud del cauce principal (Km)	9,69	8,7	9,47	9,38	8	8.7
Cota superior del cauce (m.s.n.m.)	2150			2140		
Pendiente promedio cauce principal (%)	17,12	21	23 %	22.8	21,5	
Pendiente en cono (%)	6.28		3.6		6.3	
Vol / área (m)					0,036	
Densidad de drenaje (km/km ²)	3,88			3,75		
Orden de drenaje de la cuenca	4			4		
Diferencia de cotas (m)				2250		
Longitud axial (m)				7.600		
Coefficiente de relieve				0,30		
Coefficiente de Gravelius	1.44			1,41		
Índice de Horton				0,29		
Frecuencia de drenaje (Segmentos/km ²)	10,41					
Tiempo de Concentración (min)	41					

(1) Noya, María. (2) C.G.R. Ingeniería, 2000. (3) JICA. (4) M.A.R.N Comisión de evaluación de daños y riesgos ambientales. (5) Instituto de Mecánica de Fluidos. (6) Grases et al, 2000.

5.1.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

En la Figura 10 se muestra la geología del sector bajo de la cuenca. Están presentes los esquistos San Julián (ASJ) y los Augengneis Peña de Mora (APM). En las colinas bajas cercanas a la costa afloran los Esquistos de Tacagua (CT), posee altos niveles de meteorización. En el evento de

diciembre de 1999 se desplazaron como flujos superficiales de barros aportando material fino y oscuro (Díaz, M. E., 2002). El Aluvión Cuaternario (Qal) se encuentra entre el pie de las montañas y el mar, ocupa el cono aluvial adentrándose en la cuenca por la garganta del río, coincidiendo esta con el área poblada de Macuto, corresponde a viejos depósitos de sedimentos arrastrados por antiguas crecientes.

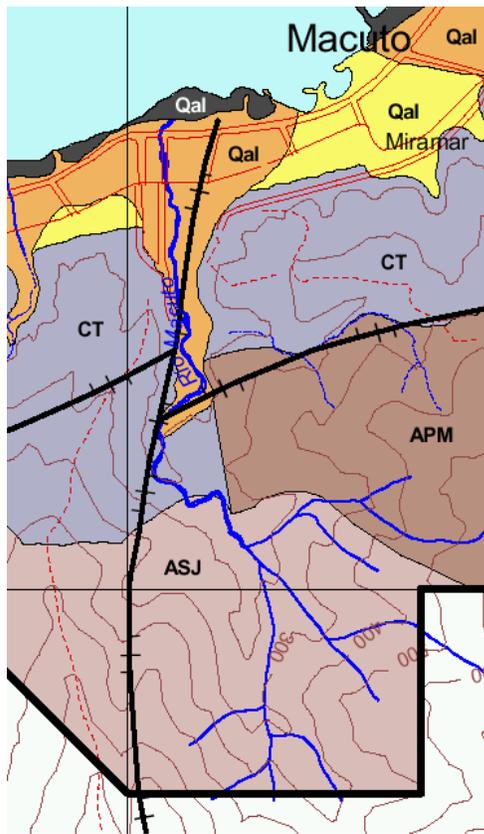


Figura 10 Geología y geomorfología de la cuenca del Río San José de Galipán. (Detalle del Mapa n° 3.1). (Fuente: CorpoVargas, www.corpovargas.gov.ve).

- Esquisto de Tacagua (Urbani et al, 2000): *"Esta unidad está constituida fundamentalmente por tres tipos de rocas: El esquisto formado por cuarzo, mica muscovita y cantidades menores pero siempre presentes de grafito, así como cantidades variables de calcita y/o albita. Rocas epidóticas de color verde manzana, gradando desde verdaderas epidocitas hasta esquistos epidóticos - calcíticos - muscovíticos. Mármol más o menos puro y gradando a esquistos"*

calcíticos. Aflora en las colinas bajas cercanas a la costa, y presentan suelos de colores rojizos muy conspicuos. Aproximadamente coincide con la zona bioclimática costera de tipo xerofítica. Posee gruesos niveles de meteorización a veces de tipo laterítico, donde la arcilla predominante es la illita. El esquisto grafitoso muestra una intensa foliación, y en las variedades menos cuarcíferas y más micáceas pueden gradar a rocas con aspecto filítico o pizarroso, que al ser observados con lupa pueden verse hasta más de 100 planos de foliación por centímetro. Los movimientos de masa en esta Unidad fueron mayoritariamente flujos superficiales, afectando muy gravemente y en forma directa a las zonas de construcciones informales en laderas, pero también aportaron abundante cantidad de materiales de granulometría predominantemente fina y de colores oscuros que se desplazaron como flujos de lodo."

- *Esquisto San Julián (Urbani y Ostos, ref): "es de color gris a gris oscuro con tonalidades verdes, meteoriza a tonos pardos, usualmente se presenta bien foliado. Su textura se debe fundamentalmente a la mayor proporción de feldespato y menor de filosilicatos. Aflora en las zonas de topografía muy abrupta y de grandes pendientes."*
- *Augengneis Peña de Mora (Aguerrevere & Zuloaga, 1937): "Son cuerpos graníticos metamorizados que han sufrido diferentes grados de deformación. Se cree que estos cuerpos gnéísicos pueden ser intrusitos dentro de las rocas esquistosas adyacentes, pero debido al gran contraste mecánico ante la deformación de ambos tipos de rocas, (granito vs. Metasedimentos polítics), quizás en la mayoría de los casos, las rocas graníticas han sido emplazadas tectónicamente dentro del esquisto adyacente. Aflora en las zonas de topografía muy abrupta y de grandes pendientes. Está constituida por una litología fracturada y fallada que favorece a las caídas de bloques y rocas, que al rodar por las vertientes arrastran enormes cantidades de suelo residual desde las cuencas medias, en su incorporación al cauce, lo altera físicamente (C.G.R.*

Ingeniería, 2000)."

Cerato y Veronese reportan en su informe preliminar: *"El sustrato está formado por rocas mesozoicas (jurásico-cretáceas) pertenecientes a las formaciones de Tacagua, Las Brisas y Peña de Mora. Las coberturas cuaternarias no tienen gran espesor y son, en su mayoría, eluviales, mientras que son torrenciales a lo largo de los cursos de agua y fluvio-torrenciales en el abanico, en el cual está ubicada la parte occidental del asentamiento urbano de Macuto."*

En el sector de Galipán, al este del Pico el Ávila aflora la formación Peña de Mora como esquistos de cuarzo moscovíticos (Grases et al, 2000). Los suelos son de color marrón oscuro, fino, de granulometría heterogénea y altamente erosionables; en los taludes de la zona hay acumulaciones de antiguos deslizamientos (Cerato & Veronese, 2000).

5.1.3. VEGETACIÓN Y USO DE LA TIERRA

Como se puede observar en la Figura 11 la parte alta de la cuenca está cubierta mayormente por bosques altos densos y por áreas agrícolas con pequeñas construcciones. En la cuenca media y baja la vegetación es definida como bosque medio denso con áreas importantes de matorrales. El área urbanizada en Macuto se limita prácticamente al área entre la línea de costa y el pie de la montaña, se adentra por el cauce del río hasta que la garganta del río se estrecha. En Galipán las áreas cultivadas tienen asentamientos humanos, en el plano no se discriminan las construcciones para viviendas.

Las raíces de los árboles son poco profundas debido a las altas pendientes de las laderas, a la naturaleza ácida de los suelos y a la poca profundidad de tierra vegetal (Cerato & Veronese, 2000).

El tipo de cultivos y la práctica de cultivación de la tierra desarrollados en la población de Galipán son considerados compatibles con los problemas hidrogeológicos (Cerato & Veronese, 2000).

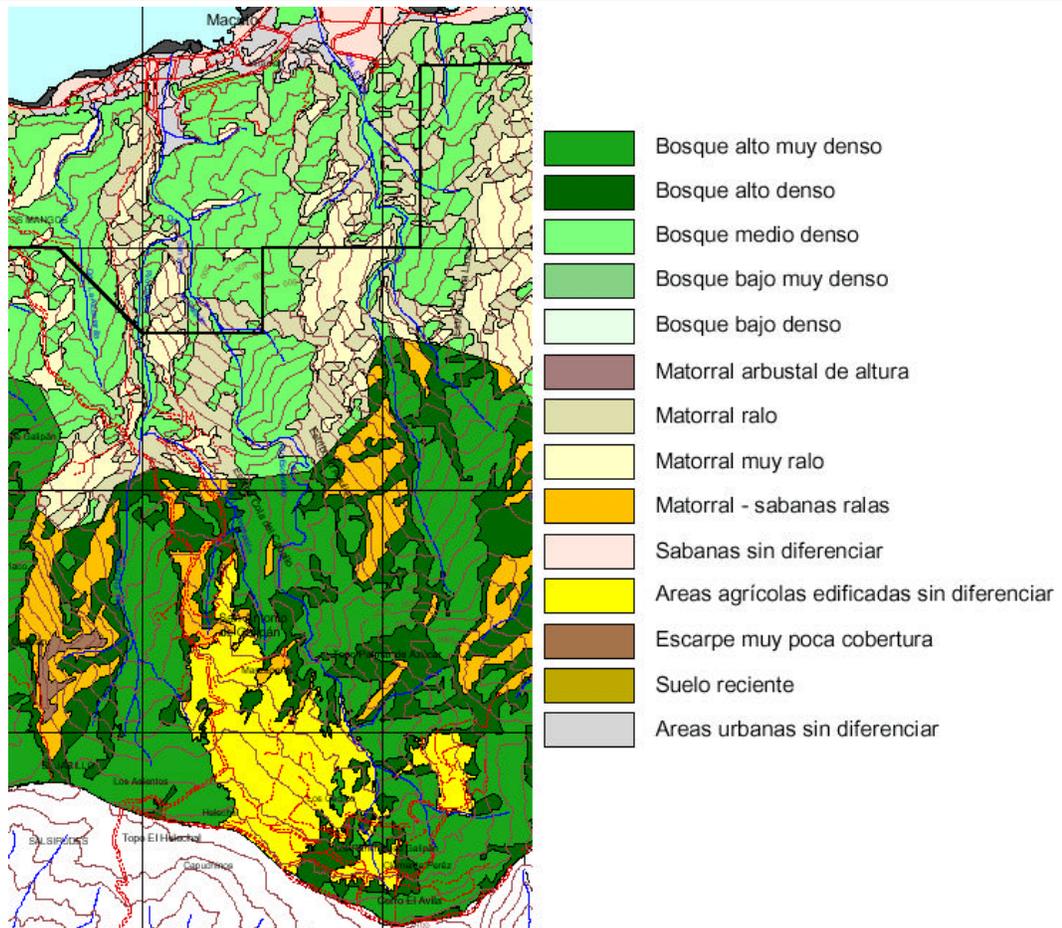


Figura 11 Cobertura Vegetal y uso de la tierra de la cuenca del Río San José de Galipán. (Detalle del Mapa n° 5.2). (Fuente: CorpoVargas, www.corpovargas.gov.ve).

Grases y otros en su libro "Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en diciembre de 1.999"

clasificó la vegetación existente en la Cordillera de la Costa de la siguiente manera:

Tabla 13 Clasificación de la vegetación existente en el Litoral Central.

Vegetación	Altitud en m.s.n.m.
Vegetación del Subpáramo	Superior a 2200
Selva nublada	2000 – 2200
Selva de transición	1800 – 2000
Selva Veranera, decidua o semidecidua	600 - 1800
Bosque seco deciduo de tipo xerófilo	Inferior a 600

5.2. EVOLUCIÓN DEL CAUCE DEL RÍO ENTRE 1937 Y 1999

A continuación se presentan las fotografías aéreas del área de Macuto para distintas misiones desde el año 1936 hasta Diciembre de 1999, en su mayoría son fotos de la costa y de la población de Macuto. No fue factible la realización de los mosaicos con la parte alta de la cuenca ya que los vuelos muchas veces no abarcaron la cuenca alta o faltó una faja de vuelo por volar para que estuviese cubierta completamente el área (ver Figuras 12 a la 19).



Figura 12 Fotografía aérea Misión 8 año 1936 - 1938 Esc 1:20.000



Figura 14 Fotografía aérea Misión 030422 año 1.962 Esc 1:9.000



Figura 13 Fotografía aérea Misión C-8 año 1951 Esc 1:24.000



Figura 15 Fotografía aérea Misión 030435 año 1.965



Figura 16 Fotografía aérea Misión 030198 año 1.975 Esc 1:25.000



Figura 17 Fotografía aérea Misión 030178 año 1.991 Esc 1:5.000



Figura 18 Fotografía aérea Misión 030602 año 1.998 Esc 1:5.000



Figura 19 Fotografía aérea Misión 601 año 1.999 Esc 1:5.000

En la fotografía aérea de la Misión 8 del año 1936 se observa que el río ya ha sido encauzado mas no se tiene la certeza de que haya sido revestido el canal, la vía de comunicación terrestre principal va por la línea de costa. Al oeste de la canalización la población de Macuto se ha desarrollado algunas cuadras, a partir de allí hay parcelas agrícolas que se extienden más allá de la Quebrada La Alcantarilla. Hacia el este en dirección a la Quebrada El Cojo, el área está poblada y urbanizada. No se observan construcciones en la garganta del río.

Para el año 1951, la población de Macuto se había extendido más allá de la Quebrada La Alcantarilla, sustituyendo las parcelas agrícolas por construcciones. Se ha urbanizado y construido para entonces, la Av. Álamo y calles al oeste del Río San José de Galipán, se ha canalizado la Quebrada La Alcantarilla. La garganta del río se ha urbanizado, se observa un rápido crecimiento del área. La fotografía aérea fue tomada después de los aludes torrenciales de febrero de 1951, se observa la sedimentación del lecho del río, especialmente aguas arriba de la población donde además fue desforestada el área, los deslaves en las laderas de las montañas y el avance de la línea de costa hacia el mar. Junto al espigón más próximo a la desembocadura del río se acumuló gran cantidad de sedimentos y escombros. En la población de Macuto, Sucre (1951) reportó daños considerables:

“El río Macuto, en Macuto, causó tal vez los mayores daños de todo el litoral. El río recobró debido a la creciente, su antiguo cauce o planicie aluvial, el cual había sido obstruido en gran parte con construcciones de todo tipo. Las aguas enfurecidas arrasaron viviendas, vehículos, árboles y enormes cantidades de arena y piedras, destruyeron tres puentes, el estanque de almacenamiento de agua del acueducto, así como las tuberías de aducción y taparon en gran parte las tuberías del servicio de cloacas. Este río destruyó el bello parque de las Palomas, el parque infantil, el Paseo de la Playa, la vieja casona de la Guzmania y cubrió una extensísima

zona de arena, piedras y lodo en la población. Una idea de la enorme cantidad de materiales depositados se tiene como se sabe que en publicaciones del Ministerio de Obras Públicas aparecidas en la prensa hicieron constar que frente al paseo de Macuto se habían ganado más de 80.000 m² al mar con el material que había sido removido de las calles y avenidas, y acumulados allí.”

Para el año de 1962 la línea de costa en la desembocadura del Río San José de Galipán no ha retrocedido, se han construido más espigones a lo largo de la costa, han evitado el barrido de los sedimentos y protegido un área que fue destinada posteriormente a estacionamiento de vehículos para las personas que visitan el Balneario de Macuto; al oeste de la Quebrada La Alcantarilla se acumularon gran cantidad de sedimentos extendiendo la playa de una manera importante. Se observa recuperadas las laderas de las montañas, de los deslaves sufridos en el año 1951. Se ha construido la Av. Intercomunal de Macuto que va desde la canalización del río San José de Galipán hacia el Cojo. Aumento del desarrollo urbano, incluso hacia aguas arriba de la población de Macuto.

En la fotografía aérea del año 1991 se observa además de la densificación urbana, la construcción de espacios para la recreación en las áreas ganadas al mar. Para el año 1998 las áreas que fueron desforestadas por el río en el año 1951, han sido urbanizadas y pobladas.

A lo largo del año 1999 y en el territorio Venezolano, principalmente en la costa Venezolana, se presentaron inundaciones y derrumbes ocasionados por lluvias intensas, que se incrementaron al final del año. En los meses de noviembre y principios de diciembre ocurrieron deslizamientos y derrumbes de viviendas, se obstaculizaron algunas vías terrestres quedando incomunicados varios sectores. A partir del 15 de diciembre en la parte alta de la cuenca del río San José de Galipán hubo importantes deslizamientos de tierra, derrumbes de edificaciones y aparecieron ríos donde no

existían.

En la fotografía aérea tomada el 21 de Diciembre de 1999, Misión 030601-305 (ver Figura 19), se observa al río San José de Galipán colmatado por los sedimentos provenientes de la cuenca así como las calles, avenidas y edificaciones, el desplazamiento de la línea de costa hacia el mar, grandes áreas que fueron destruidas y arrasadas, otras fueron sedimentadas por el río, deslaves en las laderas de las montañas. En la crecida el río se desvió hacia el oeste desde su entrada al área urbanizada de Macuto, tomando la Av. Isabel la Católica. En la Figura 20, vista aérea de Macuto, se indica con una línea roja el sitio del canal tapiado por los sedimentos.



Figura 20 Vista de la población de Macuto después de los aludes torrenciales de diciembre 1999. La línea roja indica el sitio del cauce original.

El canal era cruzado por 5 puentes o pasos, de los cuales sólo quedaron dos, que están en la Av. La Playa y en la Av. Intercomunal de Macuto. La desembocadura se trasladó aproximadamente 220 metros hacia el oeste, cambió la línea de costa donde se formó un cono sobre la playa que se

extiende más de 100 metros hacia el mar. Afectó igualmente la margen derecha del río, aguas abajo de la Av. Intercomunal y destruyó la casa "La Guzmanía", la cual tenía muros de protección de 1 metro de ancho. También destruyó un gran tanque de concreto para agua de Hidro-Capital ubicado en la salida de la garganta del río, aguas arriba de la población de Macuto, el cual almacenaba agua para ser surtida al sector y zonas cercanas. El río transportó la vegetación arrasada, escombros, sedimentos finos y rocas que van desde unos pocos centímetros a varios metros de diámetro. Los sedimentos enterraron y destruyeron edificaciones, puentes, parques y calles, con una profundidad promedio de 4 metros. La destrucción por el flujo de detritos fue mayor en la parte alta y central del cono, en la parte baja fue mayor la deposición de sedimentos (ver Figuras 21 y 22).



Figura 21 Población de Macuto. Parte baja del cono de deyección, se observa la deposición de sedimentos, piedras, vegetación y escombros. Vista desde la Av. Intercomunal hacia aguas abajo. Diciembre 1999.



Figura 22 Población de Macuto. Parte alta del cono de deyección. Se observa el material depositado por el río, la destrucción de viviendas y los deslaves en las laderas de las montañas. Diciembre 1999.

El área urbanizada afectada fue de aproximadamente 34,10 ha, incluye el área afectada directamente por el río así como la afectada por deslizamientos puntuales en las laderas y por pequeñas cuencas que confluyen en el cono de deyección; esta área fue medida directamente en el plano digital. Grases estima para Macuto el área afectada entre 70 y 85 % del área urbanizada y un 60 % del total de las edificaciones como pérdidas (Grases et al, 2000).

De la página Web de www.Terra.com se hace la siguiente referencia a Macuto: *"Su población sufrió una reducción del 37,9%, es decir, se registraron 5.203 habitantes menos si tomamos en cuenta las 13.724 que debería tener, según cálculos de la OCEI. El Censo Vargas 2000 registró 8.521 habitantes en esta parroquia. Las principales zonas afectadas fueron El Teleférico, El Playón, La Guzmania y la Plaza Las Palomas, del bulevar costero. Entre los daños en infraestructura destacan los sufridos por el Hospital Materno Infantil de Macuto, la casa presidencia La Guzmania -construida*

por Guzmán Blanco-, el Castillete de Reverón, la casa natal de Armando Reverón, la Plaza Las Palomas, el Hotel Las Quince Letras, el Balneario del paseo Macuto y Balneario de Camurí Chico, así como las instalaciones del teleférico hacia Caracas, construido en el gobierno de Pérez Jiménez, entre otros. Antes de la tragedia Macuto era el lugar preferido de muchos turistas, ahora sólo queda buscar su recuperación."

Del informe sobre la estabilización de la Quebrada San José de Galipán, de la delegación de la Provincia de Trento, se extrajeron las siguientes consideraciones y observaciones sobre el cauce y el evento de diciembre de 1999:

- El curso principal ha tenido fases erosivas rápidas donde los valles laterales han quedado suspendidos en relación al cauce, caracterizándose por pequeñas gargantas y saltos. El perfil aguas arriba de los saltos es suave, con secciones anchas que forman plazas de sedimentación.
- Las características del fenómeno que se produjo en Macuto corresponden a flujos hiperconcentrados de sedimentos medios y finos con escasa matriz arenosa. Aunque a la salida de la garganta, en el área donde se encontraba el tanque de almacenamiento de agua del acueducto, las características corresponden a un debris flow pero de proporciones menores al potencial de la cuenca. En este lugar también se encontró deposición de material proveniente de antiguas crecidas, se cree datan del año 1951. Parte de este material fue arrastrado en el evento del 99.
- La gradación del material depositado va de mayor a menor, a medida que se aproxima al mar.

El Mapa de *"Distribución de Sedimentos y Desbordamiento de Flujo de Lodo y Piedras del Río San*

José de Galipán" (JICA, 2000), reporta profundidades de sedimentos de hasta casi 6 metros, que disminuyen a medida que se aleja del río (ver Figura 23).



Figura 23 Mapa de Distribución de Sedimentos y Desbordamiento de Flujo de Lodo y Piedras del Río San José de Galipán. JICA.

En el informe de la misión japonesa sobre las condiciones después de los aludes torrenciales de diciembre de 1999, se señalan las siguientes mediciones y observaciones para el Río San José de Galipán (JICA, 2000):

- La pendiente del lecho cercano a la zona de la garganta fue 6,2 %, donde fueron depositados sedimentos de gran tamaño, con presencia de material fino.
- La pendiente del cono de deyección era 3,6 %, el área de desbordamiento medida fue 300 m de ancho y 0,7 km de longitud.

- Hubo poca cantidad de piedras grandes, el diámetro promedio era de varios centímetros.
- Había concentración de viviendas en el cono de deyección.



Figura 24 Imagen de satélite IKONOS del sector Galipán (Fuente: (Arismendi et al, 2000)

J. Arismendi en su trabajo "Geomorfología actual y cobertura natural de la vertiente norte de la cordillera de la costa afectada por el evento hidrometeorológico de diciembre 99, a partir de la interpretación de imágenes de satélite" hace la siguiente observación:

"Las áreas agrícolas, del sector de Galipán, localizado en la parte alta y media de la vertiente norte, se vieron parcialmente afectadas por los deslizamientos. Sin embargo, y gracias a la alta resolución espacial de las imágenes IKONOS (1 metro), se pudo observar que las zonas de cobertura natural (vegetación arbórea) estuvieron proporcionalmente mucho más afectadas que aquellas donde se efectúan actividades agrícolas, como es el caso de la comunidad de Galipán" (ver Figura 24)

5.3. CAMBIOS EN EL PERFIL LONGITUDINAL

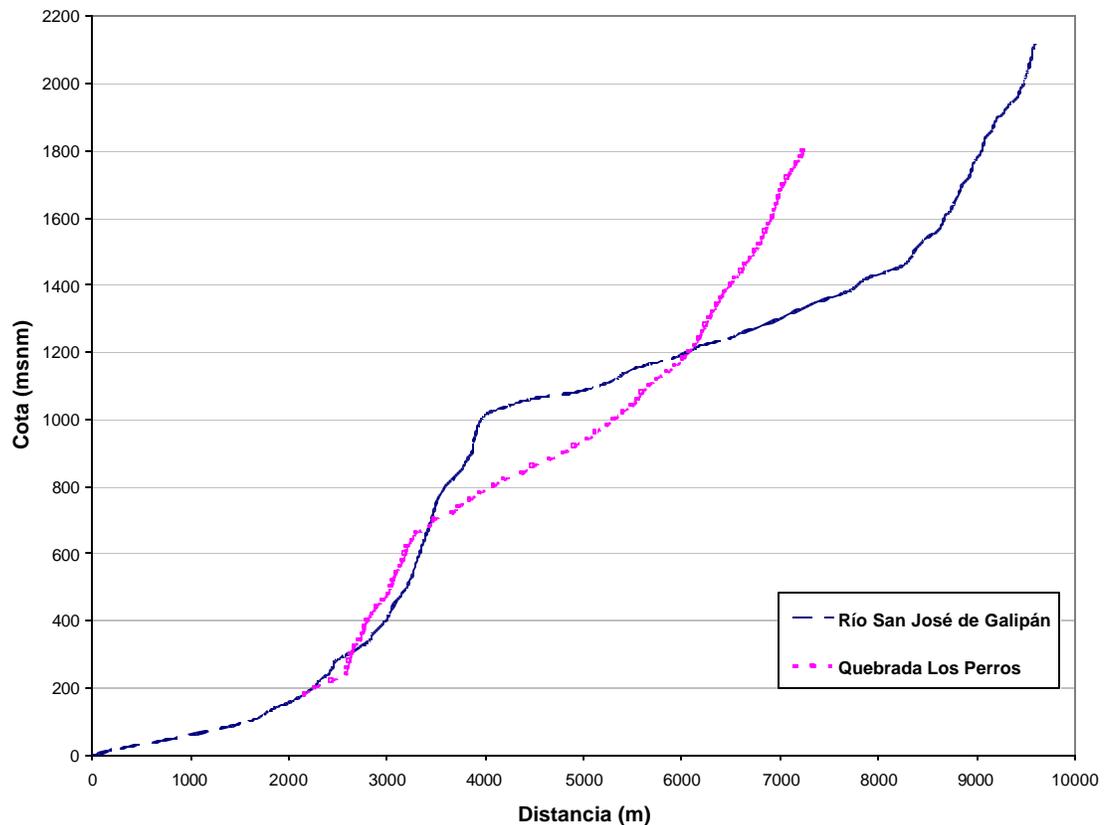


Figura 25 Perfil Longitudinal del Cauce principal del Río San José de Galipán.

En la Figura 25 se presenta el perfil longitudinal del cauce principal del Río San José de Galipán y de su afluente principal La Quebrada Los Perros, construido en base a los planos digitalizados esc.1:25.000, provenientes de los Ortofotomapas de Febrero de 1994, con curvas de nivel cada 20 metros.

Los cambios de pendientes en el cauce principal del Río San José de Galipán definen claramente cuatro tramos, de aproximadamente 56,00 %, 12,00 %, 56,00 % y 6,28 %, desde el tramo más elevado hacia aguas abajo.

En contraste con otras cuencas del Litoral Central, esta tiene la peculiaridad de estar poblada en su

parte alta, tener pequeños asentamientos dispersos por la cuenca y contar con la carretera que une a Galipán con Macuto. Esta permite la exploración de la cuenca, al menos parcialmente.



Figura 26 Detalle del plano de la confluencia en la Qda. Los Perros.

La carretera cruza la Quebrada Los Perros al bajar de Galipán hacia Macuto a aproximadamente 820 m.s.n.m., a unos 150 metros del límite oeste de la cuenca, luego cruza la divisoria de las cuencas y continúa bordeando la cuenca de la Quebrada La Alcantarilla por su fila oeste hasta que llega a la población de Macuto, junto al lecho de la Quebrada La Alcantarilla. El punto de cruce antes mencionado coincide con la confluencia de cuatro afluentes a la quebrada como se muestra en la Figura 26. Este sector actúa como una playa de sedimentación, ya que es un área amplia y de baja pendiente, donde se han acumulado grandes rocas. En la Figura 27 se muestra una vista del área desde aguas arriba hacia aguas abajo, donde se ve el paso de la carretera ya despejado después de

los aludes torrenciales de diciembre del 99. La Figura 28 es la vista desde aguas abajo hacia aguas arriba en el cauce principal de la Oda. Los Perros. En ambas fotografías se ven las grandes rocas que han sido movidos y depositados allí por la corriente, siendo el tamaño de muchos de ellos superiores al tamaño de los vehículos que se muestran en la foto.



Figura 27 Detalle del cruce de la carretera en la confluencia de cauces en la Qda. Los Perros, vista desde aguas arriba (Fuente: IMF)

Inmediatamente aguas abajo de esta área, el cauce sufre un estrechamiento, donde aflora la roca creando una serie de saltos. En la Figura 29 se muestra una secuencia de ellos, en la Figura 30 se aprecia la escala de estos saltos. Descendiendo, la pendiente del cauce aumenta aproximadamente a un 50 % hasta desembocar en el cauce principal del Río San José de Galipán.



Figura 28 Detalle del cruce de la carretera en la confluencia de cauces en la Qda. Los Perros, vista desde aguas abajo.



Figura 29 Saltos en la Qda. Los Perros.



Figura 30 Detalle de salto en la Oda. Los Perros.

Otra vía de acceso al cauce es desde la población de Macuto hacia aguas arriba. Desde que se entra a la garganta del río se puede observar gran deposición de bloques de varios metros de diámetro, que han sido arrastrados por las crecientes o provienen de desprendimientos en las laderas. Se observan "terrazas" de sedimentos que fueron depositadas por antiguos aludes torrenciales y en el 99 fueron arrastradas con la crecida. Hay evidencias en el cauce de la formación de diques naturales, como se muestra en la Figura 31, donde un tronco de un árbol quedó atascado en sus extremos por rocas y por otro árbol que estaba en pie y que no se ve en esta fotografía.



Figura 31 Dique natural en el cauce principal del Río San José de Galipán.

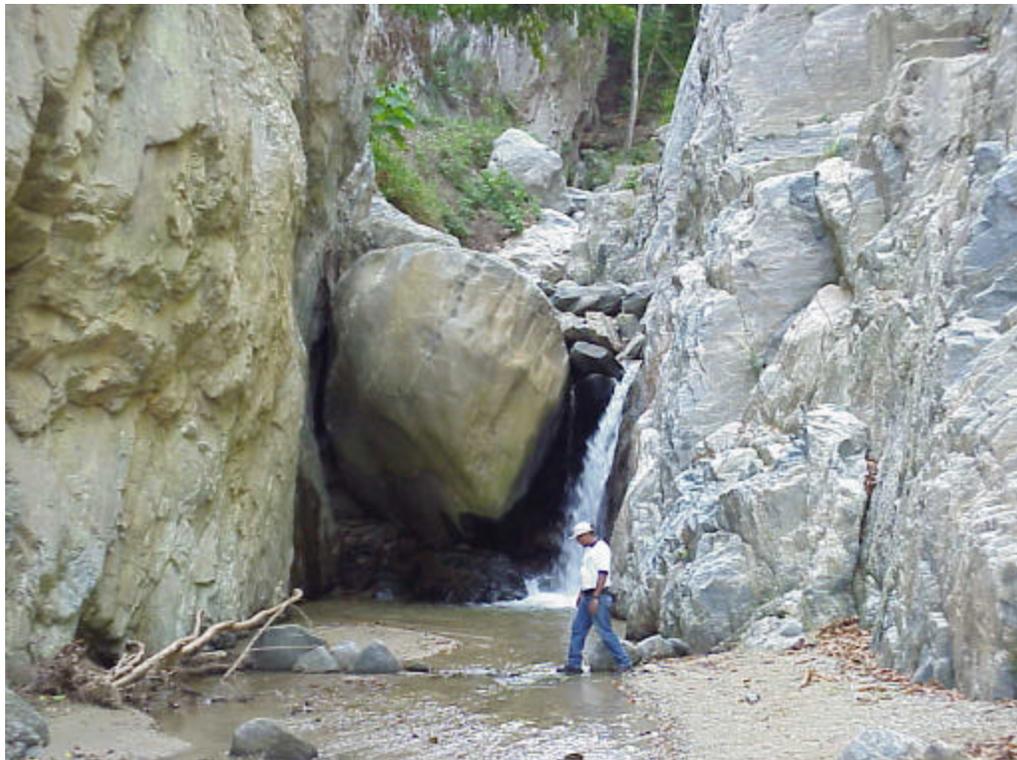


Figura 32 Detalle del estrechamiento del cauce principal.

En un punto ubicado aproximadamente a 180 m.s.n.m., aguas abajo de la confluencia del Río San José de Galipán con la Quebrada Los Perros, el cauce se estrecha de tal manera que es obstaculizado por una gran roca (ver Figura 32). Se ubica antes de llegar a la confluencia de la Oda. Los Perros con el cauce principal. Aguas arriba de la roca existe una importante acumulación de sedimentos. Se cree que llegó allí por los aludes torrenciales de diciembre del 99, ya que gente del sector cuenta que antes se podía acceder por allí caminando hasta Galipán.

La parte correspondiente al cauce principal del Río San José de Galipán no ha sido explorado por no tener vías de acceso fáciles y conocidas. Es factible que los procesos que se observan en la Quebrada Los Perros y en la garganta del río principal sean similares también en la parte media y alta del cauce principal y sobre todo en los puntos de cambios de pendientes.

Gran parte de las rocas y sedimentos es transportada más rápidamente por los tramos de mayor pendiente, al llegar a los tramos de menor pendiente, la corriente pierde energía y si esta pérdida es importante las rocas son depositadas. Esta característica de la cuenca no evitó que un flujo de barro y escombros llegara hasta la población de Macuto y fueran observados los bloques "flotando" en la corriente. Es importante destacar que el material que se encuentra en el cauce está en tránsito y futuras crecientes podrían transportarlo a la población de Macuto.

López, J. L. y otros (2000) comentan acerca de puntos de inflexión anómalos en el perfil del Río San José de Galipán a 500 m.s.n.m. debido a la existencia de terrazas que se creen son origen tectónico.

En la Figura 34 se presentan los perfiles longitudinales del río en el área de Macuto, antes y después del evento de diciembre de 1999. Durante el evento el río se desplazó hacia el oeste en la desembocadura, tal como se mencionó en el punto "*Descripción de la tormenta de diciembre de 1999*". En la Figura 35 se presenta el perfil del cauce desplazado, en el que se hace una

comparación con la topografía original y la final. Los perfiles reflejan que en el área de la garganta erosión con profundidades de hasta 15 metros, en campo no se encontró evidencias de ello, se cree que es error de los planos en esa área. Descendiendo en el cauce la profundidad de la erosión disminuye hasta llegar al terreno original. A partir de ese punto aguas abajo ocurre deposición de sedimentos en todo el lecho del río, existen puntos los cuales no fueron sedimentados ni erosionados. Un punto conocido en el área sedimentada es la Av. Intercomunal, esta se encuentra entre los 11 y los 12 m.s.n.m., en ella fueron observados más de cuatro metros de sedimentos depositados, los cuales se reflejan en las diferencias de nivel en los perfiles longitudinales. Aguas abajo en el cono de deyección sobre la Av. Intercomunal. La sedimentación máxima observada ocurre en la canalización revestida en concreto en tramos con 8 metros de profundidad, aunque también ocurre puntualmente en el tramo natural, aproximadamente 40 metros antes del inicio de la canalización, tal como se puede ver en la Figura 33. En el perfil del cauce desplazado aguas abajo de la cota 65 m.s.n.m. ocurre deposición de sedimentos.



Figura 33 Depósitos de sedimentos en el cauce excavado.

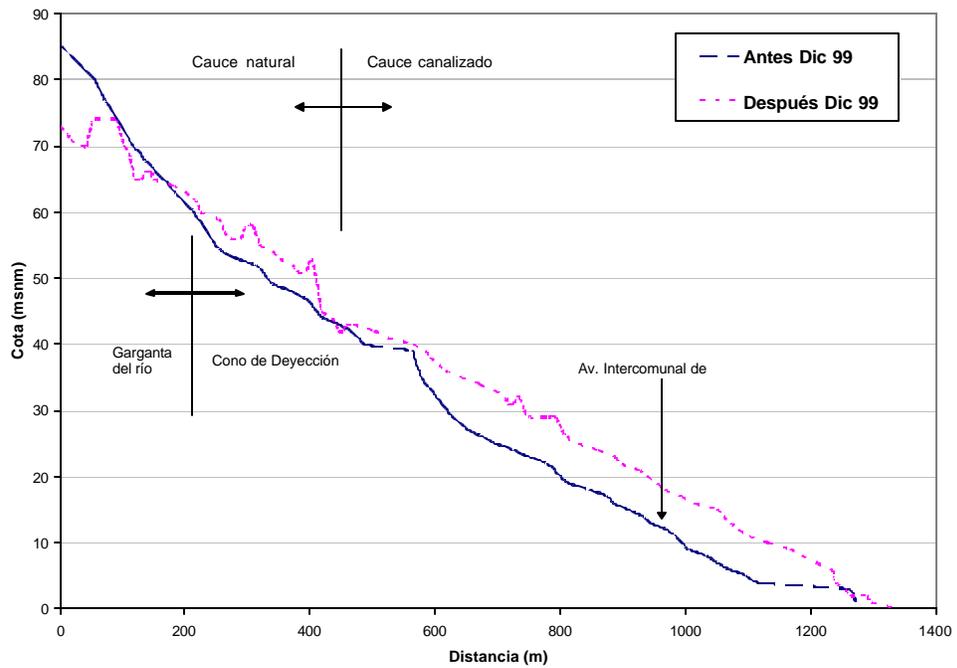


Figura 34 Comparación de perfiles a lo largo del cauce original – Macuto.

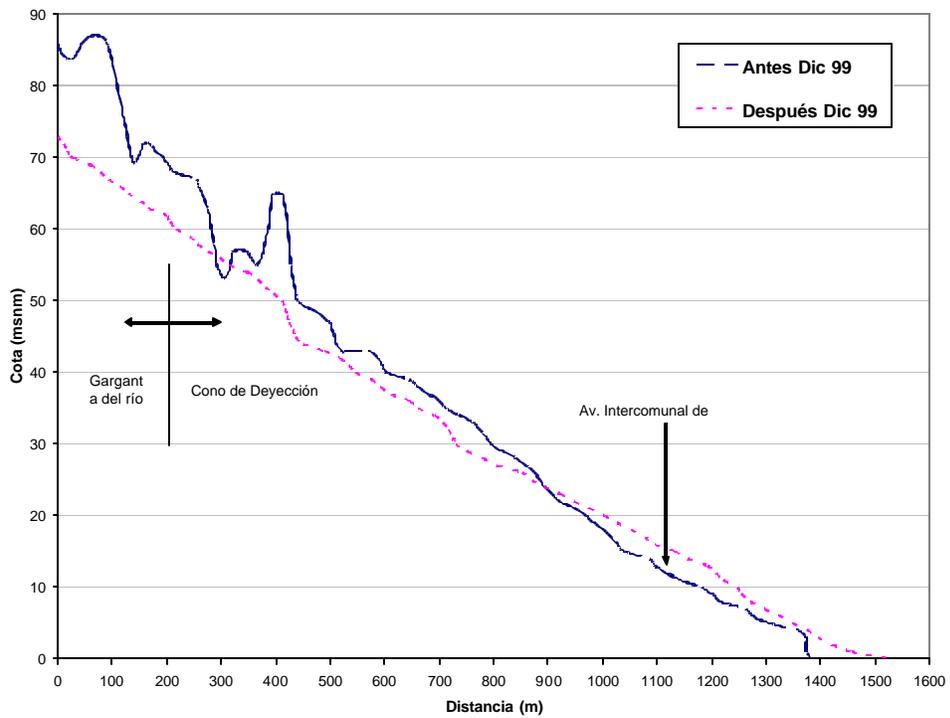


Figura 35 Comparación de perfiles a lo largo del cauce desplazado – Macuto

5.4. CAMBIOS EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES

En las Figuras 36 y 37 se presentan los planos del área en estudio de la topografía digital de antes de diciembre de 1999 y de después de diciembre de 1999, en ellos se indican las secciones transversales de estudio.

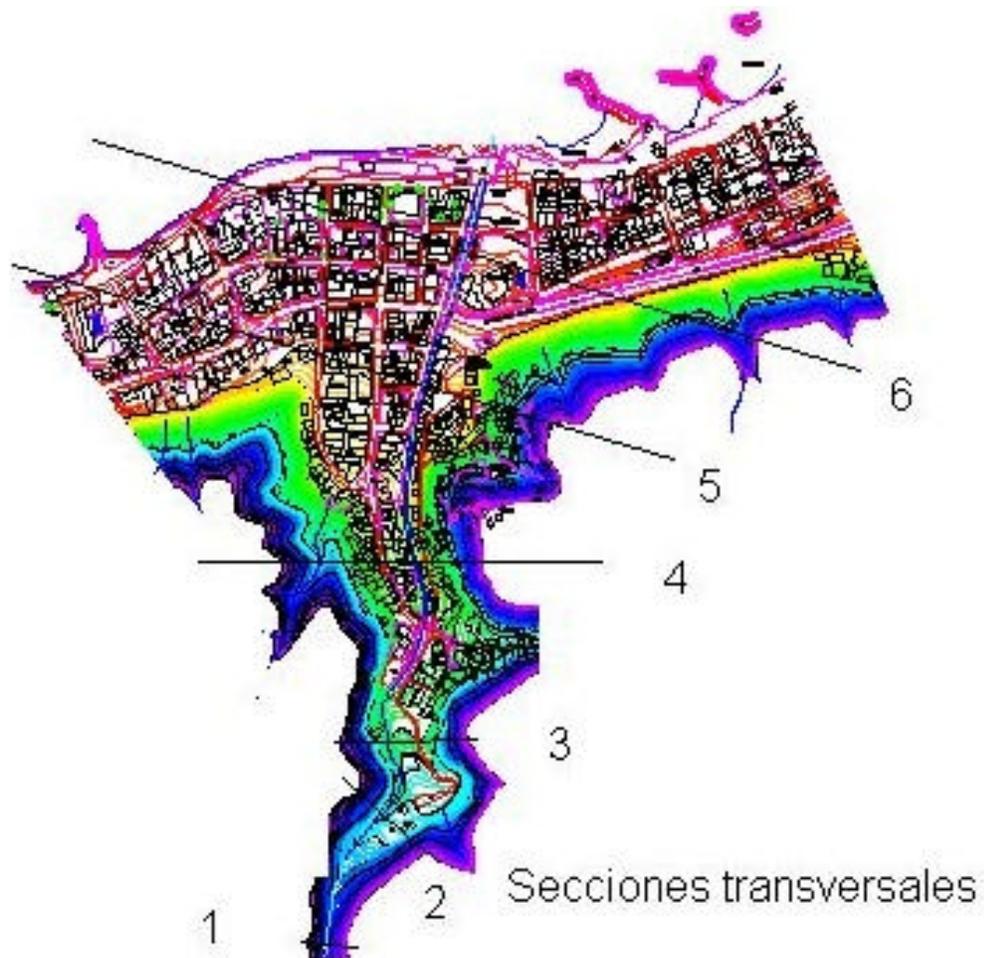


Figura 36 Topografía digital antes Dic 99. Secciones transversales.

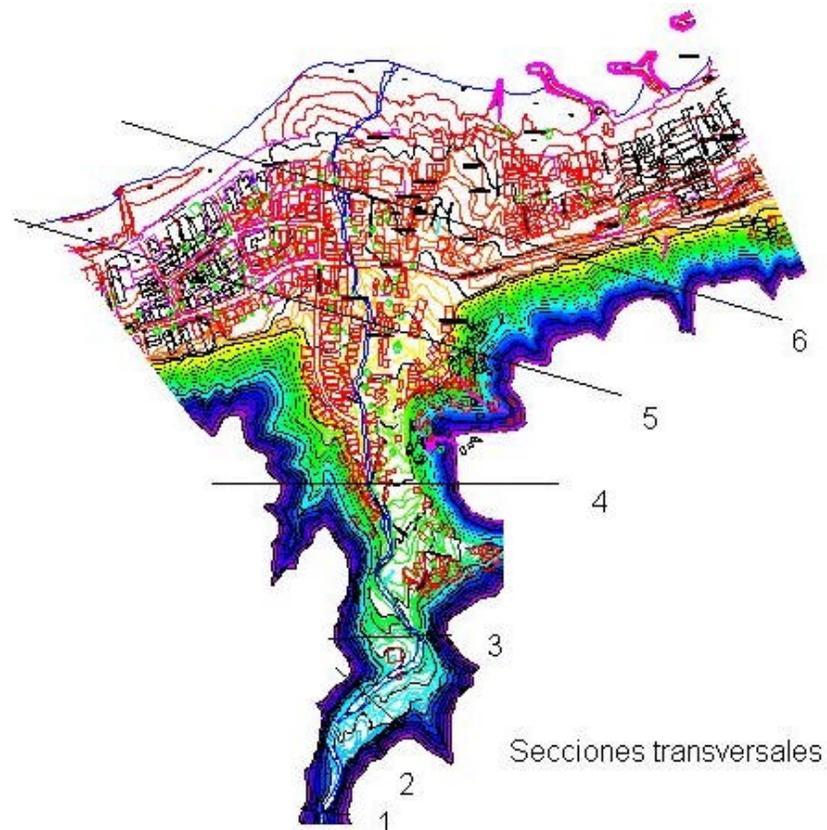


Figura 37 Topografía digital Después Dic 99. Secciones transversales.

De la Figura 38 a la Figura 43, se muestran las secciones transversales del río, donde se han representado la topografía de antes de diciembre de 1999 y de después de diciembre, con el fin de observar los cambios ocurridos en la topografía tras los aludes torrenciales. En general la sección del río cambió y se desplazó hacia el oeste. Se observa que en la parte de la garganta el terreno fue erosionado hasta casi 13 metros, ya a este nivel se observa que el río no sigue su cauce original, desplazándose y cruzándolo. Al salir de la garganta, entrando al cono de deyección el río se desplaza hacia el oeste, la sedimentación fue dominante en el cono de deyección a excepción del nuevo cauce del río, en algunas partes erosionó y en otras partes no llega a tocar el nivel del terreno original. Hay zonas del canal que fueron tapiadas con hasta 7 metros de sedimentos y en el terreno hasta casi 4 metros.

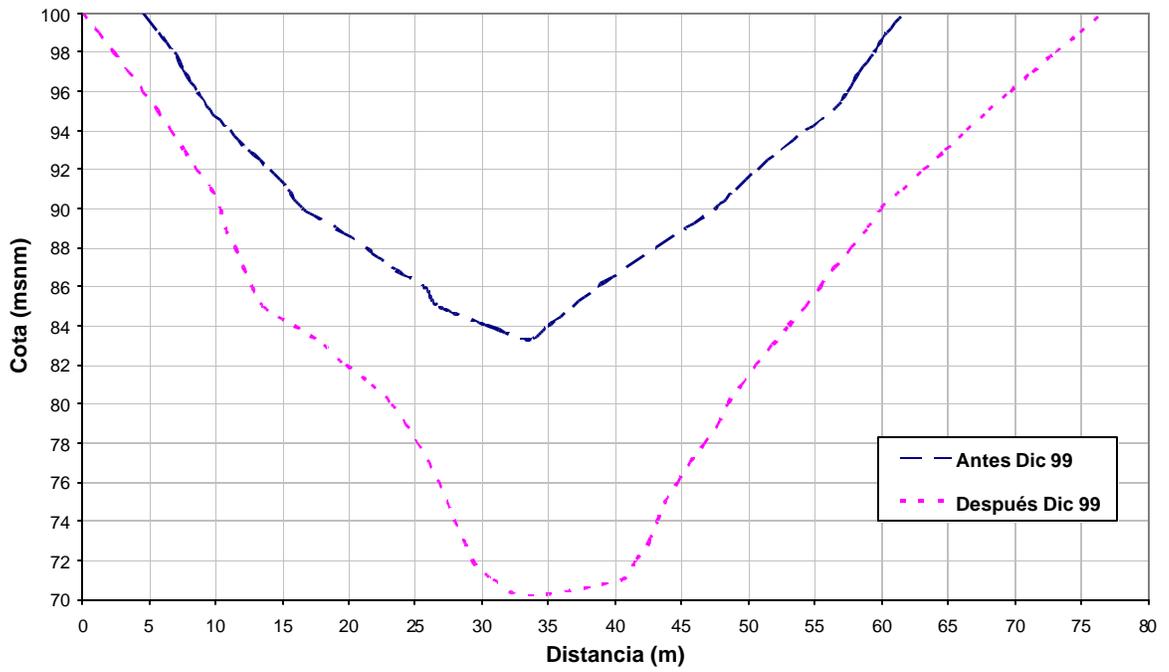


Figura 38 Sección 1 Prog 0 + 000

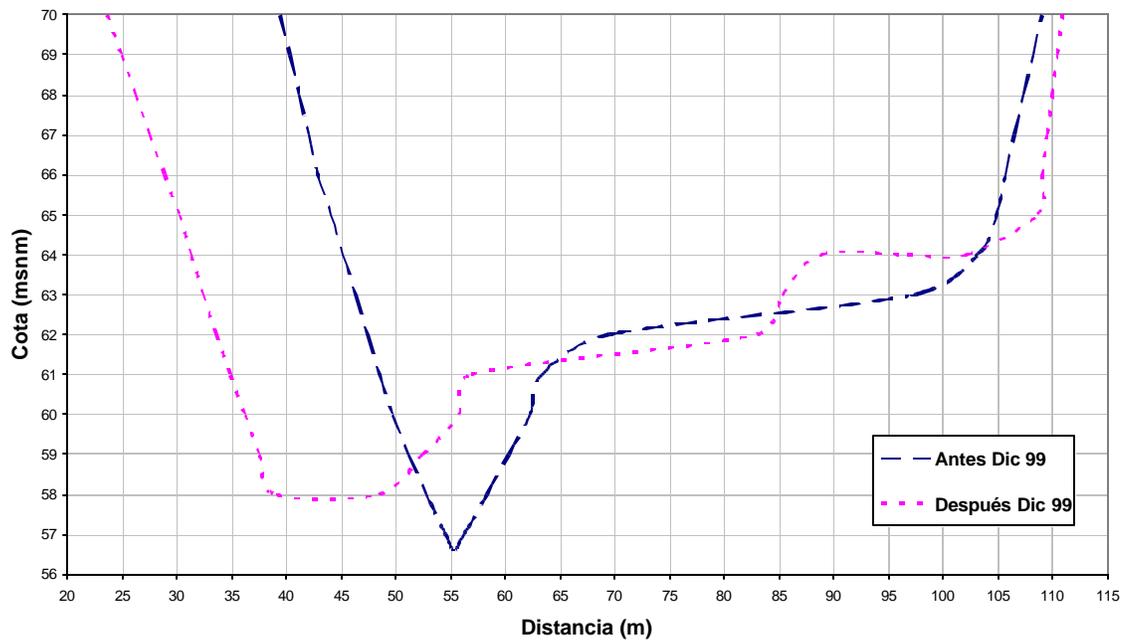


Figura 39 Sección 2 Prog 0 + 215.82

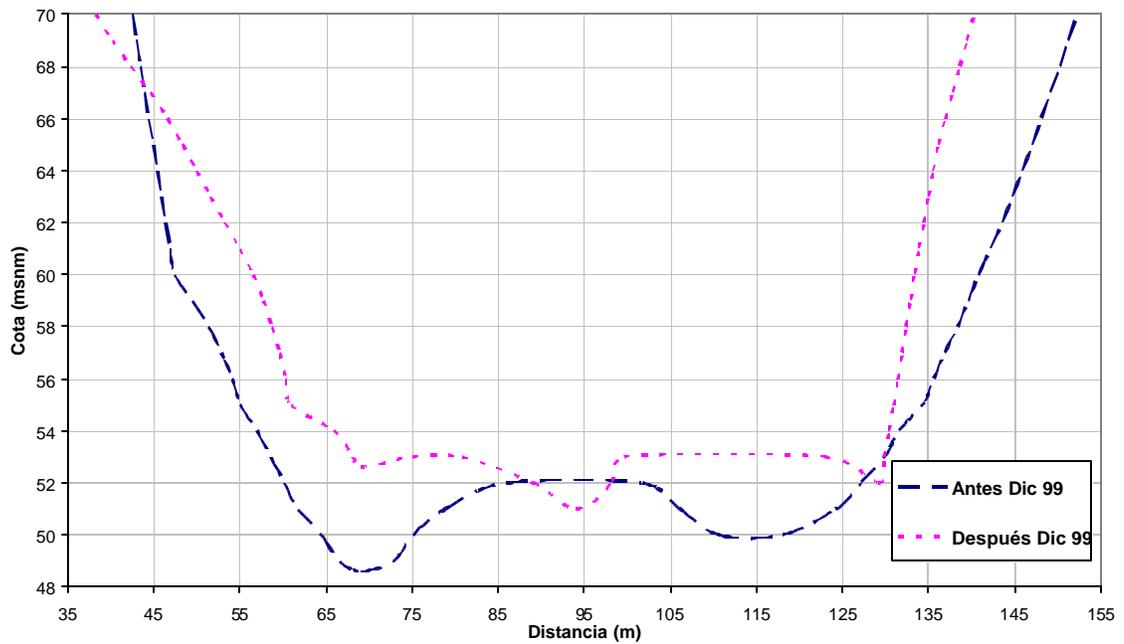


Figura 40 Sección 3 Prog 0 + 335.21

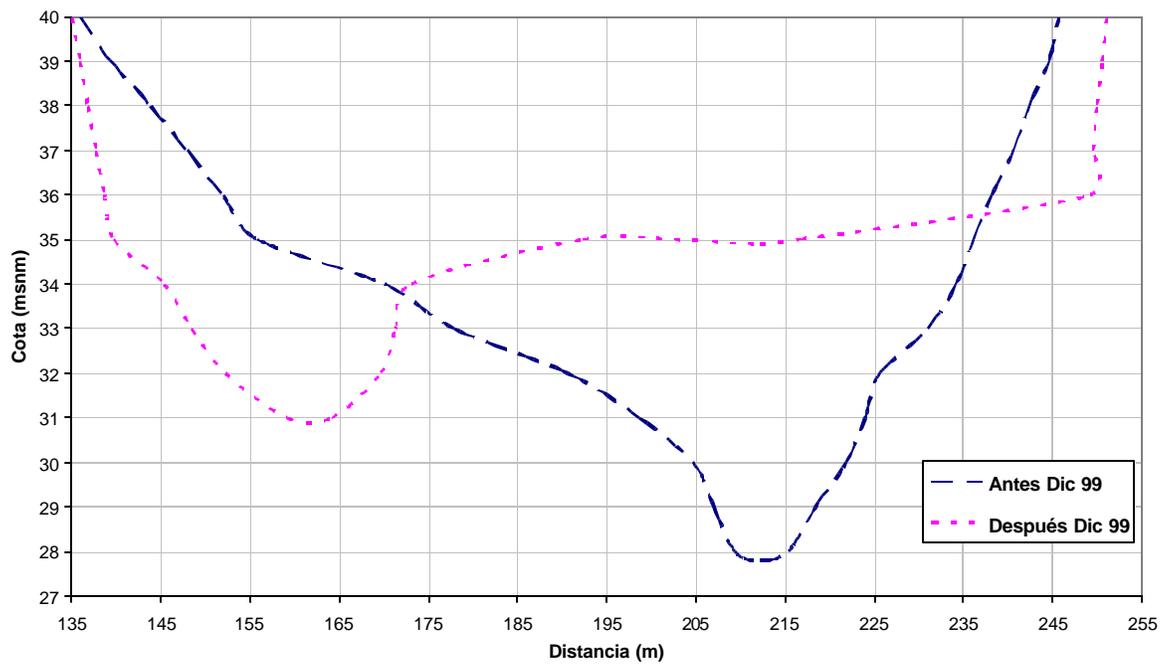


Figura 41 Sección 4 Prog 0 + 621.17

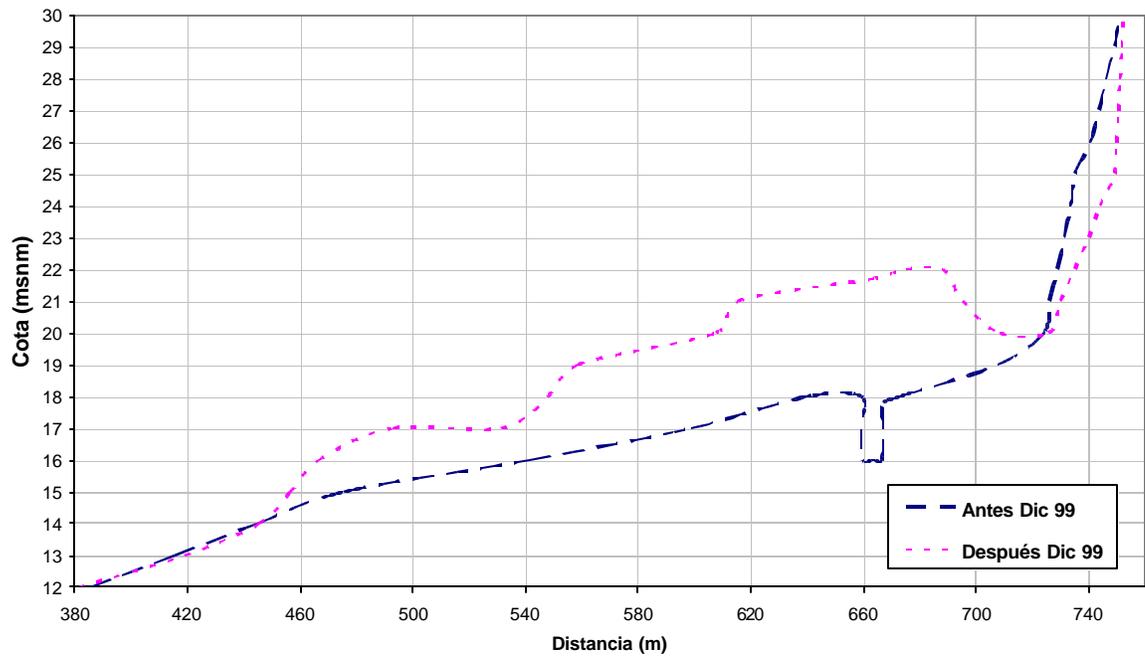


Figura 42 Sección 5 Prog 0 + 885.96

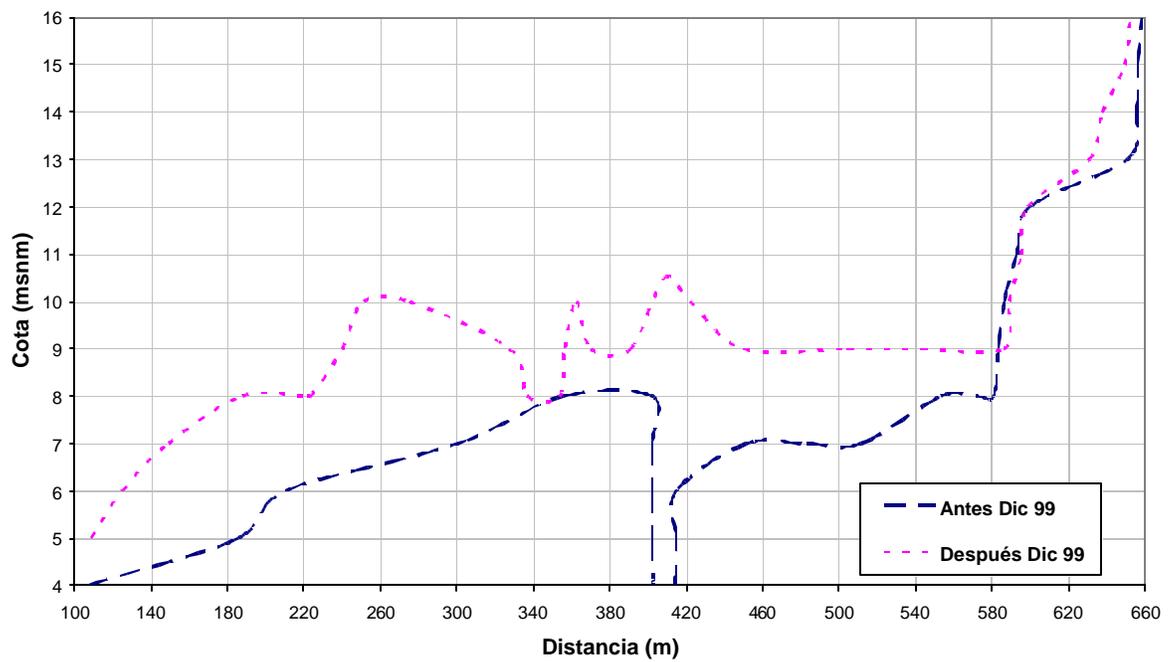


Figura 43 Sección 6 Prog 1 + 092.94

5.5. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DEL LECHO

Después de los deslaves de diciembre de 1999, parte de la población de Macuto quedó tapiada y destruida por los aludes torrenciales provenientes del Río San José de Galipán. Se observó en la parte baja de Macuto, deposición de sedimentos más finos que los que quedaron hacia aguas arriba. Mientras más aguas arriba, el diámetro de los sedimentos depositados era mayor, observándose bloques de 1 ó 2 metros de diámetro.

Aguas arriba de la población de Macuto, internándose en la garganta del río hasta la población de Galipán, se pueden observar en todo el lecho del río grandes peñones de incluso más de 10 metros de diámetro, posiblemente fueron descubiertos por la creciente del 99 y habían sido depositados en el lecho en antiguos aludes, otros fueron incorporados debido a los deslizamientos y desprendimientos en las laderas (ver Figuras 44 a la 46).



Figura 44 Vista del Río San José de Galipán en la parte baja de la cuenca.



Figura 45 Vista del material arrastrado por el Río San José de Galipán en la parte media de la cuenca.



Figura 46 Vista hacia la pared del Picacho de Galipán, detalle del torrente de escombros.

Existe producción de bloques que está asociado al tipo de geología que se presenta en la cuenca.

Parte del material sólido es aportado a la cuenca por la vertiente oriental del Picacho de Galipán, formación Peña de Mora de la edad jurásica (Cerato y Veronesse, 2000).

Muchas edificaciones quedaron tapiadas con los sedimentos arrastrados por el alud torrencial. Con el movimiento de tierra quedaron descubiertas las calles y las casas, pero los sedimentos que quedaron dentro de las casas no fueron removidos. La granulometría obtenida fue proporcionada por el Ing. Rodolfo Berríos, su trabajo consistió en analizar las muestras tomadas de varios ríos del Litoral Central, entre ellos el Río San José de Galipán, y encontrar evidencia de contenido de arcilla en los sedimentos arrastrados por los cauces. En Macuto las muestras fueron tomadas dentro de dos de esas casas que quedaron ocluidas de sedimentos cercanas al cauce, una de cada margen del río. Se escarbó dentro de los sedimentos y se tomó la muestra. Las muestras se identificaron como M-1 y M-2.

Otra muestra obtenida del lecho del río fue proporcionada por Amigos Defensa Civil cuyo peso fue 1176 gramos. Esta muestra se identificó como M-3, de fecha del primero de agosto, su ubicación exacta es desconocida.

MUESTRA	UBICACIÓN RELATIVA	COORDENADAS UTM	RÍO
M-1	Cerca de la Guzmania	11.728.270 N 731.227 W	MACUTO
M-2	Cerca de la Guzmania	11.728.270 N 731.227 W	MACUTO

MUESTRA	UBICACIÓN RELATIVA	COORDENADAS UTM	RÍO
M-3	Lecho del río	-	MACUTO

Los valores de la granulometría suministrada se muestran en la siguiente Tabla, y la Figura 47 muestra gráficamente estos resultados.

Tabla 14 Granulometría de las muestras tomadas en el Río San José de Galipán

Tamiz (mm)	Macuto - 1	Macuto - 2	Macuto - 3
	% Pasante		
38	100	100	100
25	100	100	85.98
19	100	100	80.27
13	100	100	63.83
10	100	100	55.01
6	99.59	99.94	35.85
3	98.66	99.71	35.85
2	97.47	97.44	18.78
1	95.31	79.08	9.87
0.5	82.35	36.97	5.65
0.25	56.63	22.96	2.98
0.15	24.76	15.64	1.22
0.073	7.58	8.07	0.73
0.051	5.95	7.39	0.00
0.036	3.97	6.76	
0.026	2.68	5.66	
0.0182	2.52	5.61	

Tamiz (mm)	Macuto - 1	Macuto - 2	Macuto - 3
0.0133	1.57	4.24	
0.0094	0.90	4.57	
0.0066	0.52	3.80	
0.0047	0.00	3.22	

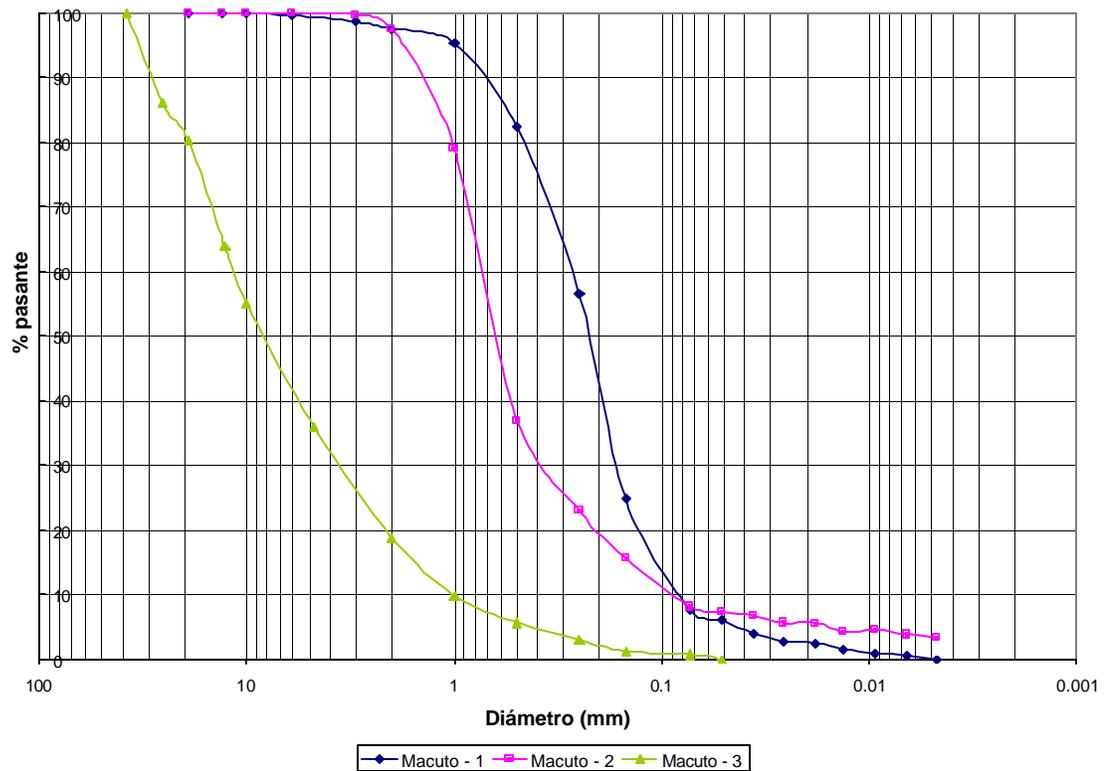


Figura 47 Curvas Granulométricas de las muestras tomadas en Macuto.

Se analizaron los parámetros según los valores de la granulometría obtenida y se determinó para cada muestra el coeficiente de uniformidad.

Tabla 15 Coeficiente de uniformidad.

Muestra	d ₆₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	U

Muestra	d ₆₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	U
Macuto - 1	0.5	0.15	3.33
Macuto - 2	1	0.15	6.67
Macuto - 3	13	1	13.00

Donde:

U es el coeficiente de uniformidad. ($U = d_{60} / d_{10}$)

d₆₀ diámetro del tamiz pasante del 60% de la muestra

d₁₀ diámetro del tamiz pasante del 10% de la muestra

Al realizar el análisis granulométrico y comparar las tres muestras, la curva de la muestra Macuto – 1 es la más uniforme en cuanto al tamaño de los granos, el coeficiente de uniformidad es menor, es la más suelta y se mueve más fácilmente con el escurrimiento del agua.

La pendiente de la curva de M – 3 es la menor, en cuanto a la granulometría es la menos uniforme y tiene mayor coeficiente de uniformidad. La forma de la curva granulométrica de M – 3 corresponde a zonas con condiciones geológicas peculiares, como por ejemplo regiones limítrofes entre montañas y llanuras, donde existen procesos de deposición, cambios bruscos de la velocidad de escurrimiento del agua, etc. (Kezdi, 1975).

Aunque son muestras de un mismo río, existen diferencias en la granulometría entre ellas ya que fueron tomadas en sitios diferentes, y las condiciones de velocidad y profundidad del agua a las que fueron expuestas también varió. Contienen arena gruesa, media y fina. La muestra M – 3 no tiene pasante menor al tamiz 0.051 mm. Las muestras M – 1 y M – 2 tienen un porcentaje menor al 6 y al

8 % de partículas de limo. No tienen pasante del tamiz 0.0047 mm, la muestra M – 2, pasa en un 3.22 % pudiendo contener limos finos y arcillas en muy poca cantidad.

No se encontraron evidencias concretas de contenido de arcilla en este río así como tampoco se encontraron en otros que también fueron analizados por el Ing. Berríos. Las arcillas son partículas coloidales, son parte de la "carga de lavado" y es probable que hayan sido arrastradas por el agua hacia el mar.

6. METODOLOGÍA DESARROLLADA

Parte fundamental de este trabajo es la elaboración de una metodología para evaluar la amenaza por aludes torrenciales y su aplicación a una cuenca piloto, que en este caso es la cuenca del Río San José de Galipán. Este estudio comprende del uso de varias herramientas computacionales, de la aplicación de modelos matemáticos y de los criterios establecidos.

El modelo matemático FLO2D es la herramienta principal a emplear, tiene la capacidad de simular la inundación por aludes torrenciales y calcular las profundidades y las velocidades máximas sobre la superficie de escurrimiento del terreno y en el cauce del río. Para la simulación es necesario construir archivos de datos, en los cuales se reflejan las características y los efectos del terreno y la lluvia como elementos fundamentales, y del canal, los sedimentos, las obstrucciones, los puentes, los embaulamientos, los diques, si son estos parte del escenario a definir. Estos archivos se basan en una malla generada en base a la topografía digital, con los programas Coordenadas y GDS Grid Developer System, y los resultados obtenidos estarán referidos a ella. Junto con los Programas Redícula y Amenaza, los programas Coordenadas y GDS fueron especialmente desarrollados para el Proyecto Ávila.

Con los resultados arrojados por el modelo FLO2D se elaboran los Mapas de Amenaza aplicando el Programa Amenaza, el cual contiene los criterios de amenaza para aludes torrenciales que clasifican el área como de alta, media, baja o inexistente amenaza.

Para determinar el hidrograma de la tormenta de diciembre de 1999 se empleó el programa HEC-HMS, en el cual están compilados los métodos hidrológicos para el análisis de la cuenca y el tránsito de los caudales hasta la garganta del río, aguas arriba de la entrada del río al área de interés.

6.1. INFORMACIÓN BÁSICA A EMPLEAR, ESCOGENCIA DE LA BASE TOPOGRÁFICA

Para iniciar el estudio se necesita la topografía digital en el área de interés de la cuenca, esta debe tener las curvas de nivel acotadas, es decir que dentro de sus propiedades la altura sea un atributo. En el caso de este trabajo para modelar la tormenta de diciembre de 1999 se usó la topografía elaborada entre 1998 – 1999, antes del evento; para modelar para las condiciones actuales se empleó la topografía existente más reciente, la topografía de septiembre del 2000 donde se reflejaron los cambios topográficos después de la tragedia y el movimiento de tierra.

6.2. PROGRAMA HEC-HMS

Es un programa de computación desarrollado originalmente en 1967 por miembros del Hydrologic Engineering Center (HEC), el cual simula la respuesta de la superficie de escurrimiento de la cuenca de un río a la precipitación, por la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos. Cada componente modela un aspecto del proceso de precipitación-escurrimiento en una porción de la cuenca, en la subcuenca. Un componente puede representar una entidad de superficie de escurrimiento, un canal para flujo, o un reservorio. Para la representación de un componente se requiere un grupo de parámetros, los cuales especifican las características particulares de los componentes y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. El resultado del proceso de modelaje es el cálculo computacional del hidrograma de la corriente de flujo en la ubicación deseada en la cuenca del río.

6.3. PROGRAMA COORDENADAS

El Programa Coordenadas es un software desarrollado para leer de los planos digitalizados en AutoCAD, las coordenadas x, y, z de los puntos que definen las curvas de nivel y crea con ellas un archivo ASCII cuya extensión es ".tex".

6.4. PROGRAMA GRID DEVELOPER SYSTEM GDS

El programa GDS genera la malla en la que se basan los archivos del modelo FLO2D, aplica un algoritmo de cálculo que interpola las cotas de terreno para cada celda a partir de un conjunto de puntos (x_i, y_i, z_i) espaciados irregularmente. Este conjunto de puntos que están dados irregularmente en el espacio, es llamado DTM Digital Terrain Model.

El funcionamiento del Programa GDS se puede resumir así:

- Lectura del archivo generado por el Programa Coordenadas.
- Definición del tamaño de la celda.
- Generación de la malla.
- Definición del el contorno cerrado del área de interés.
- Activación del algoritmo de interpolación de las cotas de las celdas. Para cada una de las celdas el programa buscará el conjunto de puntos más cercanos. La cantidad de puntos puede ser definida previamente, así como el radio de interpolación. Cuando la cantidad de DTM requeridos no se encuentra dentro del radio de interpolación este se amplía automáticamente hasta conseguirlos.
- Después de chequear en forma aleatoria los valores de elevación de las celdas interpoladas se generan, mediante una instrucción del programa, dos de los archivos del modelo matemático FLO2D. El archivo CADPTS.DAT contiene las coordenadas horizontales x_i, y_i al centro de cada celda y el archivo FPLAIN.DAT contiene para cada celda cuales son sus celdas vecinas, tiene un espacio asignado para la rugosidad del terreno que por defecto es 0.02 y la elevación z_i interpolada.

6.5. PROGRAMA RETÍCULA

Para la facilidad del estudio se empleó el Programa Reticula, permite visualizar la malla generada por el GDS en el plano digitalizado en AutoCAD, insertándola en una capa o "layer" a especificar, se recomienda previamente haber creado en el plano un "layer" llamado Reticula.

6.6. MODELO MATEMÁTICO FLO2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO2D simula el flujo de fluidos no-newtonianos, aguas claras, fangosas y con escombros de vegetación, sobre una topografía compleja, urbanizada o no; estima el flujo hidráulico, y predice el área de inundación y las profundidades y velocidades máximas del flujo. No contempla el arrastre de sedimentos en cuanto a zonas de deposición y erosión.

La utilidad del modelo radica en la aplicación a diversos problemas no convencionales de inundación tal como flujo no confinado, flujos divididos, flujos de barro y complejos flujos urbanos.

FLO2D simula el flujo de barro sobre las planicies de inundación. Hace uso de archivos que contienen datos topográficos, que han sido exportados desde un plano digitalizado de la zona en estudio. La topografía digital del terreno a modelar es preparada con un asistente de diseño y dibujo computacional (CADD) y procesada con los programas Coordenadas y GDS, es discretiza en un sistema de mallas cuadradas. El centro de cada elemento de la malla es representado por una elevación y una rugosidad. El modelo requiere de archivos de datos donde se incluyen los procesos físicos tales como el flujo en el canal, flujo bajo puentes, flujo en alcantarillas, precipitación, propiedades reológicas de la mezcla de agua con sedimentos, infiltración, etc., es decir, aquellos archivos que controlen la simulación de la inundación y añaden detalle a la rutina de inundación. Están incluidos programas periféricos para asistir en la elaboración de los archivos de datos y su

corrección, muestran gráficamente los datos incluidos en los archivos, facilitando su manipulación, y para interpretar los resultados, representándolos gráficamente.

Ecuaciones básicas

Las ecuaciones básicas por las cuales se rige el modelo son la ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i$$

Y la ecuación de cantidad de movimiento en dos dimensiones:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t}$$

Donde:

h: profundidad del flujo

V_x y V_y : componentes de la velocidad media

g: aceleración de la gravedad

S_f : pendiente de fricción

S_o : pendiente del lecho

i: intensidad de precipitación.

El FLO2D resuelve estas ecuaciones usando el algoritmo de diferencias finitas, resuelve la ecuación de momento para la velocidad del flujo en cada celda.

Los flujos hiperconcentrados, los flujos de barro y los aludes torrenciales son flujos no-Newtonianos, ofrecen una resistencia inicial al movimiento ante la aplicación de esfuerzos cortantes, la velocidad

cambia continuamente de dirección y de magnitud empleándose como parámetro la velocidad promedio \bar{V} en la dirección general del flujo.

El modelo considera al flujo como continuo, combina el agua y los sedimentos. Dentro de las características que considera el modelo son el tipo de sedimentos en el agua y su concentración.

La cohesión entre las partículas finas controla el comportamiento de los flujos no-Newtonianos y contribuye a las fuerzas cortantes. La cohesión incide sobre las fuerzas cortantes, la cual debe ser vencida para iniciar el movimiento del fluido. Al combinar las fuerzas cortantes y viscosas, y estas ser iguales el flujo actúa como un flujo plástico de Bingham.

$$t^* = \frac{t - t_y}{h \frac{du}{dy}} = 1$$

Fuerzas de turbulencia son generadas al chocar las partículas de sedimentos entre sí. Cuando en un evento la concentración de sedimentos varía dramáticamente, las fuerzas viscosas y las turbulentas pueden alternativamente dominar, produciendo olas en el flujo.

Los flujos hiperconcentrados son analizados mediante el siguiente modelo reológico cuadrático (O'Brien & Julián, 1985):

$$t = t_y + h \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

Donde:

t : esfuerzo cortante total

t_y : esfuerzo de cedencia

h : viscosidad dinámica

dv / dy : gradiente de velocidad

C: Coeficiente del esfuerzo cortante inercial

Los primeros dos términos de la suma, el esfuerzo de cedencia y el viscoso, representan la resistencia a las fuerzas de inercia de un fluido de Bingham y definen el esfuerzo cortante de un flujo cohesivo, hiperconcentrado en un régimen de flujo viscoso. El último término es el esfuerzo cortante turbulento, el cual representa los esfuerzos cortantes dispersivos y turbulentos.

Si el flujo es controlado principalmente por fuerzas viscosas, las velocidades serán menores, pero si la viscosidad y las fuerzas cortantes son pequeñas, las fuerzas turbulentas dominarán y las velocidades serán altas.

La pendiente total de fricción S_f donde se consideran las fuerzas cortantes, viscosas y turbulentas es definida como (O'Brien et al., 1993):

$$S_f = \frac{t_y}{g_m h} + \frac{K h V}{8 g_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}}$$

Donde:

n : coeficiente de fricción de Manning,

g_m : peso específico de la mezcla

K : parámetro de resistencia, depende de la forma, pendiente y condiciones de vegetación del canal.

El esfuerzo de cedencia y la viscosidad varían con la concentración volumétrica de sedimentos, C_v .

Las siguientes relaciones empíricas son aplicadas en este modelo:

$$h = a_1 e^{b_1 C_v}$$

$$t = a_2 e^{b_2 C_v}$$

Donde:

a y B : coeficientes empíricos obtenidos de un análisis reológico del material.

En este trabajo se han usado valores de $a_1 = 6.02 \times 10^{-4}$ poises, $B_1 = 33.10$, $a_2 = 1.72 \times 10^{-3}$ dinas/cm² y $B_2 = 29.50$, debido a la similitud de los sedimentos de la cuenca aquí estudiada con algunas cuencas en Estados Unidos (O'Brien, 2000).

El modelo FLO2D permite considerar las características del área de estudio, del canal, de las estructuras hidráulicas y de otras estructuras civiles que estén en el área de estudio. Se mencionan las empleadas en el modelaje de la cuenca en el punto "Criterios de Simulación" en este mismo capítulo.

En cuanto a las limitaciones del programa, la principal es que para cada elemento de celda considera un único valor de elevación y un único valor de rugosidad. La sección del río puede ser bastante irregular, en la entrada de datos se tiende a estandarizar por tramos cuando por lo general es cambiante.

Las limitaciones del programa con respecto al canal son:

- No modela el flujo alrededor de las pilas de un puente.
- No modela la sobre-elevación del canal en las curvas.
- No simula los saltos hidráulicos.
- No simula la sedimentación y erosión del canal y de la superficie de escurrimiento.

Las principales suposiciones realizadas en el modelo son:

- El flujo permanece constante en el intervalo de tiempo especificado.
- Distribución hidrostática de la presión.
- La rugosidad hidráulica está basada en la permanencia de la resistencia del flujo.
- La geometría uniforme del canal y la rugosidad son representadas con un elemento del canal.

Se asume además, un fondo rígido del canal cuando no se simula el transporte de sedimentos

6.7. PROGRAMA AMENAZA

El Programa Amenaza procesa los archivos de resultados de profundidades y velocidades máximas del FLO2D, clasifica cada celda con el nivel de amenaza que le corresponde según los criterios de amenaza establecidos en la combinación de la intensidad del evento con la probabilidad de excedencia anual del evento, y automatiza la generación del Mapa de Amenaza en el formato del Sistema de Información Geográfica ArcView.

El programa asigna colores predeterminados según el nivel de la amenaza:

- Amenaza Alta: color rojo.
- Amenaza Media: color naranja.
- Amenaza Baja: color amarillo.
- Cuando no existe amenaza no es asignado color.

6.8. CRITERIOS DE SIMULACIÓN

En cuanto a la hidrología empleada se siguieron los siguientes criterios:

- Se calibró la cuenca con el hietograma y el hidrograma generados por C.G.R. Ingeniería para la tormenta de 500 años y de 24 horas de duración.
- El escenario estudiado para la simulación de la tormenta de diciembre de 1999 se basó en la lluvia registrada en Maiquetía distribuida según la lluvia horaria de Mamo, se generó el hidrograma correspondiente con el HEC-HMS. Se empleó el Método del Soil Conservation Services y el método de la onda cinemática.
- Para la elaboración de los Mapas de Amenaza se emplearon los hidrogramas generados en el "Estudio de crecidas de las cuencas del Litoral Central y Dto. Federal" de C.G.R. Ingeniería, correspondientes a la cuenca del Río San José de Galipán.

Los criterios empleados en la simulación de flujo hiperconcentrado de barro y escombros aplicados en el modelo bidimensional FLO2D en cuanto a las características físicas y al cálculo, son los siguientes:

- El área de estudio fue definida por una malla, compuesta de elementos cuadrados de tamaño uniforme, a los que se les asignó un número para identificarlos y se les especificó la ubicación según sus coordenadas, las celdas vecinas, la elevación promedio del terreno y la rugosidad (n de Manning). El tamaño de cada celda usada es 25 m x 25 m de lado.
- En cada elemento de la malla, el flujo es simulado en ocho posibles direcciones, perpendiculares a las caras de un octágono.
- En cada fracción de tiempo se calcula para cada celda el caudal neto que entra y sale por cada uno de los lados del elemento. La diferencia de volumen resultante se distribuye uniformemente en el área disponible del elemento
- Los intervalos de tiempo varían según el criterio de estabilidad de Courant, pasos de tiempo

relativamente cortos, entre 0.1 y 30 segundos. Esto depende de la rapidez de la variación de los hidrogramas de entrada y de la geometría.

- Se puede emplear la ecuación de la onda dinámica o de la onda difusiva. Se especificó que los cálculos se efectuaran con las ecuaciones de la onda dinámica.
- El modelo simula el flujo en el canal como un flujo unidimensional.
- El área de la sección del canal puede ser irregular, rectangular o trapezoidal.
- El ancho de la sección del canal puede ser mayor al ancho del elemento de la malla y ocupar varios elementos de la malla, especificando la dirección en la que se extiende.
- Las calles son modeladas como canales rectangulares, para cada elemento de malla con calles se especifica el ancho de la vía, la rugosidad (n de Manning), la elevación y la altura de la acera, cuando esta altura es superada el agua inunda los terrenos más próximos.
- Se contempló la simulación del flujo a través de puentes.
- A cada elemento de malla puede especificarse un porcentaje de obstrucción total o parcial del flujo, se aplicó un porcentaje entre 0 y 30 %.
- El flujo puede penetrar las edificaciones a través de ventanas y puertas, pocas estructuras son absolutamente impermeables ante un alud torrencial. Las colinas, los muros y las edificaciones reducen el área por donde fluye el flujo, se aplicó un porcentaje de reducción de área que va desde 0 a 30 %.
- Se calibró el modelo de la cuenca con el FLO2D con el evento de diciembre de 1999. Se usó el hidrograma generado según la lluvia registrada en Maiquetía, se probó con diferentes valores máximos de concentración volumétrica de sedimentos y se escogió aquel cuyo resultado estuviese más aproximado al área de la mancha de inundación obtenida y a las profundidades de sedimento registradas.

- Para la simulación de las tormentas de diseño se emplearon los hidrogramas de las crecientes de 10, 100 y 500 años de período de retorno.
- La concentración volumétrica de sedimentos de cada creciente va a depender de las condiciones en las cuales se encuentre la cuenca, por ejemplo, una creciente de 100 años que se hubiese producido antes del evento de diciembre del 99 no produciría la misma cantidad de sedimentos que si se produjera días después del evento o pasados tres años, para las tres fechas las condiciones de la cuenca, la disposición de material y la cobertura vegetal es diferente. Por tanto no se debería asociar un valor de C_v máximo a una creciente.
- Para la determinación del valor máximo de la concentración volumétrica de sedimentos para cada creciente, se compararon los eventos cuantificados en otros países con los daños causados por el flujo y la profundidad de los sedimentos depositados en la garganta y en el cono de deyección. Se considera la clasificación de O'Briem (2000) para los flujos hiperconcentrados, flujos de barro, según la concentración volumétrica de sedimentos ($0.20 < C_v < 0.65$). Por tanto, para la creciente de 10 años de período de retorno se empleó $C_v = 0.20$ constante en todo el hidrograma como valor mínimo esperado para un flujo de barro y escombros. Para la creciente de 500 años $C_v = 0.35$, resultado de la calibración de la cuenca. Para la creciente de 100 años se empleó $C_v = 0.25$, se tomó un valor intermedio entre los coeficientes empleados para 10 y para 500 años, ya que no se cuenta con un evento con el cual poder calibrar.
- El valor máximo para la distribución temporal de la concentración volumétrica de sedimentos se colocó justo un intervalo de tiempo antes del caudal máximo correspondiente al hidrograma líquido.
- Se comparó el volumen del río en el área de estudio, con el 15 % del volumen de

sedimentos generados en cada creciente. Si el volumen del río era menor a la cantidad de sedimentos se consideraba entonces que el canal era colmatado de sedimentos y se estudiaba para esa creciente este caso también.

- El modelaje del canal con todos los elementos de estudio además de las características del canal incluye las calles, los puentes, el efecto de las edificaciones.
- El modelaje del canal colmatado de sedimentos se excluye del modelaje el canal y los puentes porque se considera que estos están enterrados por los sedimentos.
- Cuando el nivel del agua en el río alcanza el fondo del puente, el modelo considera que se obstruye, ya que el flujo de barro y escombros trae consigo el arrastre de troncos de árboles y rocas que pueden taponar el paso del flujo bajo el cauce.

Para la definición de los parámetros característicos de los sedimentos de la cuenca se recolectaron muestras de material después del evento de diciembre de 1999 y se compararon con las reportadas en otros estudios, que fueron calibradas con datos de cuencas experimentales, (O'Brien, 19993). Se emplearon los siguientes valores:

Gravedad Específica: 2.74

Resistencia de la planicie al flujo laminar: 2.285

El análisis reológico se hizo según las siguientes fórmulas empíricas:

$$h = a_1 e^{b_1 C_v}$$

$$t = a_2 e^{b_2 C_v}$$

Donde a y B son coeficientes empíricos definidos por un análisis reológico del material.

Debido a la similitud de las cuencas del litoral central con otras estudiadas en Estados Unidos se emplearon los siguientes valores $a_1 = 6,02 \times 10^{-4}$ poises, $B_1 = 33,10$, $a_2 = 1,72 \times 10^{-3}$ dinas/cm²

y $\beta_2 = 29,50$.

Para la elaboración de los Mapas de Amenaza se adoptaron los criterios y la metodología empleada en el Proyecto PREVENE, (Basabe et al, 2001). En la definición de las áreas de amenaza se consideró la intensidad del evento y la probabilidad de ocurrencia del mismo o probabilidad de excedencia.

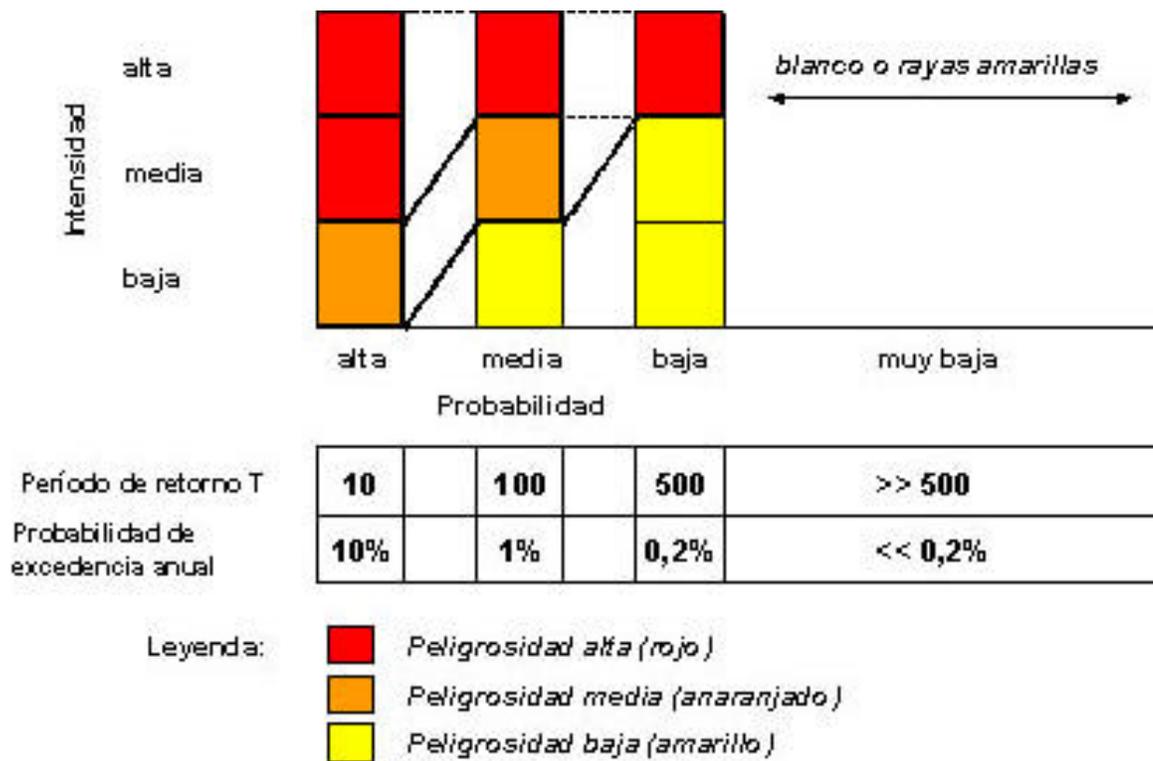


Figura 48 Relaciones de probabilidad – intensidad – amenaza (propuesta PREVENE (Basabe et al., 2001))

Los criterios de definición de intensidades para inundaciones y aludes torrenciales son los siguientes:

Inundaciones		
- <i>Intensidad alta:</i>	$h > 1,5 \text{ m}$	ó $v \times h > 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
- <i>Intensidad media:</i>	$0,5 \text{ m} < h < 1,5 \text{ m}$	ó $0,5 \text{ m}^2/\text{s} < v \times h < 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
- <i>Intensidad baja:</i>	$h < 0,5 \text{ m}$	y $v \times h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

<u>Aludes torrenciales</u>			
- <i>Intensidad alta:</i>	$h > 1 \text{ m}$	ó	$v \times h > 1 \text{ m}^2/\text{s}$
- <i>Intensidad media:</i>	$h < 1 \text{ m}$	y	$v \times h < 1 \text{ m}^2/\text{s}$
- <i>Intensidad baja:</i>	No existe para este tipo de fenómeno		

Se definieron tres clases de amenaza, que representan distintos niveles de daños a personas y estructuras:

Amenaza Alta

En el Mapa de Amenaza se identifica como el área de color rojo. En este nivel de amenaza el área puede ser afectada por dos tipos de eventos. Por eventos de alta y media intensidad donde las personas están en peligro tanto dentro como fuera de las edificaciones y existe peligro de destrucción repentina de las edificaciones. O por eventos de intensidad débil pero con alta probabilidad de ocurrencia, donde las personas están amenazadas en el exterior de las edificaciones.

Amenaza Media

Es el área en color naranja en el Mapa de Amenaza. Puede ser afectada por eventos de mediana y alta intensidad con probabilidad de ocurrencia media. Las personas están en peligro afuera de las edificaciones, adentro de las edificaciones en menor magnitud. Las estructuras según la calidad de la construcción pueden sufrir daños pero no destrucción repentina. Los daños en esta zona se pueden disminuir con medidas de protección adecuadas.

Amenaza Baja

En el Mapa de Amenaza se encuentra de color amarillo. Esta área se ve afectada por eventos con probabilidad de ocurrencia baja e intensidad media. El peligro para las personas es débil o inexistente, las estructuras pueden sufrir daños leves en el exterior y fuertes daños en el interior de las mismas.

Las áreas en el Mapa de Amenaza que no han sido identificadas con ningún color son zonas fuera

del área de amenaza de aludes torrenciales. Aunque ello no implica que esté exenta de peligro, ya que algún evento extraordinario imprevisto pudiera ocasionar daños en dicha zona.

7. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA TORMENTA DE DICIEMBRE DE 1999

Al momento de la tragedia de Vargas estaban en funcionamiento dos estaciones en las que quedaron registradas la lámina de lluvia caída. La estación de Mamo registró la lámina de lluvia caída cada hora. La estación de Maiquetía registró la lámina de lluvia diaria. Otras estaciones dejaron de funcionar o fueron desmanteladas tiempo antes.

Se cree que la precipitación registrada en Maiquetía no es la mayor precipitación ocurrida en Vargas en ese evento, ya que hubo sitios donde los daños fueron mayores, la estación se encuentra a 43 m.s.n.m. y se cree que con la altura la precipitación fue mayor debido al efecto de bloqueo que producen las montañas sobre las nubes y los frentes fríos. Existe la incertidumbre acerca de la veracidad de los datos de esta estación (C.G.R. Ingeniería, 2000). A pesar de todo esto, estos registros han sido considerados como representativos de las cuencas ubicadas entre Caita La Mar y Naiguatá. El hidrograma resultante de tres días que se explica a continuación fue el empleado en el *Escenario 1* de la simulación de la tormenta de diciembre de 1999.

C.G.R. Ingeniería (2000) estudió el escenario de una lluvia concentrada de 24 horas de duración con un único caudal pico y generó hidrogramas de lluvias de diferentes períodos de retorno, para un grupo de cuencas del Estado Vargas. Para ello dividió cada cuenca en microcuencas y empleó el método de la onda cinemática para el tránsito de la creciente.

El *Escenario 2* de la simulación de la tormenta de diciembre de 1999 emplea el hidrograma de la creciente de diseño generado por C.G.R. Ingeniería (2000) cuyo valor máximo se aproxime más al valor pico obtenido en el hidrograma de tres días generado para el Escenario 1.

En las narraciones de los sobrevivientes de la tragedia, se ha registrado que la intensidad de la lluvia

había aumentado y disminuido en distintas oportunidades, así como que habían ocurrido varias avenidas en los ríos. Ante la incertidumbre de no conocer lo realmente ocurrido, se decidió estudiar para la simulación de la tormenta de diciembre de 1999 entre los días 14, 15 y 16, un escenario diferente al usado por C.G.R. Ingeniería (2000), de tres días de duración, donde se asume que la precipitación en la cuenca de San José de Galipán es la misma que ocurrió en la estación de Maiquetía y donde se tomó como referencia la distribución horaria de la lluvia de Mamo para crear la distribución horaria de la lluvia de Maiquetía.

El día de la estación de Maiquetía inicia a las 8:00 a.m. y dura 24 horas, es decir hasta las 8:00 a.m. del día siguiente. Se trabajaron los registros para Maiquetía de esa manera, por tanto el tiempo de la simulación del evento está comprendido entre las 8:00 a.m. del día 14 y las 8:00 a.m. del día 17 de diciembre de 1999.

Tabla 16 Distribución horaria de las lluvias registradas en Mamo y Maiquetía.

	Mamo	%	Maiquetía	Mamo	%	Maiquetía	Mamo	%	Maiquetía	
Precipitación (mm)										
Hora \ día	14-Dic-99			15-Dic-99			16-Dic-99			
08:00 09:00	1.00	10.75	12.90	4.00	2.80	10.66	3.70	3.78	15.49	
09:00 10:00	0.00	0.00	0.00	3.80	2.66	10.12	15.80	16.12	66.17	
10:00 11:00	0.00	0.00	0.00	4.70	3.29	12.52	16.00	16.33	67.00	
11:00 12:00	0.90	9.68	11.61	3.80	2.66	10.12	10.20	10.41	42.72	
12:00 13:00	1.80	19.35	23.23	7.50	5.25	19.98	3.10	3.16	12.98	
13:00 14:00	1.10	11.83	14.19	3.70	2.59	9.86	5.50	5.61	23.03	
14:00 15:00	0.20	2.15	2.58	10.70	7.49	28.51	6.50	6.63	27.22	
15:00 16:00	0.00	0.00	0.00	7.30	5.11	19.45	2.20	2.24	9.21	
16:00 17:00	0.00	0.00	0.00	6.00	4.20	15.98	0.00	0.00	0.00	
17:00 18:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	1.63	6.70	

	Mamo	%	Maiquetía	Mamo	%	Maiquetía	Mamo	%	Maiquetía
18:00 19:00	0.50	5.38	6.45	3.70	2.59	9.86	1.10	1.12	4.61
19:00 20:00	2.00	21.51	25.81		0.00	0.00	1.60	1.63	6.70
20:00 21:00	0.50	5.38	6.45	14.00	9.80	37.30	3.00	3.06	12.56
21:00 22:00	0.30	3.23	3.87	1.20	0.84	3.20	4.20	4.29	17.59
22:00 23:00	0.40	4.30	5.16	18.70	13.09	49.82	4.30	4.39	18.01
23:00 00:00	0.00	0.00	0.00	4.50	3.15	11.99	10.80	11.02	45.23
00:00 01:00	0.20	2.15	2.58	6.40	4.48	17.05	5.70	5.82	23.87
01:00 02:00	0.00	0.00	0.00	8.50	5.95	22.64	0.80	0.82	3.35
02:00 03:00	0.10	1.08	1.29	16.80	11.76	44.76	1.50	1.53	6.28
03:00 04:00	0.00	0.00	0.00	5.60	3.92	14.92	0.40	0.41	1.68
04:00 05:00	0.00	0.00	0.00	1.30	0.91	3.46	0.00	0.00	0.00
05:00 06:00	0.00	0.00	0.00	6.00	4.20	15.98	0.00	0.00	0.00
06:00 07:00	0.10	1.08	1.29	1.20	0.84	3.20	0.00	0.00	0.00
07:00 08:00	0.20	2.15	2.58	3.50	2.45	9.32	0.00	0.00	0.00
Total del día	9.30	100.00	120.00	142.90	100.00	380.70	98.00	100.00	410.40

En la Tabla 16 se muestra la lamina de lluvia registrada en la estación de Mamo cada hora, el porcentaje correspondiente del total de la lluvia de Mamo registrado entre las 8:00 de la mañana de un día hasta las 8:00 de la mañana del día siguiente, y la lámina de lluvia horaria de Maiquetía siguiendo la distribución porcentual de Mamo. En la Figura 49 se graficaron las láminas de lluvias horarias de Mamo y las láminas de lluvia horarias estimadas de Maiquetía.

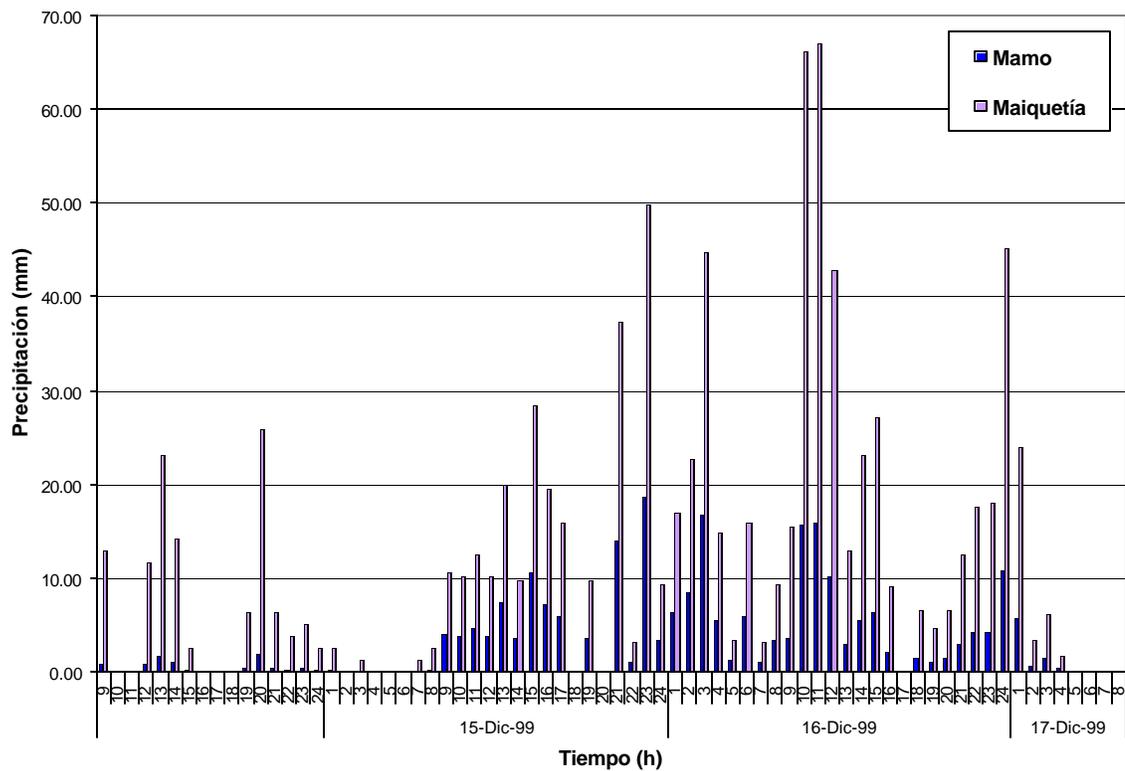


Figura 49 Distribución horaria de la precipitación en Mamo y Maiquetía entre los días 14 al 17 de Diciembre de 1999.

7.1. GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS DE FLUJO Y SEDIMENTO

Para la generación del hidrograma de la creciente de diciembre de 1999, se usó el modelo matemático HEC-HMS, que ha sido desarrollado por The U.S. Army Corps of Engineers. En él se representó la cuenca del Río San José de Galipán y sus parámetros físicos. La cuenca se dividió en tres subcuencas: Galipán que se encuentra al sureste, Los Perros al suroeste y Macuto al norte (ver Figura 50).

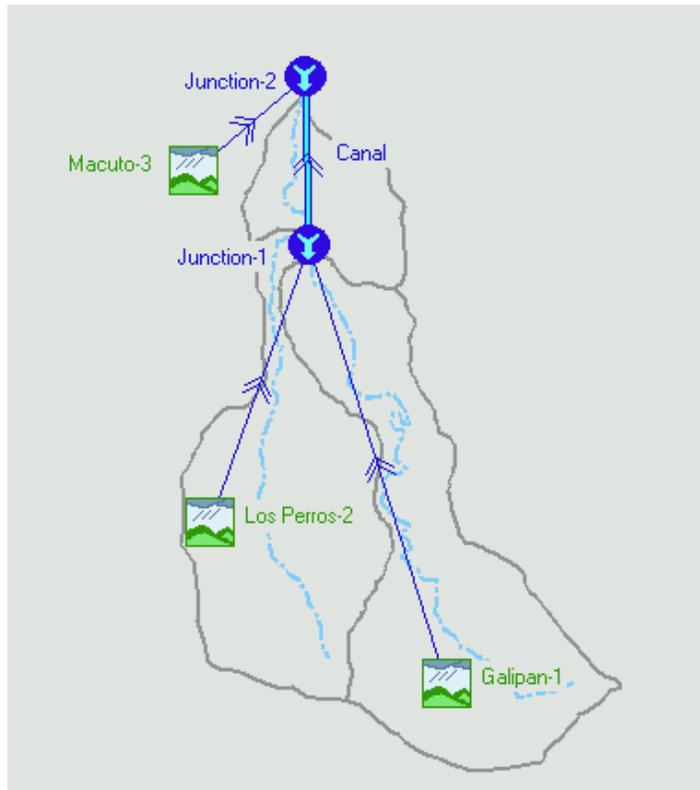


Figura 50 Representación esquemática de la cuenca del Río San José de Galipán.

Las características físicas de cada una de las subcuencas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 17 Características de las subcuencas hidrológicas.

	Área (Km ²)	Longitud (m)	Pendiente cauce (m/m)	Pendiente lateral (m/m)		Sub-área %	
				Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha
San Antonio de Galipán 1	7,31	7,629.76	0.2029	0.62	0.57	54.13	45.87
Los Perros 2	6,13	5,253.00	0.2718	0.62	0.49	50.95	49.05
Macuto 3	2,03	2,056.31	0.0760	0.66	0.48	26.85	73.15
	15,47						

El área cultivada de la cuenca se estimó en un 18 % del área total. Para la generación del hidrograma no se consideraron la capacidad de almacenamiento de agua en la cuenca, la percolación, la infiltración, el aporte del agua contenida en los poros de los sedimentos arrastrados,

la condición del suelo para la tormenta era cercana a la saturación. Además no se considera la evapotranspiración, durante el mes de diciembre y en especial en los días de la tormenta no "salió el sol", se despreció la transpiración de la vegetación.

El grupo hidrológico de suelo B es el suelo que se considera más parecido al suelo de la cuenca. Los tipos de suelos fueron considerados en la determinación del número de la curva NC a emplear en el método del Soil Conservation Services, aunque se despreció el área residencial y pavimentada de Macuto, ya que representa un 0,50 % del área total de la cuenca. Se determinó como número de la curva NC de la cuenca: 58.

Tabla 18 Determinación del número de la curva NC.

Grupo hidrológico del suelo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.				
Descripción del uso	Área (m²)	% del Área Total	NC	%A * NC
Tierra cultivada, con tratamientos de conservación	2.800.962,06	18,11	71	1.285,83
Bosques, troncos delgados, cubierta buena	12.665.158,24	81,89	55	4.503,93
	15.466.120,30	100,00	NC	58

Para la determinación del tiempo de concentración de la cuenca y de las subcuencas se aplicó la fórmula de Kirpich:

$$T_c = 0.0195 \left(\frac{Lc^3}{H} \right)^{0.385}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración de la cuenca

Lc: Longitud del cauce principal

H: Desnivel máximo de la cuenca

Tabla 19 Tiempo de concentración Kirpich.

		Longitud cauce (m)	Diferencia de elevación (m)	Tiempo de concentración (min)
Subcuenca	Galipán 1	7.309,24	1.950	32,19
	Los Perros 2	6.128,17	1.650	22,30
	Macuto 3	2.028,71	170	18,11
Cuenca	San José de Galipán	9.686,07	2.120	41,06

El Tiempo de Concentración de la cuenca es de 41 minutos, según Kirpich. El 15 % de este tiempo, 6,16 minutos, es un valor de referencia que se usa para definir el intervalo de tiempo a usar en la entrada de datos y en la salida de datos, con la intención de “cazar el pico de la tormenta”. Basándose en esto, la entrada de la lámina de lluvia a emplear en cada hietograma y la salida de los datos de cada hidrograma de la tormenta es cada 5 minutos.

7.1.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La cuenca de San José de Galipán fue dividida en tres subcuencas, al no tener un alto nivel de detalle en la cuenca se calibraron los parámetros de esta en función del estudio efectuado por C.G.R. Ingeniería (2000).

C.G.R. Ingeniería (2000) generó hietogramas de lluvia e hidrogramas para diferentes crecientes de diseño en la cuenca del Río San José de Galipán, para ello subdividió la cuenca en 63 subcuencas y utilizó el método de la onda cinemática para el tránsito de la creciente, empleó como rugosidad (n de Manning) para la superficie de escurrimiento 0.40 y para el cauce 0.040; mientras que en este estudio se empleó el método del Soil Conservation Services y el método de la Onda Cinemática para

una segunda verificación de los resultados.

Para calibrar los parámetros de la cuenca se empleó el hietograma de la lluvia de diseño de C.G.R. Ingeniería (2000), correspondiente a un $Tr = 500$ años (ver Figura 51). Con él se buscó reproducir el hidrograma generado por C.G.R. Ingeniería para dicha lluvia (ver Figura 52).

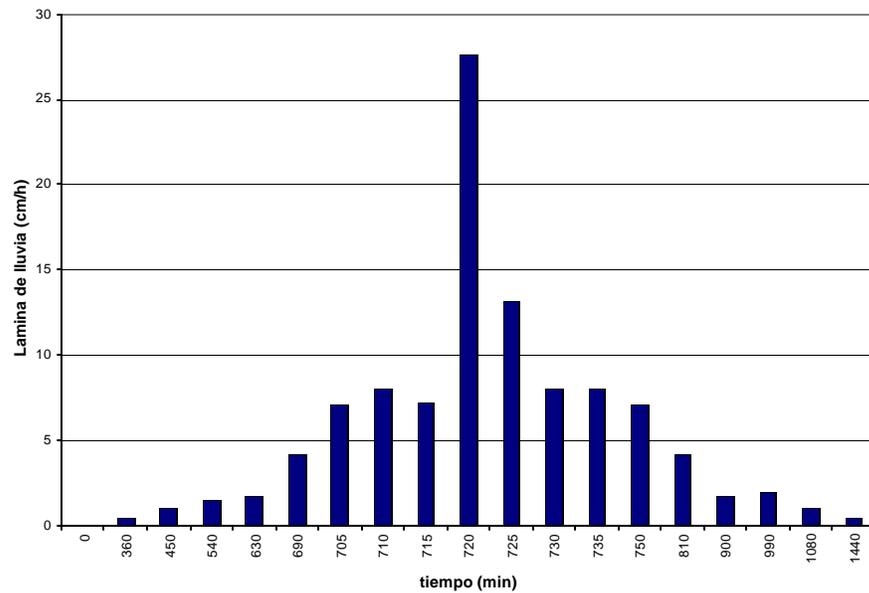


Figura 51 Hietograma de la lluvia de $Tr = 500$ años – C.G.R. Ingeniería.

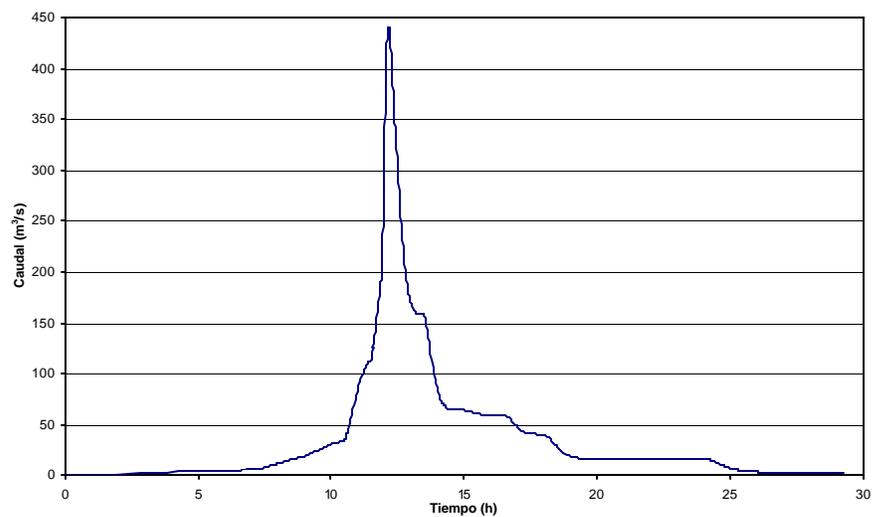


Figura 52 Hidrograma de la creciete de $Tr = 500$ años – C.G.R. Ingeniería.

Por el método del Soil Conservation Services se determinó el tiempo de retardo de cada una de las subcuencas, usando como primera aproximación el 60 % del tiempo de concentración según Kirpich.

Con estos valores y con el HMS-HEC se obtuvo un primer resultado. El pico de la tormenta obtenido era menor que el generado por C.G.R. Ingeniería. Se iteró aplicando el mismo factor de reducción a todos los tiempos de retardo de las subcuencas de manera que el caudal máximo obtenido aumentara hasta que se igualó al caudal buscado.

El método de la onda cinemática se aplicó como una comprobación de los resultados. Fue necesario ajustar los valores de rugosidad (n Manning) de la superficie de escurrimiento y del cauce de manera que el caudal máximo obtenido fuese igual al generado por C.G.R. Ingeniería.

En la Figura 53 se representaron los hidrogramas obtenidos con el método SCS, con el método de la Onda Cinemática y con el hidrograma de C.G.R. Ingeniería, se puede observar que existe gran similitud entre los hidrogramas, tanto en forma como en valores.

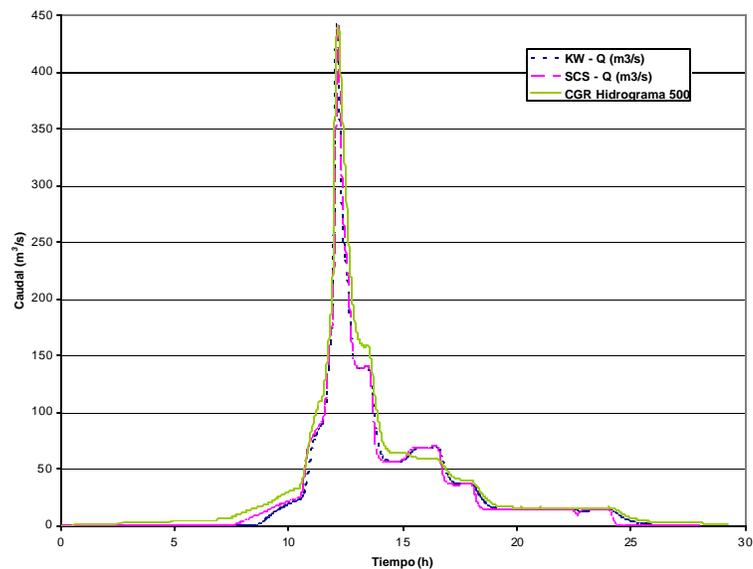


Figura 53 Comparación de Hidrogramas generados con los métodos SCS y Onda Cinemática (KW) con el hidrograma generado por C.G.R. Ingeniería.

7.1.2. GENERACIÓN DEL HIDROGRAMA DE LA TORMENTA

Para generar el hidrograma de la tormenta de 3 días de duración a modelar en el FLO2D, se empleó la lluvia horaria de Maiquetía. Cada lámina de lluvia horaria fue distribuida a su vez en 12 intervalos de 5 minutos de duración. Los valores menores a 25 milímetros de lámina de lluvia fueron distribuidos en láminas iguales. Los valores mayores a 25 milímetros fueron distribuidos en según las curvas IDF de la estación de Maiquetía, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 20 Distribución de la lamina de lluvia horaria cada 5 minutos (C.G.R. Ingeniería, 2000).

Tiempo (min)	Lámina (%)
5	5,21
10	5,21
15	5,21
20	7,99
25	9,38
30	23,96
35	11,46
40	7,99
45	7,99
50	5,21
55	5,21
60	5,21
	100,00

Del transito de la lluvia de 3 días por el método del Soil Conservation Services a la cuenca calibrada se obtuvo el hidrograma de la creciente (ver Figura 54). Ver en el Anexo 3 los valores del hidrograma.

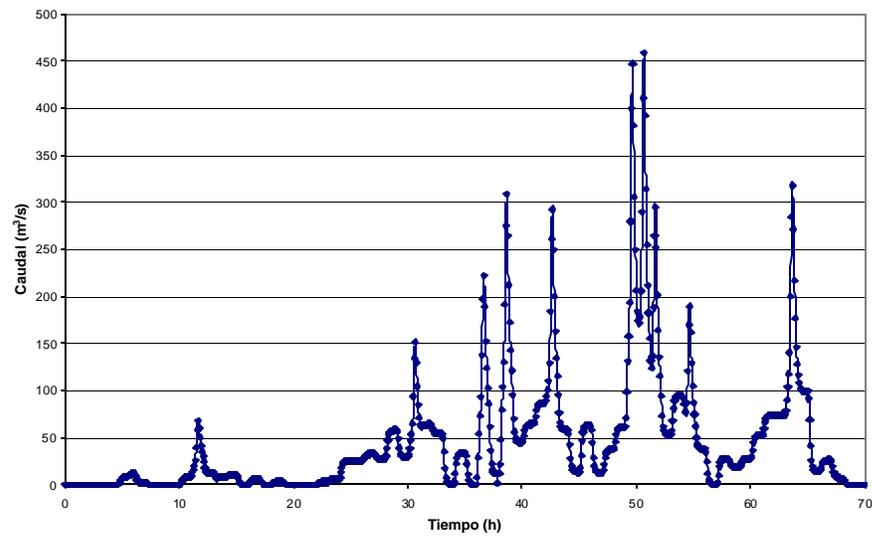


Figura 54 Hidrograma de caudales líquidos generado por el método SCS de la tormenta de diciembre de 1999.

Los valores picos de la tormenta son los siguientes:

Tabla 21 Valores pico de la tormenta de diciembre de 1999

Diciembre 99	Hora	Caudal (m ³ /s)
14	7:40 p.m.	67,73
	2:40 p.m.	151,08
15	8:40 p.m.	221,54
	10:40 p.m.	308,11
16	02:40 a.m.	292,23
	09:40 a.m.	446,72
	10:40 a.m.	458,67
	11:40 a.m.	294,95

Diciembre 99	Hora	Caudal (m ³ /s)
	2:40 p.m.	189,51
	11:40 p.m.	317,56

En la sección 4 "*Descripción de la tormenta de 1999*" se reportan olas de agua marrón, para el miércoles 15 de diciembre de 1999 fueron observadas a las 10:30 p.m., a las 11:00 p.m. y otra con mayor fuerza a las 11:30 p.m. Para el sábado 18 se reporta otra crecida a las 7:00 de la mañana; en otra descripción se dice que para el 15 a la medianoche se veían pasar los bloques de roca flotando sobre el agua, y para el 16 en la mañana se empezaron a ir las casas, quedando todo tapiado. Coincide este hecho con que es en la mañana de ese día cuando ocurren los caudales máximos de la tormenta.

La diferencia entre el tiempo de ocurrencia y de la cantidad de picos de la tormenta, se puede atribuir a muchos factores. El registro de la lluvia fue el de Maiquetía, Macuto aunque con similares características se encuentra a una distancia física, de aproximadamente 9,5 Km. Por el tipo de evento y por evidencias en el lecho del río, se han podido formar diques naturales que al retener el flujo y fallar produjeron oleadas adicionales. Los testimonios dados pueden tener algún desfase en la hora de ocurrencia de las avenidas.

El pico de la tormenta es 458,67 m³/s, valor este mayor y bastante aproximado al valor máximo de la creciente de $T_r = 500$ años ($Q = 441$ m³/s). Igualmente por comprobación se aplicó el método de la Onda Cinemática, el hidrograma resultante estuvo bastante aproximado a este, el valor máximo obtenido es 477,98 m³/s. Estos valores picos ocurrieron con una diferencia de 5 minutos.

Ambos métodos dan resultados similares, coinciden en que el valor máximo está por encima del máximo de un evento de período de retorno de 500 años.

7.2. ESTUDIO DE UNA SECCIÓN DEL RÍO

Aguas arriba de la población de Macuto, antes de llegar a la garganta del Río San José de Galipán se encuentra el tanque de HidroCapital para el almacenamiento de agua y el abastecimiento del sector. En el evento de diciembre de 1999, este tanque fue afectado quedando inutilizado y rodeado de bloques y escombros de vegetación, incluso encima de él se pueden observar rocas depositadas por los aludes (ver Figura 55).



Figura 55 Tanque de almacenamiento de agua, aguas arriba de la población de Macuto.

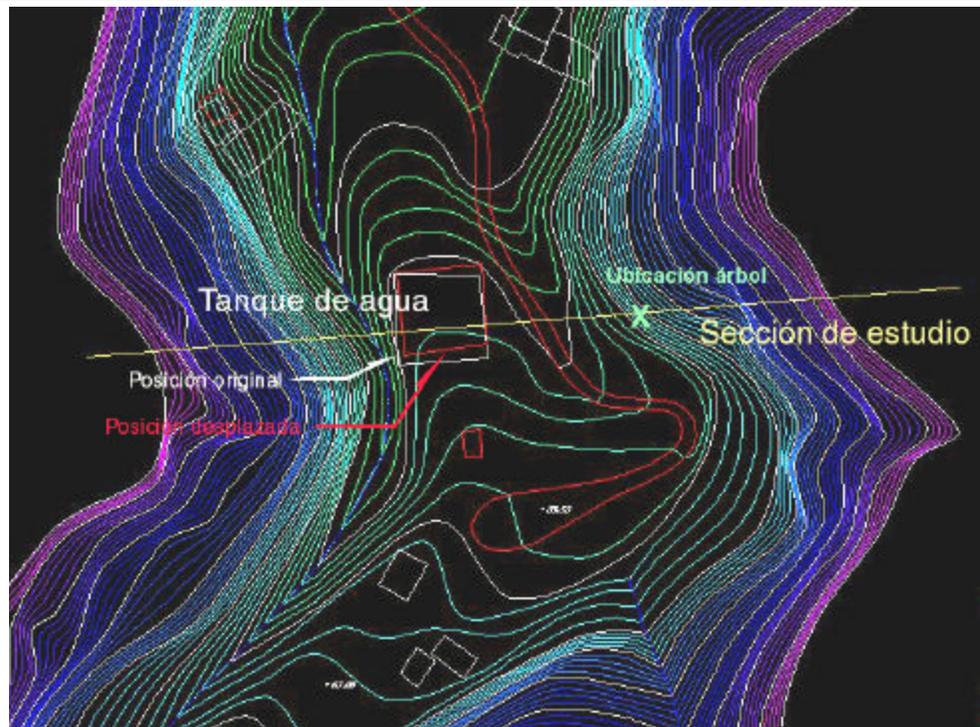


Figura 56 Sección de estudio en el año 1998.

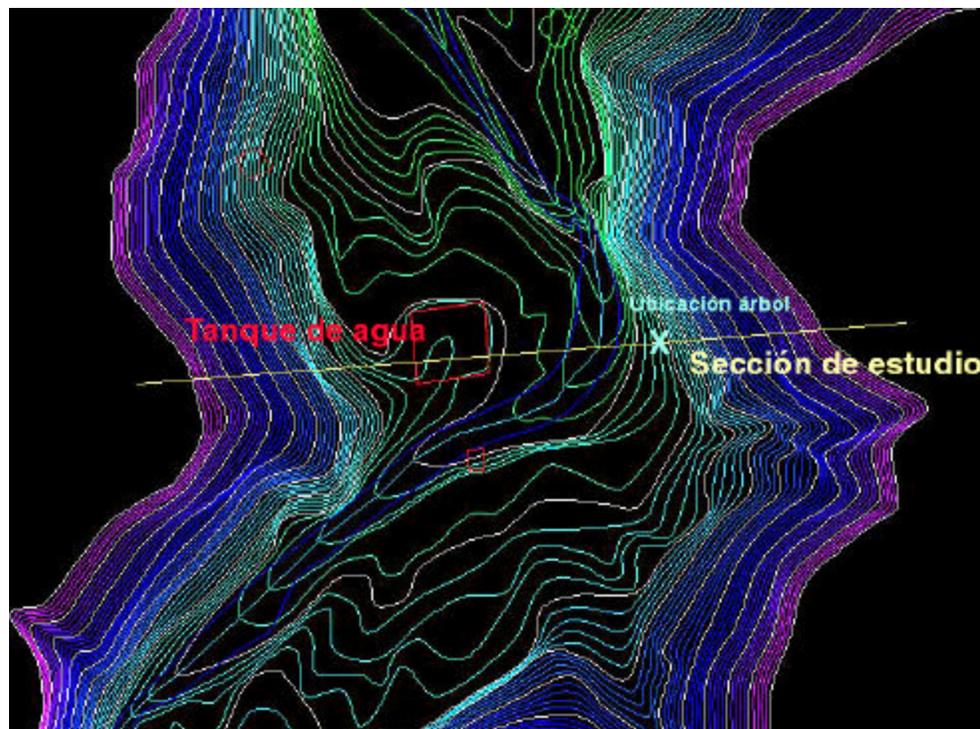


Figura 57 Sección de estudio en el año 1999-2000.

Para el estudio de la sección transversal, que está señalada en las Figuras 56 y 57, se realizaron las siguientes observaciones sobre las características del área:

- Se encuentra un árbol en la margen derecha de la sección en un alineamiento curvo del río, aproximadamente a 5 metros de la ladera. El árbol tiene la corteza dañada, se cree que por la abrasión de flujo. Junto a él se encuentran apiladas rocas dejadas por la crecida de 1999 (ver Figuras 58 y 59).
- Con la crecida del 99, este tanque se desplazó aproximadamente 3 metros desde su posición original, según la comparación de la topografía digital del año 1998 con la de enero del 2000 (ver Figuras 56 y 57).
- En la Figura 60 se muestran las secciones transversales del río de la topografía digital de 1998 y de la de 1999-2000. El ancho de la sección en la topografía del año 1998 es 81,20 metros, para la topografía 1999-2000 es 98,61 metros. Se puede advertir una diferencia de 17 metros en la posición de la ladera derecha, esta diferencia es debida a un error en los planos digitales, se constató en campo y en las fotografías aéreas que no hubo tal erosión. Se midió el ancho de esta sección en sitio, fue 92 metros, todas las medidas se efectuaron aproximadamente a 1,70 metros del techo del tanque. Ambas secciones presentan discordancia con la medida en campo.

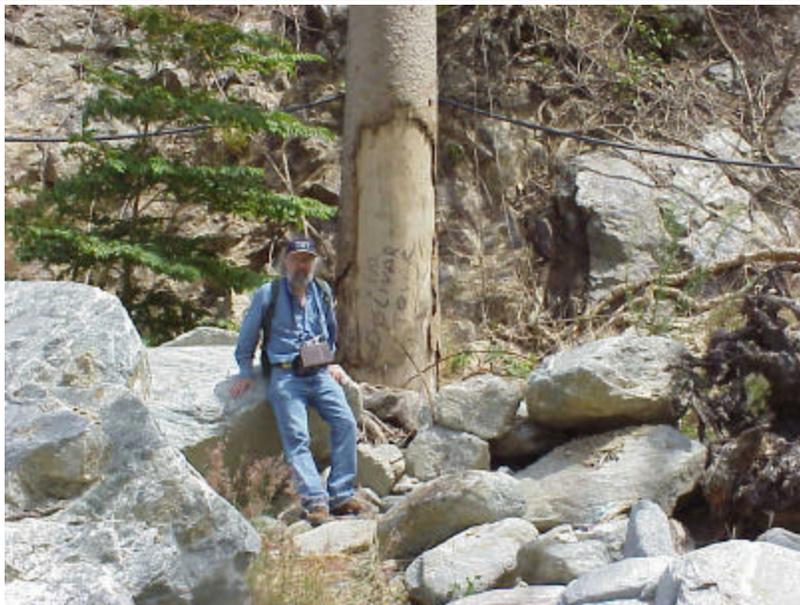


Figura 58 Árbol en la sección de estudio (febrero 2001).



Figura 59 Árbol en la sección de estudio , visto desde el tanque (noviembre 2001).

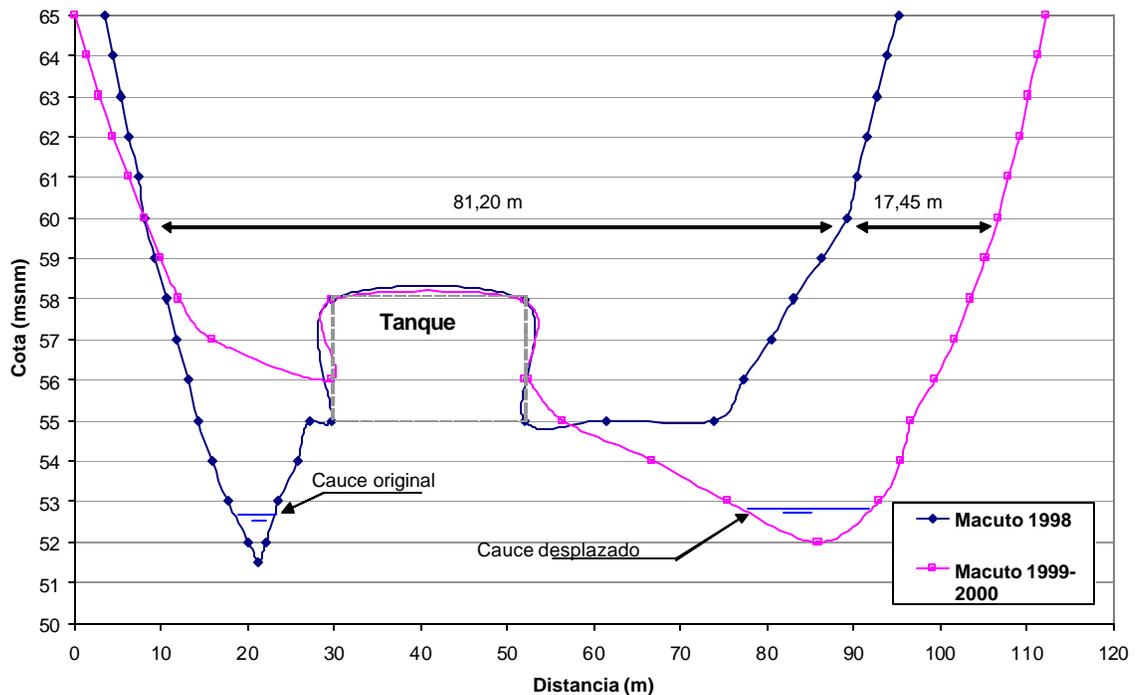


Figura 60 Secciones transversales del río en los años 1998 y 1999-2000.

Obviando estos errores, se hizo un estudio de la sección y de lo que posiblemente pudo ocurrir durante el evento.

El río originalmente se encontraba a la izquierda del tanque, mirando hacia aguas abajo. Con las avenidas del flujo el río arrastró consigo gran cantidad de sedimentos finos y gruesos y escombros. Con la deposición de material en el cauce y el aumento del caudal, el río fue sedimentado en unos 4,50 metros. Se cree que el tanque obstaculizó el flujo, remansándolo. Al aumentar la profundidad del flujo algunos bloques lograron posarse sobre el techo del tanque, tal como se ve en la Figura 55. El río se desplazó hacia la derecha del tanque, socavando el terreno unos tres metros en el nuevo trazado del cauce. El flujo debió chocar con la ladera este, donde se encuentra ubicado el árbol, depositando allí cantidad de bloques (ver Figuras 58 y 59).

Como no se conocen los cambios que ocurrieron en la sección del río, se estudió la sección original,

que corresponde al año 1998, y la sección final, del año 1999-2000.

O'Brien (2000) emplea el siguiente factor, al que llama Bulking Factor o factor de abultamiento, que relaciona el volumen líquido con el volumen total (líquido + sólido):

$$BF = 1 / (1 - Cv)$$

El valor pico del caudal líquido generado por C.G.R. Ingeniería para el hidrograma de la crecida de 500 años y el valor pico del hidrograma generado en este estudio para la tormenta de 3 días del evento de 1999, fueron 441 y 458 m³/s, respectivamente. Se aplicó el Factor de Abultamiento para dichos caudales, obteniendo los correspondientes caudales totales 678,50 y 704,62 m³/s.

7.2.1. Escenario 1

Se estudia la sección del año 1998, considerando hasta 7,50 metros de profundidad de agua. Se calculó el caudal empleando la fórmula de Manning, para rugosidades entre 0,04 y 0,09, y para la sección crítica (ver Figura 61).

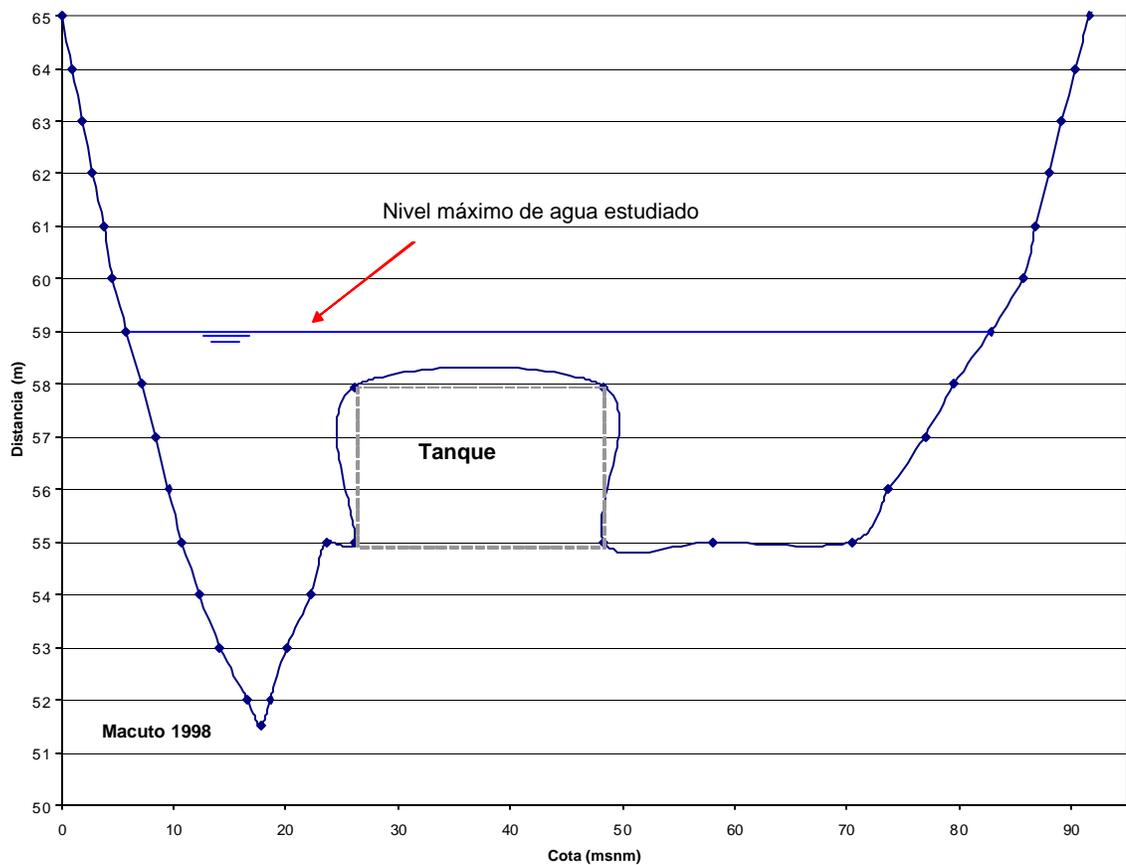


Figura 61 Sección transversal del río en la topografía digital de 1998.

Se calculó para la sección de estudio en el año 1998, para cada profundidad del flujo, el área, el perímetro mojado, el tirante de la sección y el caudal correspondiente para diferentes n de Manning. El intervalo de rugosidad estudiado está entre $n = 0,04$ y $n = 0,09$. En la Figura 62 se graficaron las curvas de caudal contra altura del flujo para cada rugosidad dada (ver en Anexo 5 los parámetros y valores de caudal calculados).

Entre los 4,50 y 6,50 metros de profundidad se encuentra la sección que permitió pasar el pico de la tormenta, se debe considerar que existe un error en el plano en cuanto a que la ladera derecha está desplazada reduciendo, en los cálculos la sección, la capacidad del río. Por tanto para esta sección y caudal total de 700 m³/s, el flujo no tuvo la capacidad de sobrepasar el tanque y de colocar las rocas sobre este.

Si el flujo llegara a un metro por encima del tanque en esta sección, el caudal estaría en el orden de los 500 a 3500 m³/s.

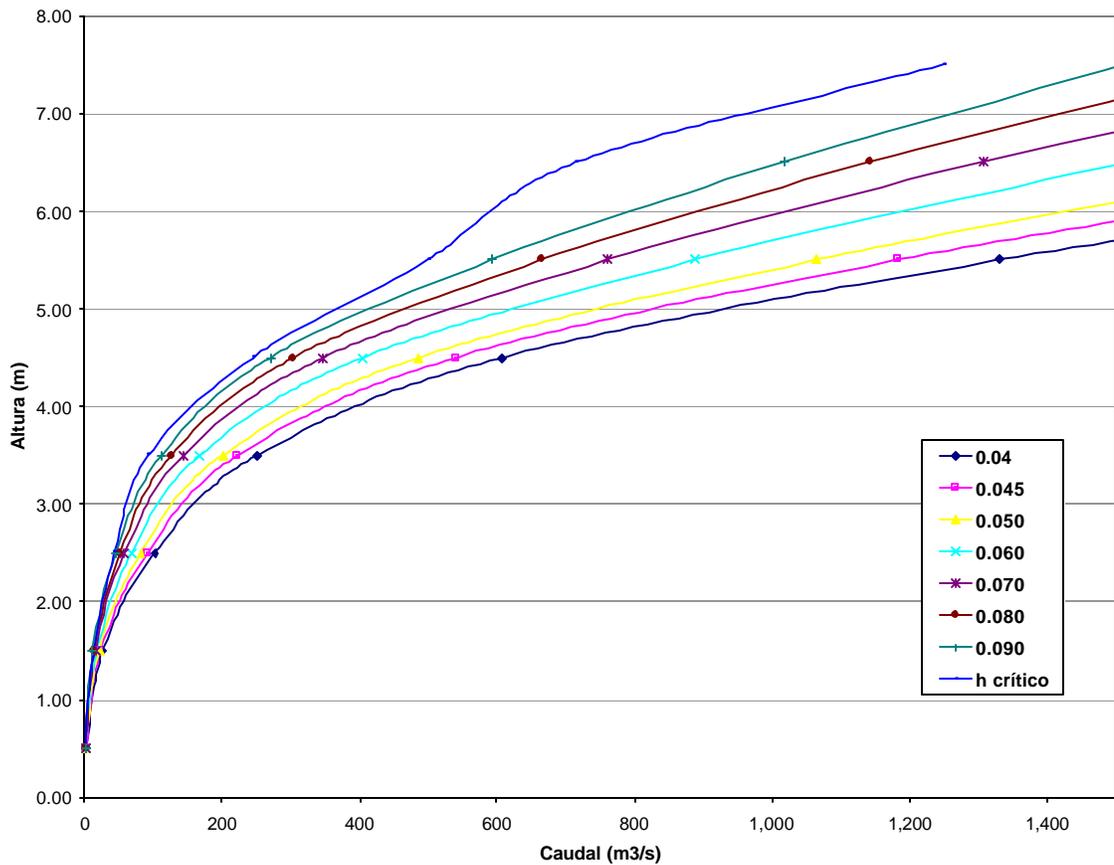


Figura 62 Caudal V. Profundidad del flujo para diferentes valores de rugosidad en la sección transversal del río en año 1998.

7.2.2. Escenario 2

Se estudió la sección del año 1999-2000, considerando hasta 7,00 metros de profundidad de agua.

Se calculó el caudal empleando la fórmula de Manning, para rugosidades entre $n = 0,04$ y $n = 0,09$ y para la sección crítica, igual que en el Escenario 1 (ver Figura 63).

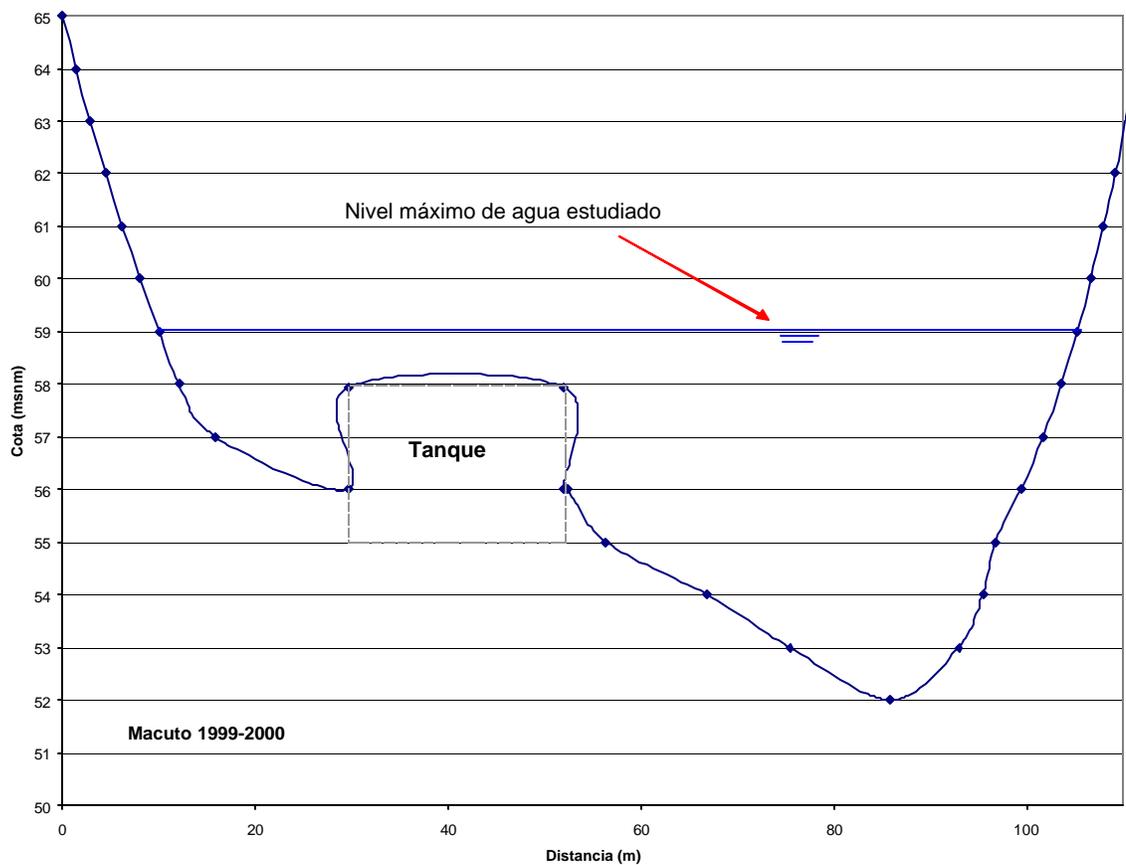


Figura 63 Sección transversal de la topografía digital de 1999-2000.

Se calculó para la sección de estudio en el año 1998, para cada profundidad del flujo, el área, el perímetro mojado, el tirante de la sección y el caudal correspondiente para diferentes n de Manning.

El intervalo de rugosidad estudiado está entre $n = 0,04$ y $n = 0,09$. En la Figura 64 se graficaron las curvas de caudal contra altura del flujo para cada rugosidad dada (ver en Anexo 5 los parámetros y valores de caudal calculados).

Entre los 4,00 y 5,00 metros de profundidad se encuentra la sección que permitió pasar el pico de la tormenta. Para esta sección y caudal total de 700 m³/s, el flujo no tuvo la capacidad de sobrepasar el tanque y de colocar las rocas sobre este.

Si el flujo llegara a un metro por encima del tanque en esta sección, el caudal estaría en el orden de los 2000 a 4000 m³/s.

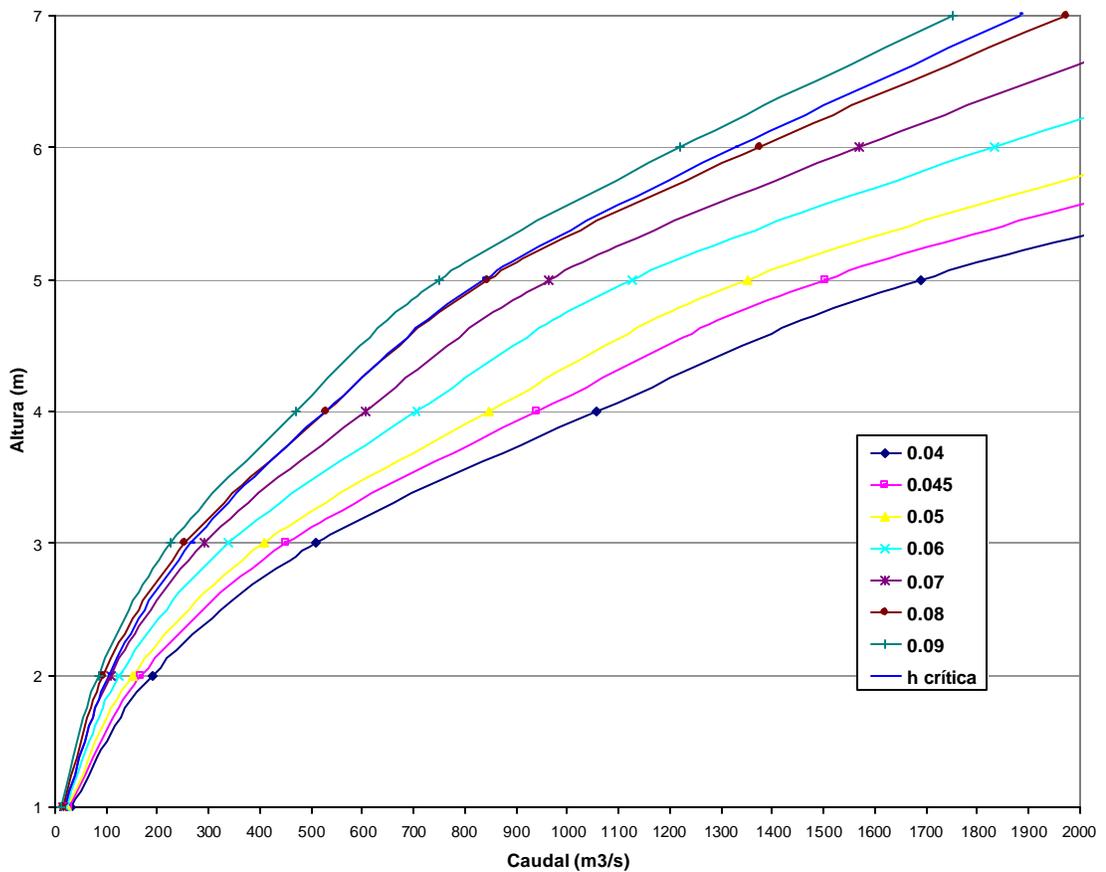


Figura 64 Caudal V. Profundidad del flujo para diferentes valores de rugosidad en la sección transversal del río en año 1999-2000.

7.2.3. Análisis de los resultados

El caudal máximo que pasó por esta sección, tanto la del año 1998 como la de 1999-2000, no pudo superar la altura del tanque. Se cree que fue un estado intermedio de la sección cuando el tanque estuvo sumergido por el flujo y quedaron sobre él las rocas.

En ambos casos las velocidades calculadas para caudales aproximados a 700 m³/s, estuvieron en el orden de los 5 m/s y los números de Froude fueron superiores a 1, es decir, el flujo que pasó por la sección fue supercrítico.

El árbol al que se hace referencia en las observaciones al principio de esta sección se cree fue afectado y alcanzado por una sobre elevación del flujo. Esta sobre elevación pudo ser causada por el impacto de la corriente en la margen derecha.

No se identificó ningún punto de control, ni se encontró una relación satisfactoria entre profundidad del flujo y caudal, donde el tanque de agua estuviese sumergido por el flujo y el caudal fuese igual al estimado como el pico de la creciente. Se estudiara el evento de 1999 basándose en los resultados hidrológicos generados en este estudio y por C.G.R. Ingeniería (2000).

7.3. SIMULACIÓN CON EL FLO2D Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para el modelaje de la tormenta de diciembre del 99 con el FLO2D se usó la topografía digital más reciente de antes del evento de diciembre de 1999, la que se ha llamado en este trabajo *antes diciembre 99*. Sobre esta se representó una malla de 674 celdas uniformes de 25 metros por 25 metros de lado, definiendo así el área de estudio. Esta incluyó el cono de deyección del río y se extendió lateralmente hacia el oeste y hacia el este (ver Figura 65).

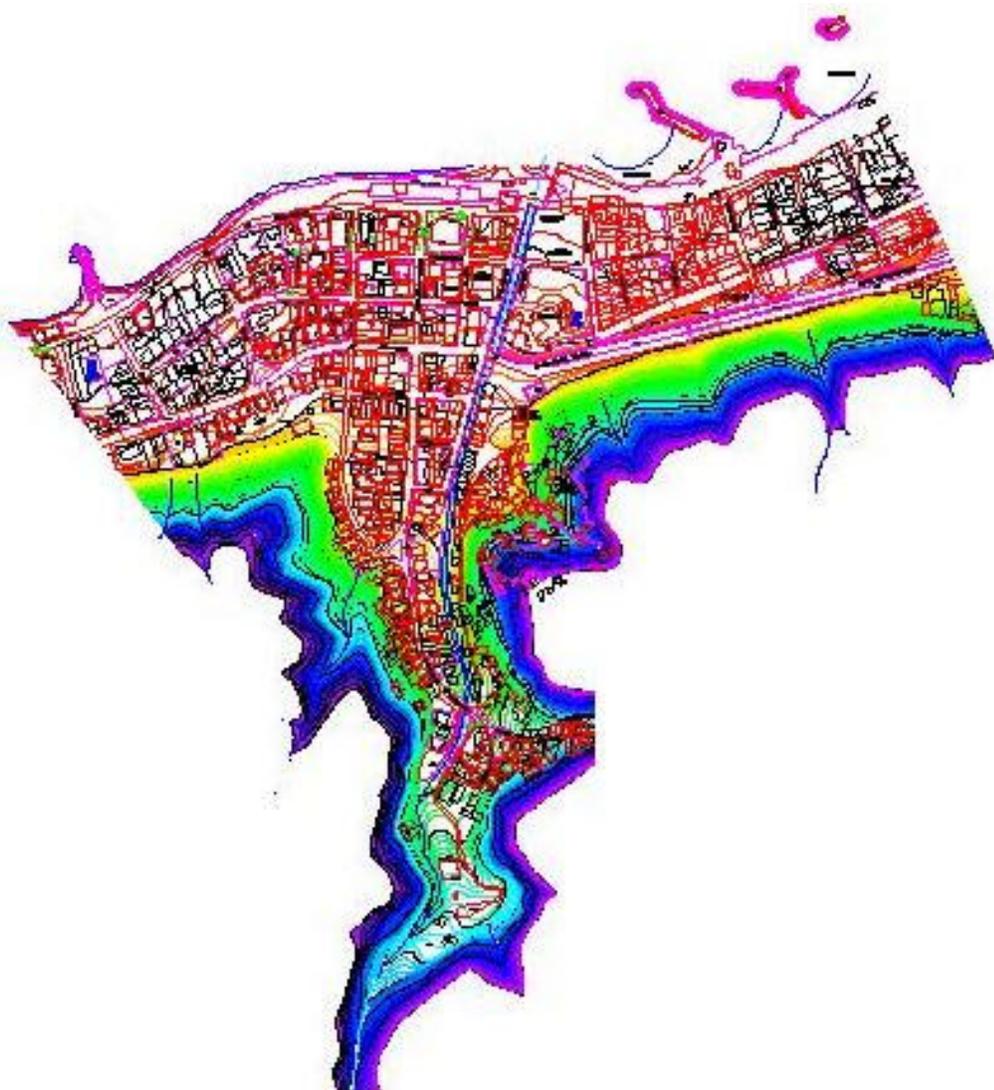


Figura 65 Topografía Digital antes diciembre 1999 en el área de la población de Macuto.

En el área de estudio, el cauce del río fue dividido en dos tramos. El primer tramo, hacia aguas abajo,

es natural de sección es trapezoidal de 1 metro de ancho base, las pendientes de los taludes de las márgenes izquierda y derecha son 1:1,06 y 1:1,21, respectivamente; las profundidades van desde 2,00 a 5,50 metros. El segundo tramo está canalizado en concreto, la sección es rectangular, de ancho 9,40 metros y alturas desde 2,00 a 6,00 metros. Estas medidas fueron verificadas en el sitio (ver Figura 66).

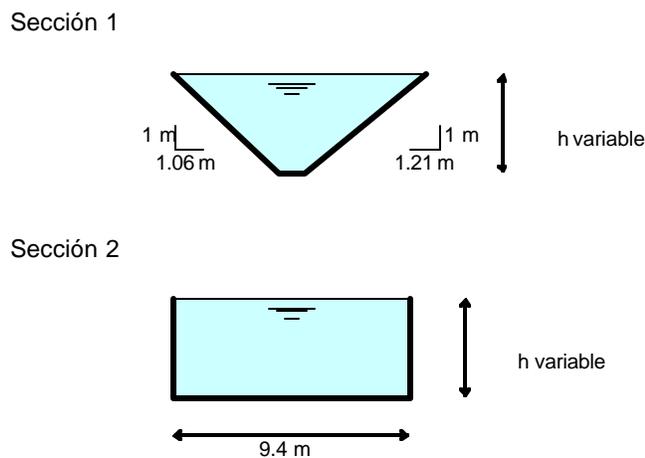


Figura 66 Río San José de Galipán. Secciones de estudio del cauce.

El perfil del río en el área de modelaje se representó en la Figura 67, se muestra como cota F_{plain} definitiva la cota del terreno y como Cota de fondo la del lecho del canal. Se modelaron 5 puentes o pasos sobre el río. Se usó un factor de 30 % como obstrucción máxima y como reducción de área, para modelar el efecto producido por las edificaciones.

Para la concentración volumétrica de sedimentos máxima se probó con valores entre 20 y 40 %. Luego de analizar los resultados obtenidos, se consideró como resultado más adecuado 35 %. La rugosidad (n de Manning) empleada en el terreno fue de 0,065 con algunas variaciones puntuales. En el canal se uso $n = 0,062$ y $n = 0,060$.

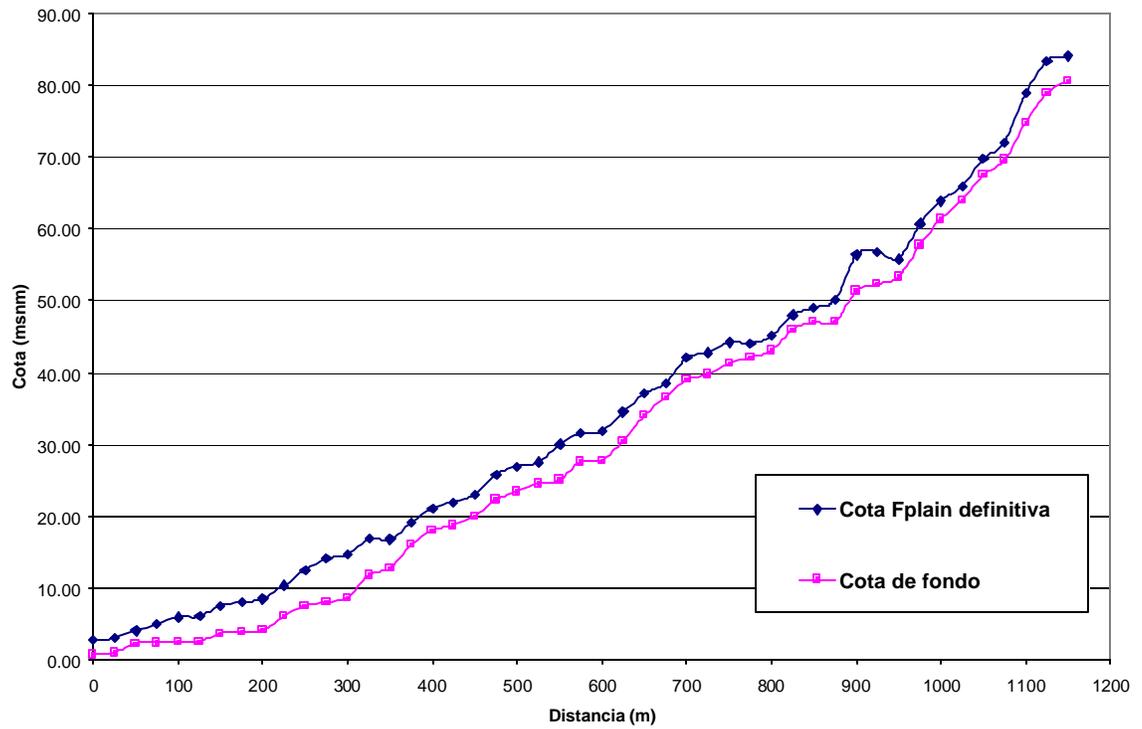


Figura 67 Perfil longitudinal en el área de estudio del Río San José de Galipán (año 1998). Se observa la superficie del terreno usada y el fondo del canal.

7.3.1. ESCENARIO 1

Se emplea el hidrograma generado con el método del Soil Conservation Services para la cuenca del Río San José de Galipán. El hidrograma tiene duración de 70 horas, el inicio de este vendría a ser equivalente a las 8:00 de la mañana del día 15 de diciembre de 1999. Para la concentración volumétrica máxima de sedimentos se probó inicialmente con valores en el intervalo entre 20 y 40 %. Luego de analizar los resultados, el valor que se adecuó más al tipo de evento fue 35 % ya que la extensión de la mancha de inundación y las profundidades del flujo fueron similares a las ocurridas en diciembre de 1999 (ver Figura 68).

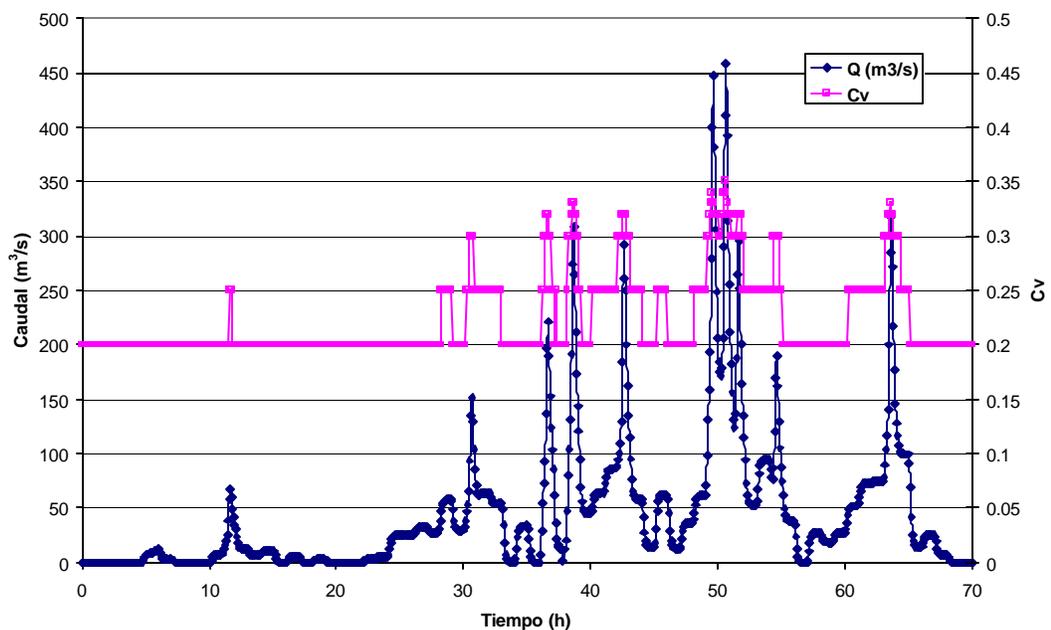


Figura 68 Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos para la tormenta de 3 días de duración de diciembre del 99.

Se estudiaron dos casos, uno con canal y todos los elementos de estudio y otro suponiendo el canal colmatado de sedimentos y sin puentes, donde el flujo escurre por la planicie de inundación.

Como el hidrograma de caudal líquido y la distribución de la concentración volumétrica de

sedimentos era la misma en ambos casos, los resultados obtenidos de volumen de agua y de sedimentos son los siguientes:

- El volumen total de agua en el hidrograma de entrada es 10,13 millones de m³.
- El volumen total de agua más sedimentos 13,91 millones de m³.
- El volumen total de sedimentos es 3,78 millones de m³.

Para el escenario con canal y todos los elementos de estudio, las áreas inundadas son las siguientes:

- El área total inundada es 19,20 ha.
- El área de canal inundada es 1,11 ha.
- El área de planicie inundada es 18,10 ha.

Para el escenario con canal colmatado de sedimentos y sin puentes, el área total inundada o área de la planicie de inundación es 19,11 ha. Para el escenario con canal la profundidad máxima en el canal fue 10 metros justo aguas arriba del puente de la Av. Intercomunal de Macuto y del puente que estaba al inicio de la Av. Isabel La Católica, la profundidad máxima predominante estuvo alrededor de los 8 metros. En la planicie de inundación la profundidad máxima fue 6,24 metros y disminuye a medida que se aleja del cauce, la velocidad máxima registrada fue 8,34 m/s, predominando las velocidades en torno a los 6 m/s en el canal, disminuye a medida que se aleja de él (ver Figuras 69 y 70). Para el escenario con canal colmatado de sedimentos y sin puentes, la profundidad máxima fue de 5,70 metros y la velocidad máxima 7,73 m/s, estas estaban ubicadas en el área aguas arriba de la población de Macuto donde estaría el canal. En el cono de deyección el área afectada está comprendida entre la Casa La Guzmania, la Avenida Isabel la Católica y la Calle España (ver Figuras 71 y 72).

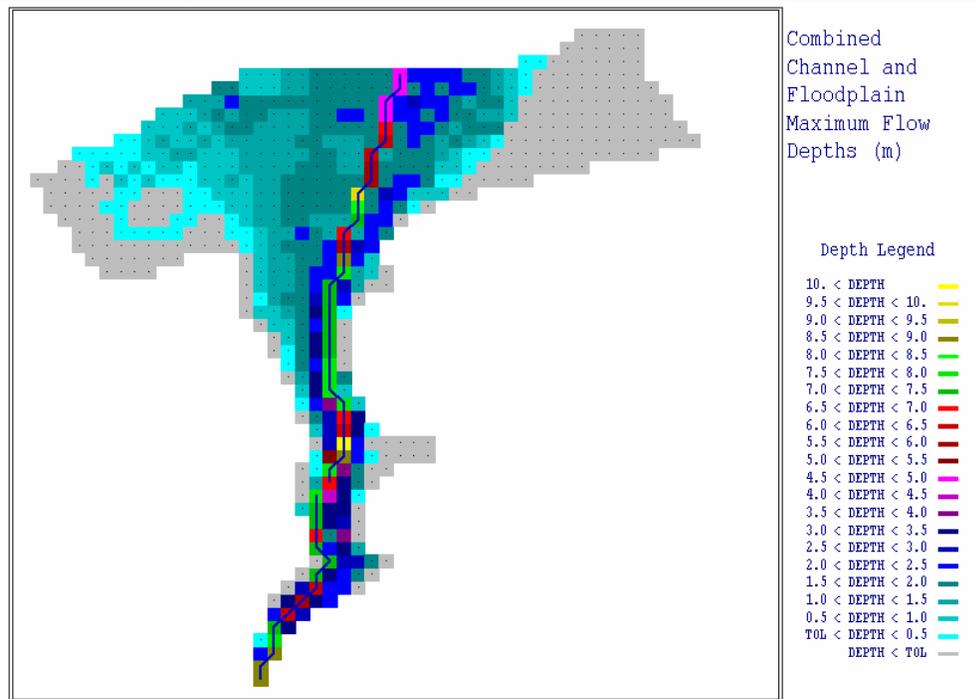


Figura 69 Escenario 1. Canal. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la crecida de 1999.

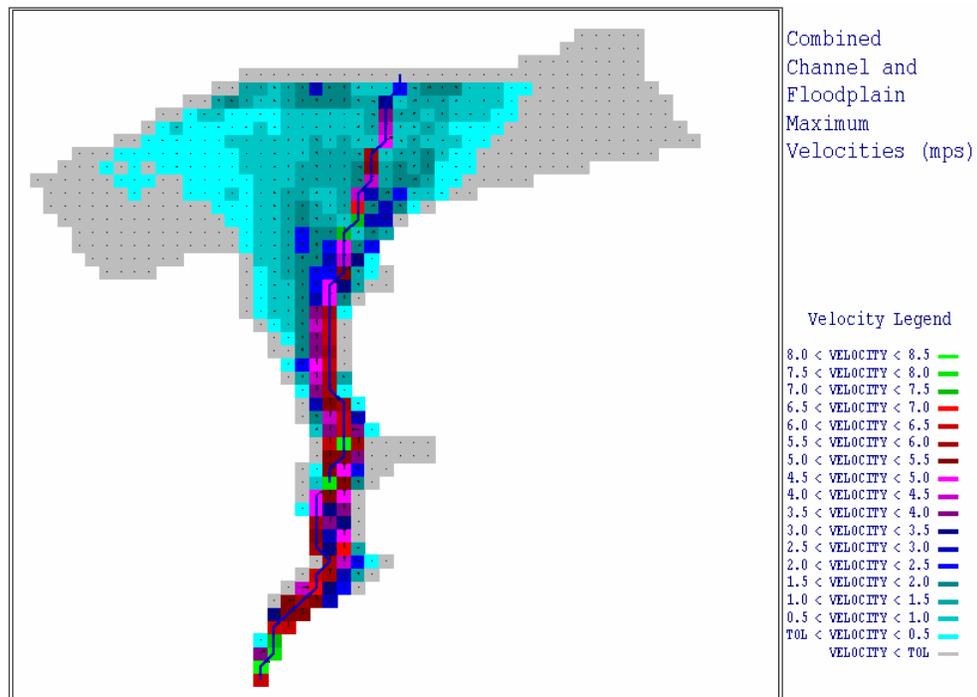


Figura 70 Escenario 1. Canal. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la crecida de 1999.

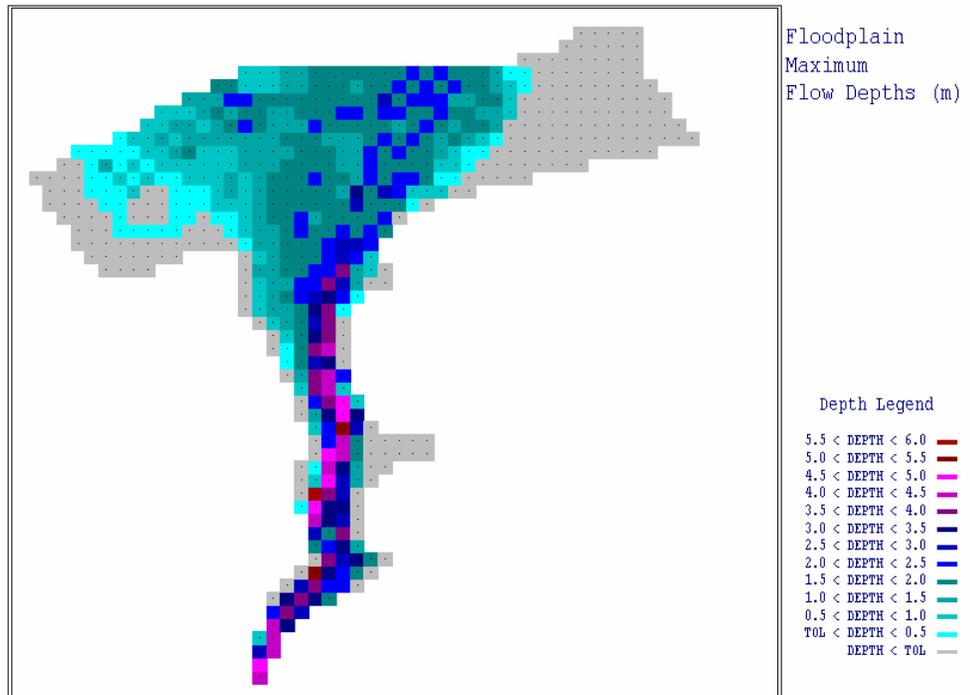


Figura 71 Escenario 1. Canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.

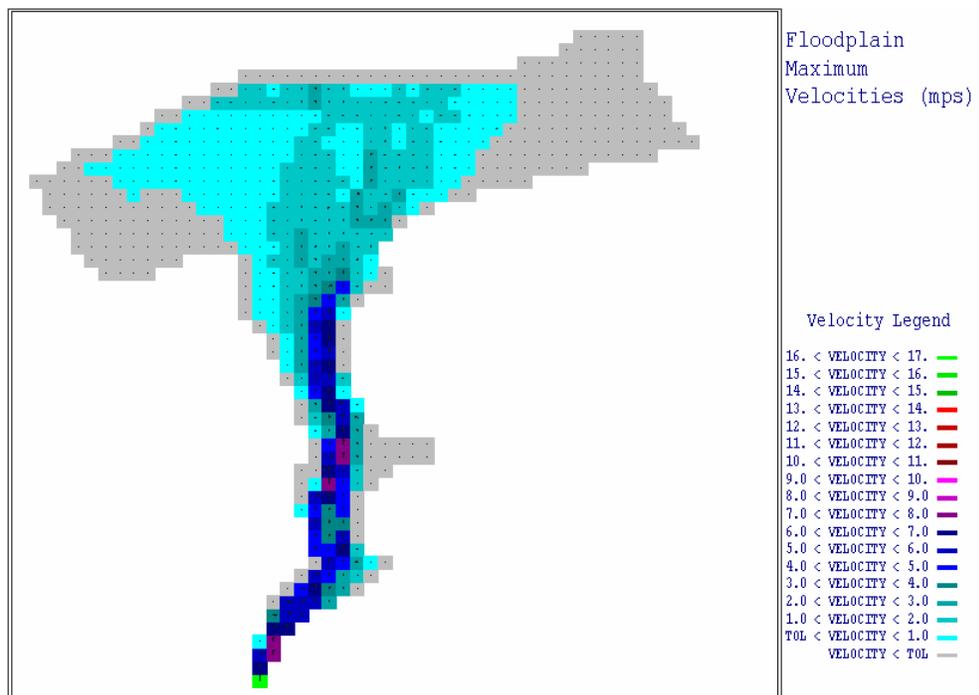


Figura 72 Escenario 1. Canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.

7.3.2. ESCENARIO 2

El hidrograma usado fue generado por C.G.R. Ingeniería, y corresponde a una creciente de período de retorno 500 años, ya que el valor pico obtenido en el hidrograma que se empleó en el Escenario 1 estuvo más próximo al valor pico correspondiente a ese evento. La concentración volumétrica máxima de sedimentos usada fue 35 %.

Se estudiaron a su vez dos casos, uno con canal y todos los elementos de estudio y otro suponiendo el canal colmatado de sedimentos y sin puentes, donde el flujo escurre por la superficie del terreno. Las mayores velocidades y profundidades se presentan en el modelo con canal, justamente en el canal. En ese caso, la profundidad promedio del canal está entre los 5 y los 7 metros, la máxima profundidad es de 10 metros y las velocidades máximas varían entre 4 y 8,5 m/s (ver Figuras 73 y 74).

En el caso de canal colmatado la extensión de la mancha de inundación, las profundidades máximas y las velocidades máximas resultantes son bastante similares a las del caso anterior (ver Figuras 75 y 76).

De los resultados obtenidos en el modelo se tiene para el caso del modelaje con canal:

- Área de inundación: 19,28 ha.
- El área de canal inundada es 1,11 ha.
- El área de planicie inundada es 18,18 ha
- El volumen total de agua en el hidrograma de entrada es 3 millones de m³.
- El volumen total de agua más sedimentos 4,3 millones de m³.
- El volumen total de sedimentos es 1,3 millones de m³.

De los resultados obtenidos en el modelo se tiene para el caso del modelaje con canal:

- Área de inundación: 19,28 ha.
- El volumen total de agua en el hidrograma de entrada es 3 millones de m³.
- El volumen total de agua más sedimentos 4,3 millones de m³.
- El volumen total de sedimentos es 1,3 millones de m³.

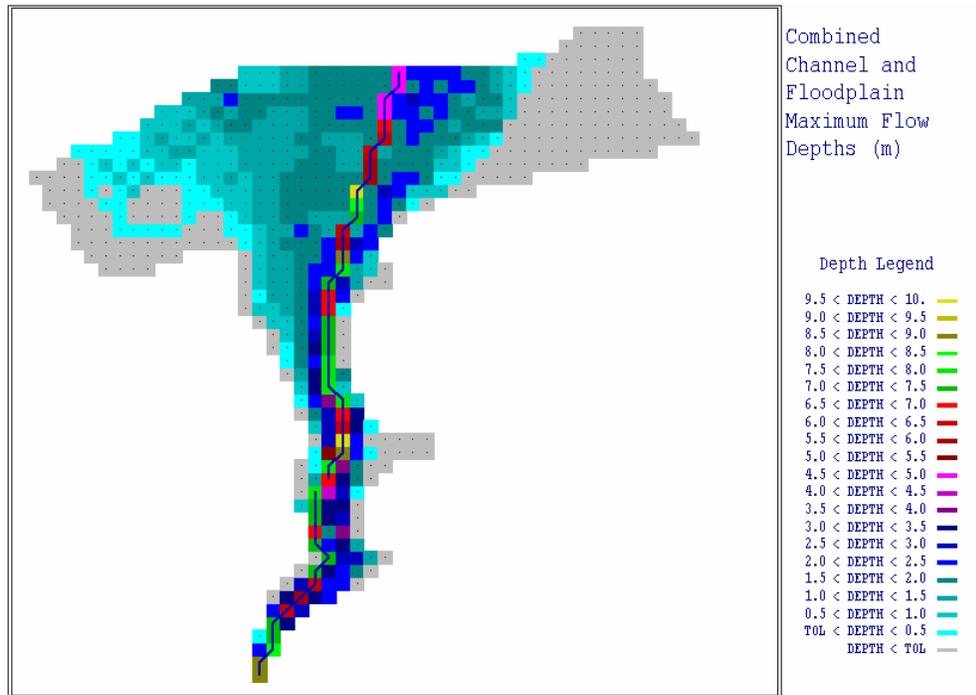


Figura 73 Escenario 2. Canal. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.

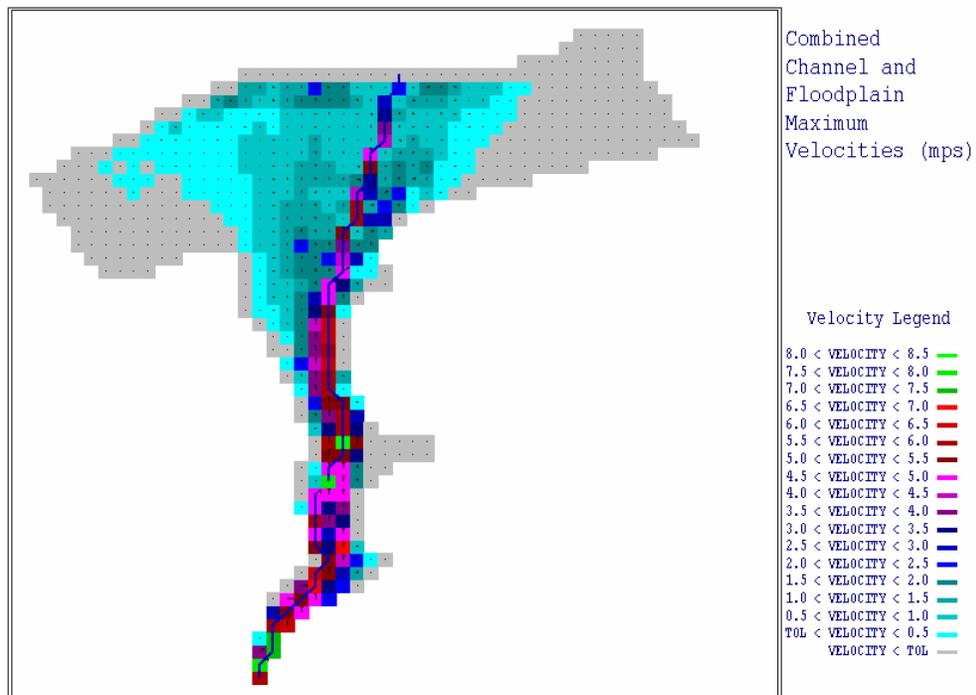


Figura 74 Escenario 2. Canal. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la creciente de 1999.

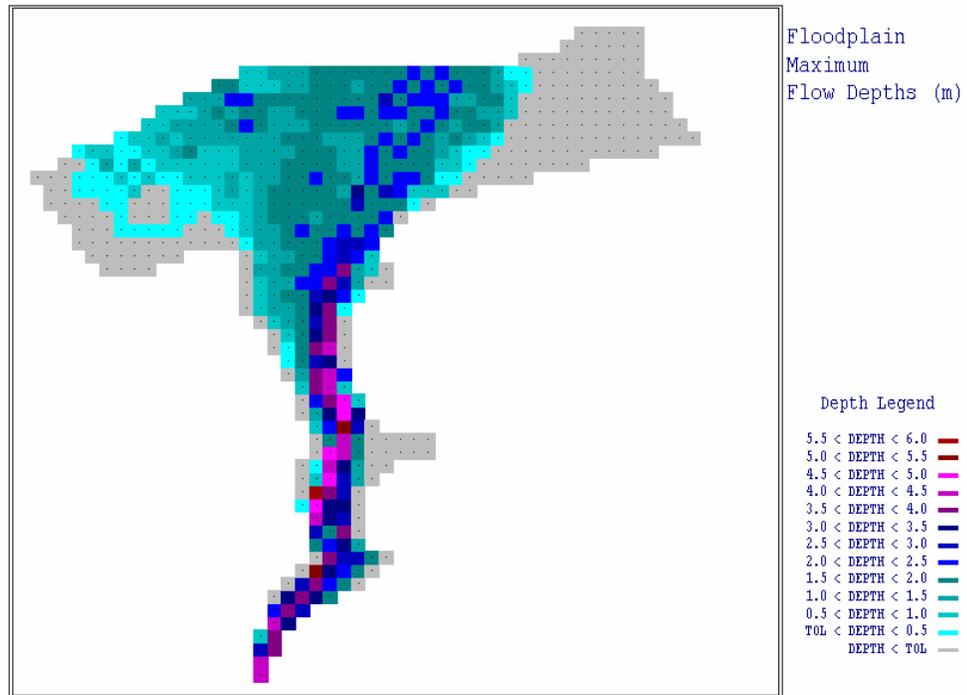


Figura 75 Escenario 2. Canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la crecida de 1999.

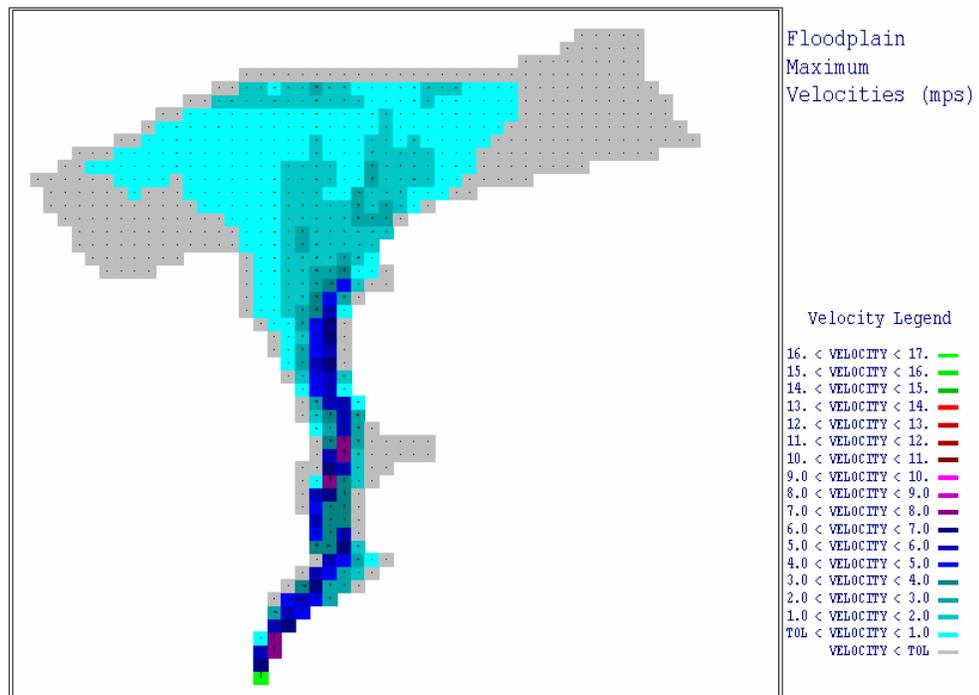


Figura 76 Escenario 2. Canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo en el Río San José de Galipán para la crecida de 1999.

7.3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La tendencia de ambos escenarios es a que el flujo sea más profundo en el área de la canalización y a inundar el área conocida como el Parque de las Palomas y la Casa La Guzmania, además al desbordarse el río el flujo toma como canal alternativo la calle Isabel La Católica, produciendo profundidades de flujo que afectan los alrededores y más allá de la Calle España.

Las mayores velocidades y profundidades se presentan en el modelo con canal, justamente en el canal, aunque en general las profundidades y velocidades máximas para la planicie de inundación fueron bastante aproximadas en ambos casos.

La extensión de la mancha de inundación fue igual en ambos escenarios.

Comparando con las fotografías aéreas del evento de diciembre del 99 y con el Mapa de JICA, las máximas profundidades correspondieron a los sitios con mayor depósito de sedimentos, siendo las profundidades máximas reportadas de hasta 5 metros.

De los resultados obtenidos del modelaje se puede catalogar, según la clasificación que hacen Cruden y Varnes en función de la velocidad de movimientos de masas, como un evento de clase 7 el ocurrido en Vargas en diciembre de 1999.

En el Escenario 1 se empleó la lluvia de tres días de duración de la tormenta de Diciembre de 1999, en el Escenario 2 se simuló la tormenta de diseño de $T_r = 500$ años, fue esta la diferencia entre los dos escenarios. Comparando los resultados de ambos escenarios se puede observar que fueron bastante aproximados. Por tanto para simular la mancha de inundación, así como para obtener las máximas profundidades y velocidades lo importante es modelar el hidrograma de la creciente con el valor máximo de la tormenta.

8. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE BARROS GENERADO POR LAS TORMENTAS DE DISEÑO

Para la simulación de las tormentas de diseño se utilizó el mapa topográfico de septiembre del 2000, a fin de tomar en cuenta los cambios naturales ocurridos y los movimientos de tierra hechos por el hombre (ver Figura 77). No fue considerado el dique toma construido aguas arriba de la población, porque se considera que el efecto de retención del flujo para las crecidas no es importante, además este está ubicado aguas arriba del área de estudio.

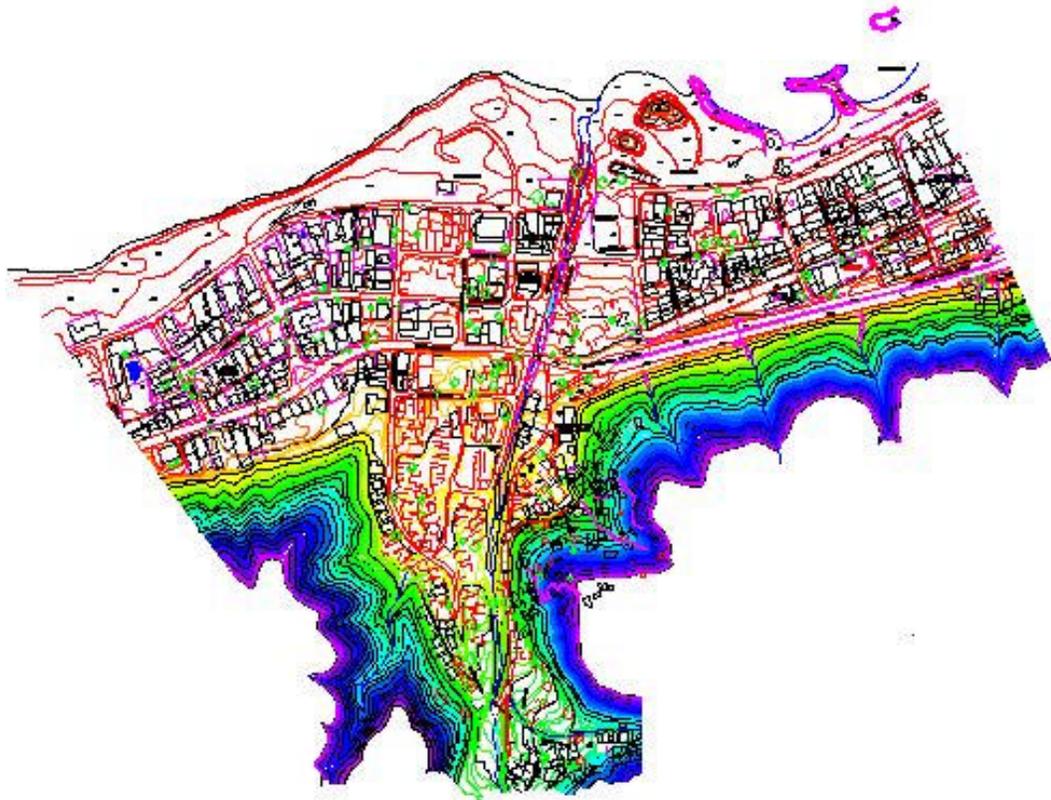


Figura 77 Topografía Digital de Septiembre del 2000 en el abanico fluvial del Río San José de Galipán.

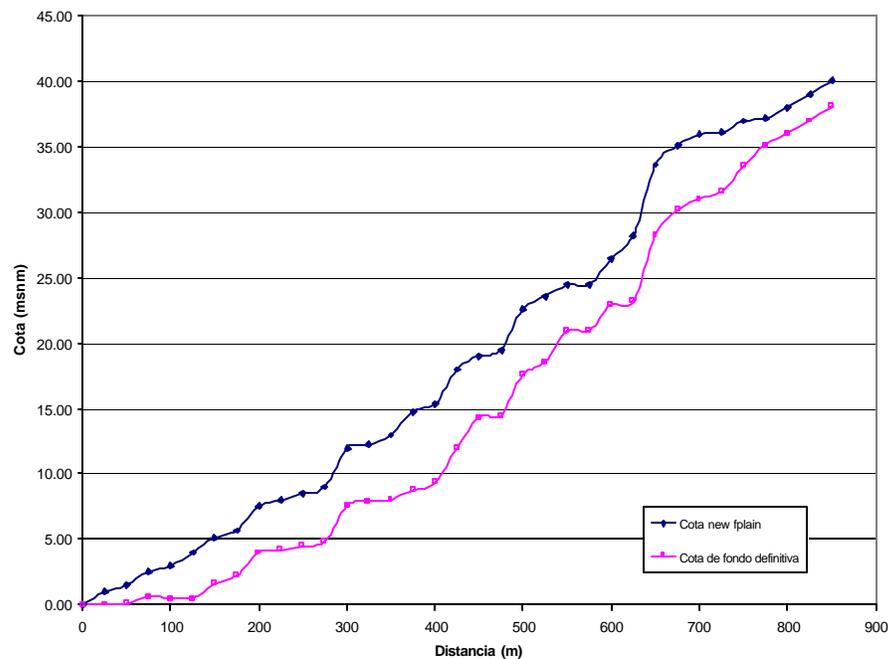


Figura 78 Sitio de estudio Macuto. Perfil longitudinal del Río San José De Galipán (Septiembre 2000). Se observa la superficie del terreno usada y el fondo del canal.

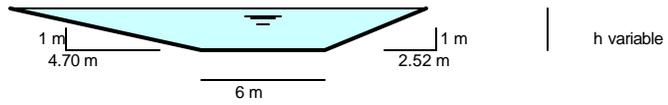
Las características principales del modelo son las siguientes:

- La malla de cálculo ha sido definida por 751 celdas cuadradas de 25 metros de ancho.
- La rugosidad del terreno (n de Manning) es 0,065, salvo ciertas variaciones puntuales.
- La rugosidad del río en su tramo natural es de 0,062 y 0,060, en el tramo canalizado va desde 0,030 a valores hasta de 0,088.
- Se modelaron dos puentes, uno en Av. La Playa y otro en la Av. Intercomunal de Macuto.
- El mayor porcentaje de obstrucción y porcentaje de reducción de área empleado para modelar las edificaciones fue de 30 %.
- Se modeló el canal en 4 tramos. El primero de ellos desde aguas arriba hacia aguas abajo el cauce es natural, tiene sección trapecial con 6 metros de ancho base, 2 metros de profundidad, la pendiente de la margen izquierda es 1:4,70 y de la margen derecha es

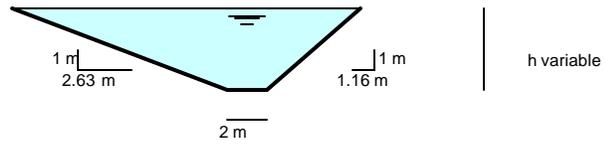
1:2,52. El segundo tramo también es un cauce natural, la sección es trapezoidal, con 2 metros de ancho en la base, con profundidades que van desde 3,50 a 5,37 metros, 1:2,63 y 1:1,16 son las pendientes izquierda y derecha, respectivamente. En el tercer tramo comienza la canalización del río en concreto, la sección es rectangular de 9,40 metros de ancho, al final aumenta a 11,00 metros, profundidades que van desde los 3,50 a 6,00 metros. En el cuarto tramo continúa la canalización aumentando el ancho hasta 20 metros, la profundidad disminuye desde los 3,50 metros hasta el nivel del mar (ver Figura 79)

- Se modelaron 22 calles, algunas de ellas cruzan el cauce del río, no se consideraron aquellas que estaban pegadas al canal, ni los tramos de calle que estaban en los límites del área estudiada. Se especificó para cada calle o avenida el ancho, la dirección y la cota. Se tomó como altura de la acera 20 cm para todas las calles.
- El volumen o capacidad total de almacenamiento del canal es 38.579,29 m³.

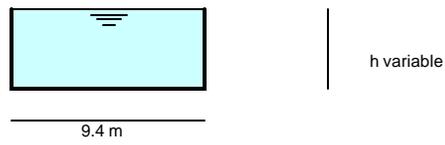
Sección 1



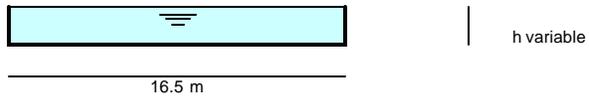
Sección 2



Sección 3



Sección 4



Sección 5

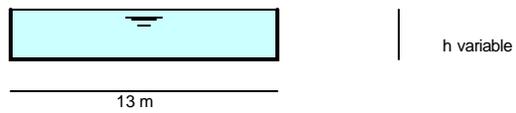


Figura 79 Río San José de Galipán. Secciones de estudio del cauce.

8.1. ESCENARIO 1

Se utilizó el hidrograma correspondiente a la creciente de $T_r = 10$ años, se modelaron el canal, los puentes, las edificaciones y las calles. Para la concentración volumétrica máxima de sedimentos se probó con valores entre 10 y 50 %. Luego de analizar los resultados obtenidos, se consideró como resultado más adecuado 20 %, como valor constante en todo el hidrograma de sedimentos (ver Figura 80).

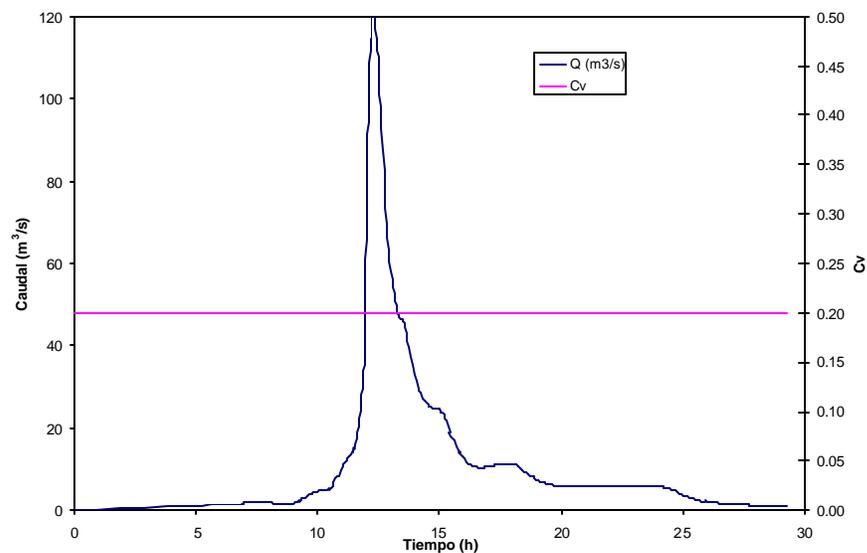


Figura 80. Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos ($T_r = 10$ años) del Río San José de Galipán

Los resultados de volumen de agua y de sedimentos obtenidos para este escenario, son los siguientes:

- Volumen de agua: 1.069.463,36 m³
- Volumen de agua más sedimentos: 1.336.829,21 m³
- Volumen de sedimentos: 267.365,85 m³

Se cuantificó el volumen del canal y se comparó con el volumen de sedimentos transportados por la

corriente.

- 15 % del Volumen de sedimentos :40.104,88 m³
- Volumen del Canal menos 15 % del Volumen de sedimentos: -1.525,9 m³

En la comparación del volumen del río en el área de estudio, con el 15 % del volumen de sedimentos generados en cada creciente, el volumen del río fue menor a la cantidad de sedimentos. Se consideró entonces la simulación del canal colmatado de sedimentos sin puentes, conservando las demás características de la cuenca.

La mancha de inundación obtenida para el caso de canal colmatado de sedimentos de este escenario resultó ser tan extensa como la que se obtuvo para 500 años que es mostrada más adelante en el *Escenario 3*, por lo que no se consideró como un resultado real. En consecuencia, se decidió no tomar en cuenta este escenario en la elaboración del mapa de amenazas.

Para el modelo con canal, el área inundada del canal es 1,28 ha, de terreno inundado 10,32 ha, y total 11,57 ha.

Las profundidades máximas de agua en el canal fueron de 2,0 a 8,62 m, la profundidad máxima en la planicie de inundación 3,91 m. Las velocidades máximas en el canal entre estuvieron entre 2,30 a 15,20 m/s, la velocidad máxima en la planicie fue 4,67 m/s (ver Figura 81 y 82).

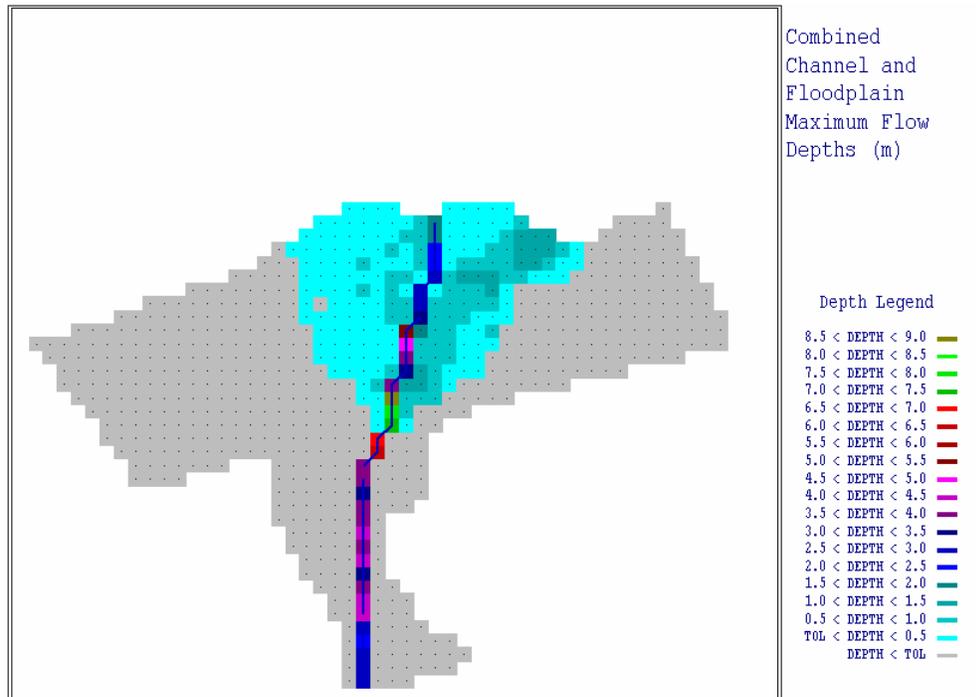


Figura 81 Escenario 1. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 10 años).

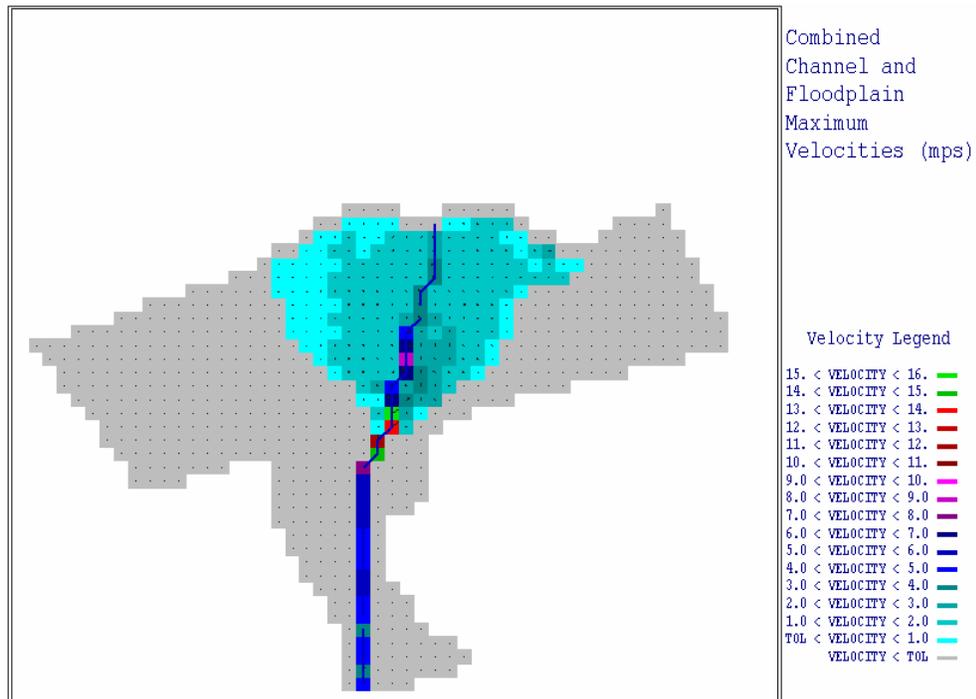


Figura 82 Escenario 1. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 10 años).

8.2. ESCENARIO 2

Para el Escenario 2 se usó el hidrograma de caudal líquido correspondiente a la creciente de $T_r = 100$ años. Se modelaron el canal, los puentes, las edificaciones y las calles. Se trabajó con concentraciones volumétricas de sedimentos máximas entre 20 y 50 %. Las pruebas indicaron que el valor de 24 % dio los resultados más adecuados (ver Figura 83).

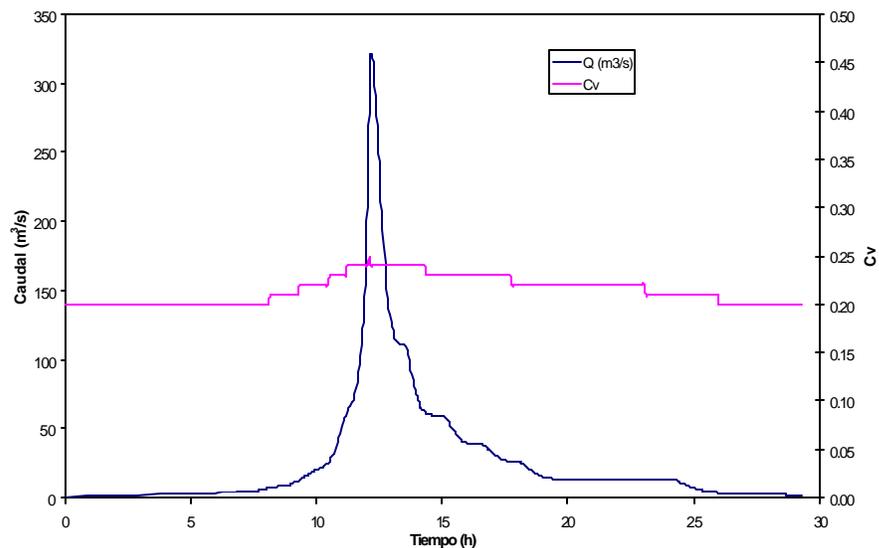


Figura 83 Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos ($T_r = 100$ años) del Río San José de Galipán.

Los resultados de volúmenes obtenidos para este escenario son los siguientes:

- Volumen de agua: 2.535.929,45 m³.
- Volumen de agua más sedimentos: 3.313.354,45 m³.
- Volumen de sedimentos: 777.425,00 m³.

Se cuantificó el volumen del canal y se comparó con el volumen de sedimentos transportado por la corriente.

- 15 % del Volumen de sedimentos: 116.613,75 m³

- Volumen del Canal menos 15 % del Volumen de sedimentos: -78.034,46 m³

Según la comparación realizada con el porcentaje de sedimentos producidos, se estudió además el escenario de $T_r = 100$ años con canal colmatado de sedimentos. Sin embargo, en este caso también la mancha de inundación obtenida resultó bastante extensa y muy aproximada a la mancha que causa el escenario de $T_r = 500$ años, por lo que se decidió descartar la simulación con canal colmatado.

Para el escenario con canal, el área inundada del canal es de 1,39 ha, el área de terreno inundado 18,52 ha, y el área total 19,90 ha.

Las profundidades máximas de agua en el canal de 2,0 a 8,32 m y la profundidad máxima en el terreno fue 3,30 m. Las velocidades máximas en el canal estuvieron entre 2,24 a 14,88 m/s y la velocidad máxima en el terreno 5,84 m/s (ver Figuras 84 y 85).

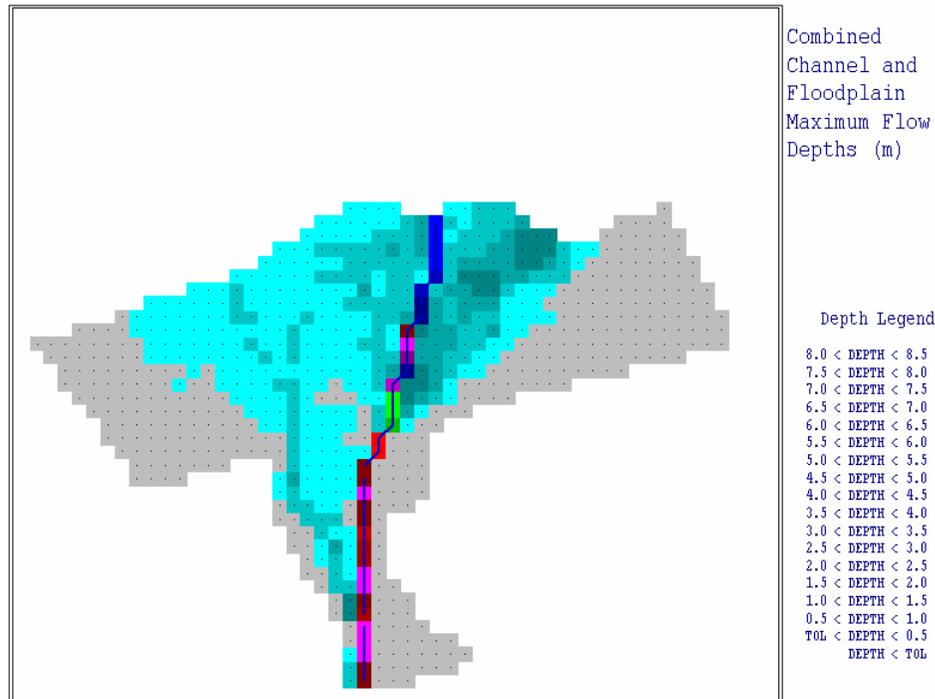


Figura 84 Escenario 2. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 100 años).

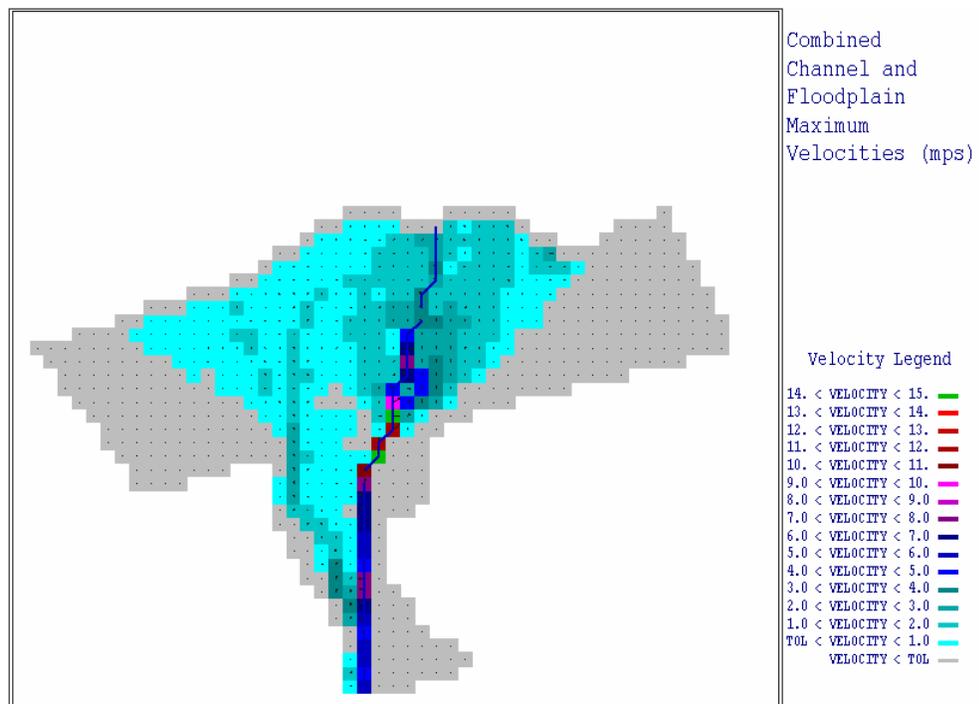


Figura 85 Escenario 2. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 100 años).

8.3. ESCENARIO 3

Para el Escenario 3 se usó el hidrograma de caudal líquido correspondiente a la crecida de $T_r = 500$ años. Se modelaron el canal, los puentes, las edificaciones y las calles. Para la concentración volumétrica máxima de sedimentos se probó inicialmente con valores en el intervalo entre 20 y 40 %. Luego de analizar los resultados, el valor más adecuado fue 35 % (ver Figura 86).

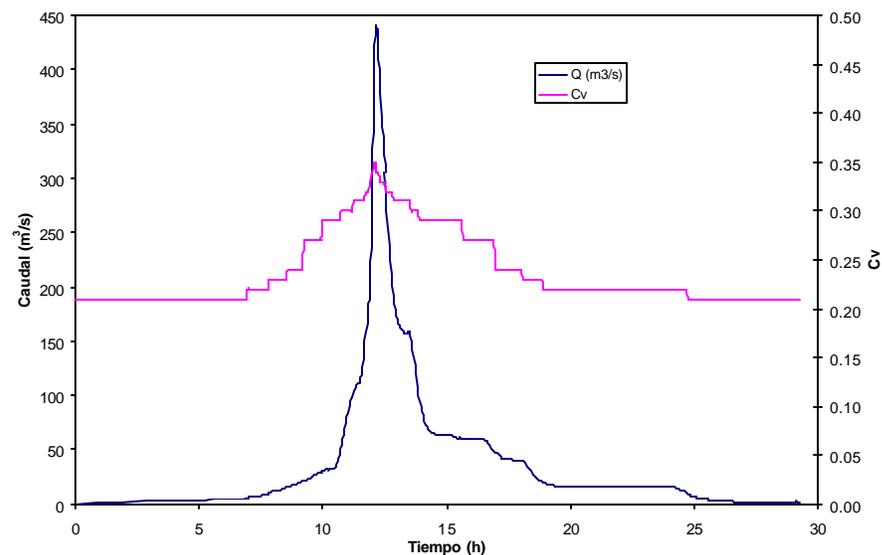


Figura 86 Río San José de Galipán. Hidrograma de caudal líquido y distribución de la concentración volumétrica de sedimentos ($T_r = 500$ años)

En el Anexo 4 se muestra los archivos de datos de entrada para este escenario como un ejemplo de los escenarios modelados.

Los resultados obtenidos de volumen de agua y de sedimentos son los siguientes:

- Volumen de agua: 3.807.328,50 m³.
- Volumen de agua más sedimentos: 5.396.520,19 m³.
- Volumen de sedimentos: 1.589.191,69 m³.

Se cuantificó el volumen del canal y se comparó con el volumen de sedimentos transportados por la

corriente.

- 15 % del Volumen de sedimentos: 238.378,75 m³.
- Volumen del Canal menos 15 % del Volumen de sedimentos: -199.799,46 m³.

De la comparación de volúmenes se decidió simular los casos con canal y el modelo con canal colmatado de sedimentos sin puentes.

Al comparar las manchas de inundación obtenidas, se puede observar que son igualmente extensas con ciertas diferencias en el contorno. Las profundidades máximas se presentan en los mismos sitios y los valores de profundidad son bastante aproximados para cada celda estudiada. Se obtuvieron los máximos valores de profundidad y de velocidad en el modelo con canal en el sitio del canal. Para el modelo con canal, el área inundada del canal es de 1,40 ha, el área de la planicie inundada 23,13 ha, y el área total 24,52 ha. Las profundidades máximas de agua en el canal fueron de 3,81 a 9,50 m, y la profundidad máxima en el terreno 7,93 m. En cuanto a las velocidades, los valores máximos se observan en el canal en un intervalo entre 2,00 a 14,00 m/s. La velocidad máxima en el terreno fue 9,18 m/s. Para el modelo con canal colmatado de sedimentos y sin puentes, el área inundada del terreno es 25,66 ha. La profundidad máxima de agua máxima en el terreno 7,98 m. La velocidad máxima 6,41 m/s en el terreno (ver Figuras 87 a la 90).

En la simulación del Río San José de Galipán con el modelo FLO2D, las zonas con mayores profundidades y velocidades para el fluido, así como el área inundada correspondieron a las áreas con mayores profundidades de sedimentos en el evento de 1999.

De los resultados obtenidos de las crecientes de diseño modeladas, estas se pueden catalogar como eventos de clase 6 y de clase 7, según la clasificación que hacen Cruden y Varnes en función de la velocidad de movimientos de masas.

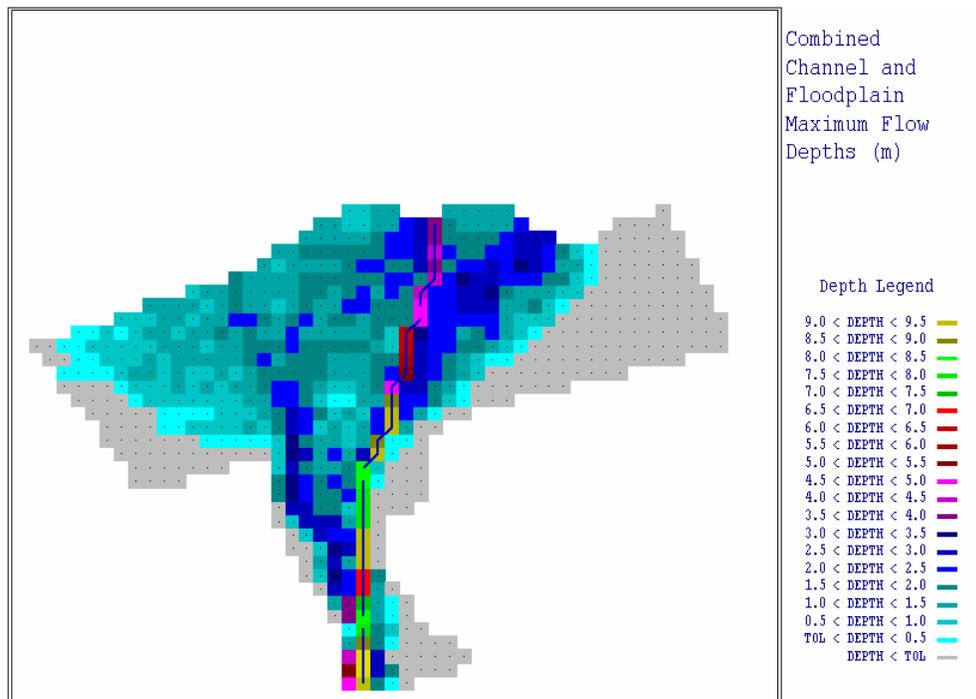


Figura 87 Escenario 3 Con canal. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).

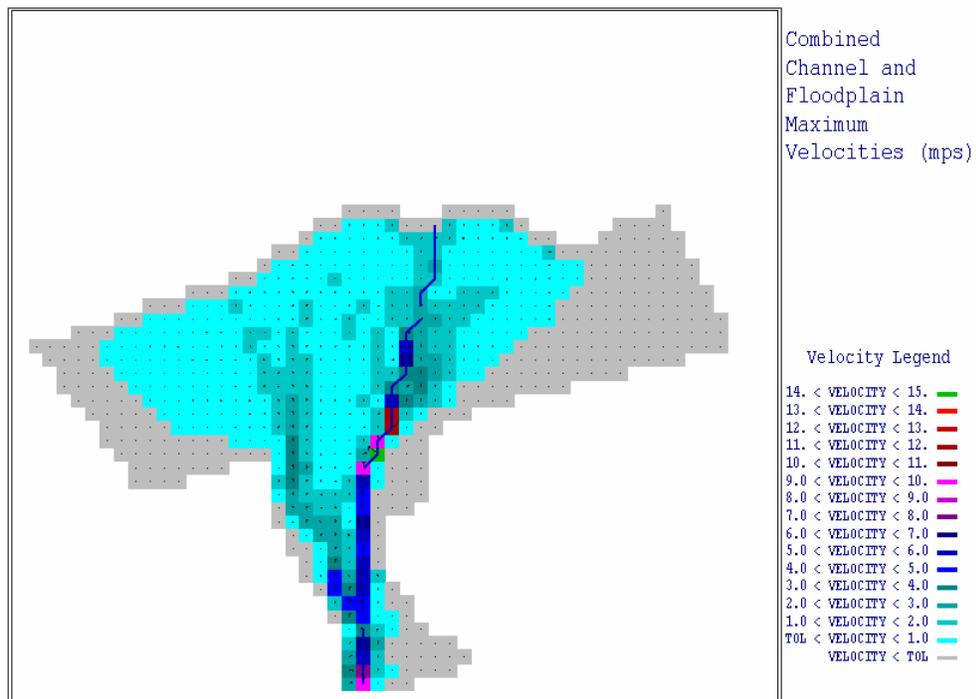


Figura 88 Escenario 3 Con canal. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).

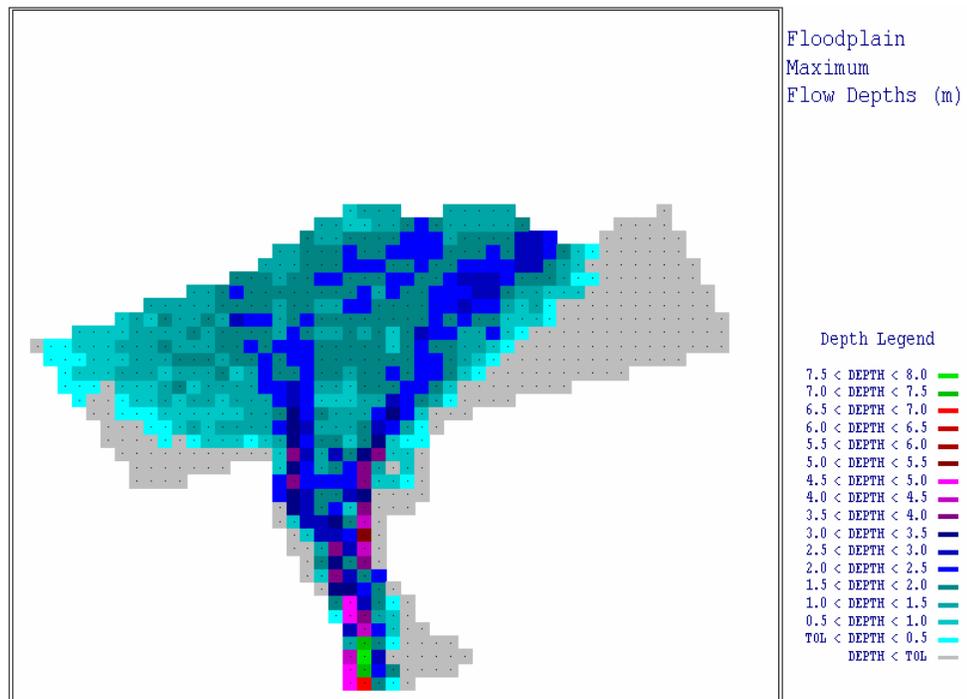


Figura 89 Escenario 3 Con canal colmatado de sedimentos. Profundidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).

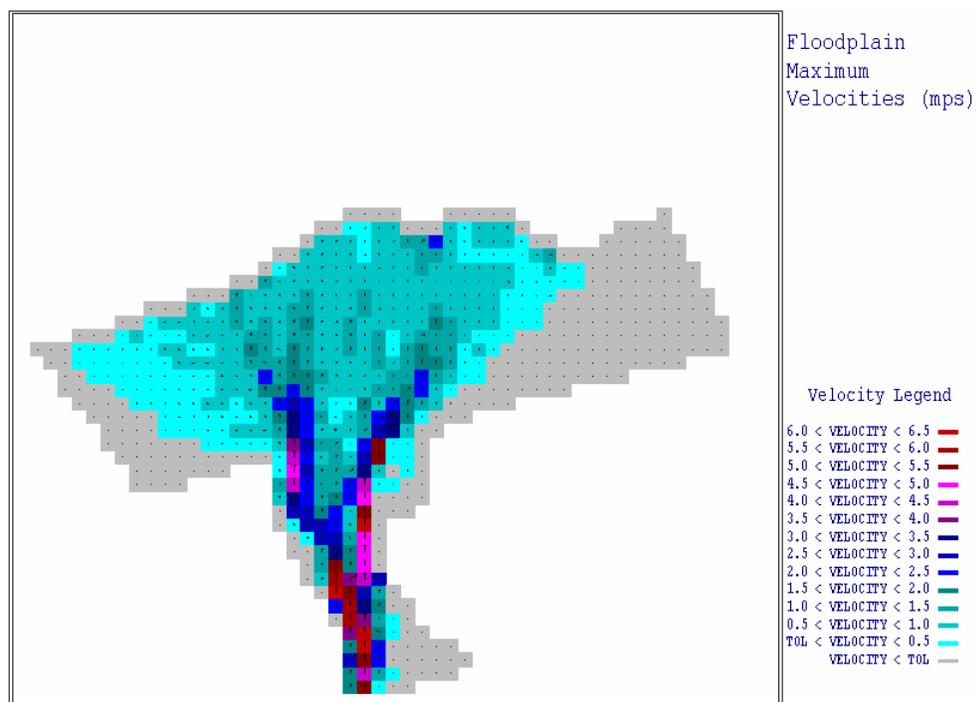


Figura 90 Escenario 3 Con canal colmatado de sedimentos. Velocidades máximas del flujo del Río San José de Galipán (Tr = 500 años).

9. ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA

Para elaborar el Mapa de Amenaza del Río San José de Galipán en el área de Macuto, se consideraron los siguientes escenarios:

- Tr = 10 años con canal, puentes, calles y edificaciones.
- Tr = 100 años con canal, puentes, calles y edificaciones.
- Tr = 500 años con canal, puentes, calles y edificaciones.
- Tr = 500 años con canal colmatado, sin puentes, con calles y edificaciones.

Se obtuvo una gran mancha roja que abarcó casi la totalidad del área inundada, el área naranja y las áreas amarillas quedaron limitadas a pequeñas zonas en los extremos. Con el Mapa de "*Distribución de Sedimentos y Desbordamiento de Flujo de Lodo y Piedras*", las fotografías aéreas de la población de Macuto y las observaciones en campo fueron ajustadas las áreas y los contornos de las áreas de amenaza (ver Figura 91 y Anexo 6).

Las áreas totales definitivas son las siguientes:

Tabla 22 Áreas de Amenaza para el Río San José de Galipán en el área de Macuto.

Cuenca	ÁREA DE AMENAZA (ha)			
	ALTA (Roja)	MEDIA (Naranja)	BAJA (Amarilla)	Total
Edo. Vargas				
SAN JOSÉ DE GALIPÁN	34,56	0,25	1,63	36,44

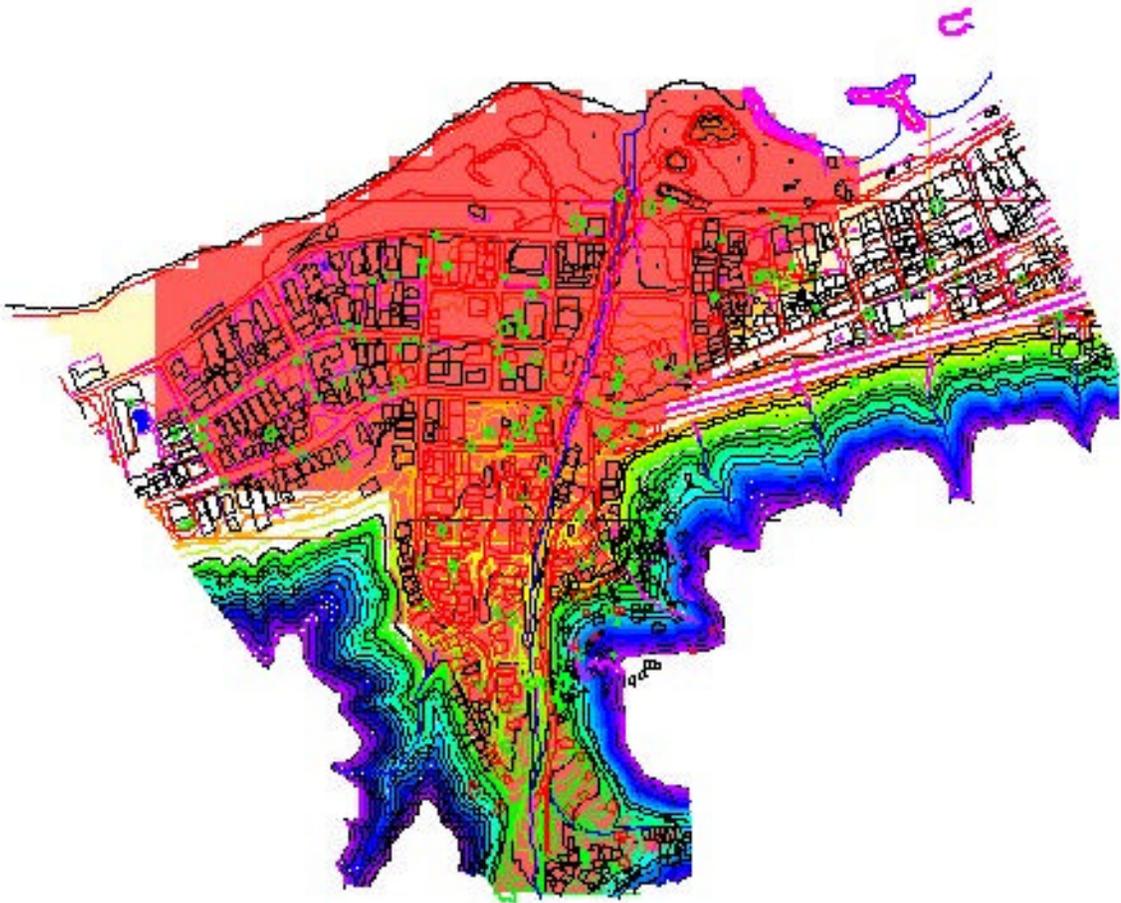


Figura 91 Sitio de estudio Macuto. Mapa de Amenaza

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los aludes torrenciales ocurridos en Diciembre de 1999 han marcado un antes y un después, no sólo en cuanto a la vida en el Estado Vargas y otros Estados que se vieron afectados, sino en el enfoque profesional y político con que el país debe encarar los estudios y proyectos de obras civiles, y en particular de obras hidráulicas. La amenaza de los fenómenos naturales, como los aludes torrenciales, debe ser contemplada en la planificación del Estado y del sector privado.

Las lluvias de gran intensidad han sido relativamente frecuentes en la Cordillera de la Costa, provocando inundaciones, aludes torrenciales y deslaves. El evento de diciembre de 1999 ha sido el de mayor magnitud y el más dramático en la historia del país y más concretamente del Edo. Vargas, pero no ha sido el único de su tipo. Las lluvias que desencadenaron el evento tuvieron su origen en una vaguada que se mantuvo sobre el Mar Caribe durante 20 días al ser bloqueada por una zona de Alta Presión del Atlántico Norte, que a su vez fue bloqueada por un Ciclón extratropical estacionario sobre el Atlántico Norte, que desprendió un resto de frente frío.

Los daños causados en la población de Macuto por la tormenta del año 1951 y la del año 1999, fueron similares en cuanto a la destrucción de las mismas construcciones emblemáticas de la zona, como son: el parque de las Palomas, el Paseo de la Playa, la Casona de la Guzmania, el tanque de agua del acueducto de la región y viviendas, así como una extensa zona que fue sedimentada con arena, piedras y barro. Áreas que fueron desforestadas por el río en el año 1951, fueron destruidas y sedimentadas en el 99, ya que habían sido urbanizadas y pobladas.

Con respecto al evento de diciembre de 1999, existen mediciones de los volúmenes de sedimentos depositados en el cono de deyección y del área de deslave de las laderas, pero no se conocen la batimetría ni la topografía de la cuenca completa de antes y de después de los aludes torrenciales, u

otros estudios donde se puedan relacionar los volúmenes erosionados y depositados del lecho del río tras la tormenta o se pueda determinar cuál es la diferencia batimétrica en la costa de la cuenca del Río San José de Galipán u otras.

El estudio de la morfología de la cuenca ha sido importante para entender los fenómenos que ocurrieron en ella:

- La producción de bloques está asociada al tipo de geología que se presenta en la cuenca. Muchos de estos bloques están en tránsito depositados en el lecho del río y no han llegado al cono de deyección.
- El cambio en la pendiente del cauce y a la amplitud en el área de algunos tramos del cauce, producen pérdida de energía, y hace que funcionen como plazoletas de sedimentación.
- En el cono de deyección, la gradación del material depositado va de mayor, en la garganta del río, y disminuye a medida que se aproxima al mar.
- Las características del fenómeno que se produjo en Macuto corresponden a flujo hiperconcentrado o flujo de barros y escombros.

En este trabajo se desarrolló la metodología para la determinación de las zonas de amenaza por aludes torrenciales, que contempla el uso de diferentes herramientas computacionales. Esta se aplicó a la cuenca del Río San José de Galipán. Se obtuvo el Mapa de Amenaza donde se indican las zonas con amenaza alta, media y baja.

Para reproducir la tormenta de diciembre de 1999 se trabajó con la lluvia registrada en la estación de Maiquetía, entre los días 14 al 16. El valor pico utilizado en el modelo es de 458,67 m³/s, mayor pero aproximado a 441 m³/s, valor pico de la tormenta de 500 años generado por C.G.R. Ingeniería (2000). Se observaron picos en el hidrograma, algunos de ellos se aproximan a la hora de

ocurrencia de las crecidas del cauce narradas por los sobrevivientes, como por ejemplo el momento en que las casas son destruidas por el flujo el 16 en la mañana coincide con los dos picos más grandes del hidrograma. Se presentan diferencias en el tiempo de ocurrencia y en la cantidad de picos de la tormenta. Esto es atribuible a la distancia física entre Mamo, Maiquetía y Macuto, a la formación y falla de diques naturales o a una posible imprecisión en los relatos de los testigos.

Con respecto al uso del modelo matemático FLO-2D:

- Para el modelaje de la tormenta de diciembre del 99 se determinó que la concentración volumétrica máxima de sedimentos C_v máximo = 0,35, reproducía en mejor manera dicho evento. Para la creciente de $Tr = 10$ años C_v máximo fue 0,20, constante en todo el hidrograma; para la creciente de $Tr = 100$ años, C_v máximo = 0,24; y para $Tr = 500$ años, C_v máximo = 0,35.
- Se obtuvieron profundidades máximas del flujo de hasta 10 metros en el canal y 6,24 metros en la planicie de escurrimiento. Las áreas con las profundidades máximas correspondieron con las máximas reportadas en el Mapa de JICA, las cuales fueron de hasta 5 metros la profundidad de los sedimentos, sobre el nivel de la calle.
- La mancha de inundación obtenida al modelar con el FLO2D la tormenta de diciembre de 1999 es similar al área afectada en el evento de diciembre de 1999.
- Según los resultados de la simulación de la creciente del 99 el modelaje del pico de la tormenta es el que va a definir los valores máximos de profundidad y de velocidad. Para los efectos de la elaboración del Mapa de Amenaza estos valores son los que definen el nivel de la amenaza.
- En la crecida el río se desvió hacia el oeste desde su entrada al área urbanizada de Macuto, tomó la Av. Isabel la Católica, y trasladó su desembocadura 200 metros al oeste. Hecho este que se repitió tanto en el modelaje con el FLO2D de la tormenta de diciembre de 1999 como en las tormentas de diseño de 100 y 500 años. La tendencia en todos los casos modelados con el

FLO2D, tanto con la topografía del año 1998 como en la de septiembre del 2000, con canal o canal colmatado de sedimentos, es a observar mayores profundidades del flujo en el área de la canalización, en el área del Parque de las Palomas, en la Casa La Guzmania, y en la calle Isabel La Católica, tal como ocurrió en Diciembre del 99.

- Las simulaciones con el FLO2D con canal y con canal colmatado de sedimentos arrojan resultados aproximados tanto en profundidades, velocidades y áreas afectadas. Las profundidades máximas esperadas son 10 metros para el canal y hasta 8 metros para la superficie de escurrimiento, con velocidades de hasta 14 m/s en el canal y en el terreno de 9 m/s.
- El evento ocurrido en diciembre de 1999, así como las crecientes para las lluvias con período de retorno de 100 y de 500 años, según el modelaje con el FLO2D y la clasificación de Cruden - Varnes son eventos de clase 7 ya que las velocidades máximas calculadas son mayores a los 5 m/s.

El área total amenazada en la cuenca del Río San José de Galipán es 36,44 hectáreas, de las cuales 34,56 ha tienen una amenaza alta, 0,25 ha tienen amenaza media y 1,63 ha tienen amenaza baja.

El hecho de que una zona de un mapa no aparezca marcada con un color que indique amenaza, no implica necesariamente que esta se encuentre completamente exenta de peligro, ya que algún evento extraordinario imprevisto pudiera ocasionar daños en dicha zona.

Es importante aclarar que los mapas de amenaza elaborados, se basan en las condiciones actuales de la zona (mayo de 2.002). Cualquier cambio de importancia que se realice en la cuenca (construcción de presas de retención, canales, etc.) puede afectar sensiblemente los patrones y áreas de inundación y, en consecuencia, el mapa de amenaza. Esto implica que el mapa deberá de

ser revisado y actualizado cada vez que se realice alguno de estos cambios en la cuenca.

Los resultados obtenidos indican que grandes áreas de los conos de deyección urbanizados están en áreas de alta peligrosidad. Estos resultados deben motivar acciones que conduzcan a la construcción de obras de control de torrentes, las cuales pueden ayudar considerablemente a mitigar los daños materiales y humanos que usualmente ocurren en eventos hidrológicos extraordinarios. En la medida que se realicen estas obras, se podrán reducir las áreas de alta peligrosidad o al menos convertirlas en áreas de baja amenaza.

Igualmente, se espera que los resultados de este trabajo sirvan de base para estudios futuros a escalas más detalladas que ayuden en el diseño de planes de emergencia, ubicación de refugios y selección de vías de escape en las diferentes zonas estudiadas.

11. REFERENCIAS

- J. Aguirre P. y A. Moncada, Regímenes de flujo de barros y escombros. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol XIV, Núm. 1, págs. 5-12, (enero-abril de 1999).
- J. Arismendi, R. Salcedo y D. Varela, Geomorfología actual y cobertura natural de la vertiente norte de la cordillera de la costa afectada por el evento hidrometeorológico de diciembre 99, a partir de la interpretación de imágenes de satélite. *Seminario Internacional "los aludes torrenciales de diciembre de 1999"*. Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- P. Basabe et al, PREVENE, Aporte a la Prevención de Desastres "Naturales" en Venezuela. Cooperación: Venezuela - Suiza - PNUD (Proyecto VEN/00/005) Mayo 2001.
- Cerato, M. y Veronese, L., Informe técnico preliminar sobre la estabilización de la Quebrada San José de Galipán Estado Vargas Venezuela. Provincia Autónoma de Trento. M.A.R.N. (2000)
- C.G.R. Ingeniería, Estudio crecidas cuencas del Litoral Central, D.F. (2000). (C.G.R. Ingeniería, 2000).
- J. M. Gómez, Análisis de las temperaturas superficiales del Mar Caribe a través de imágenes de satélite AVHRR, y su relación con las precipitaciones ocurridas en el Estado Vargas en diciembre de 1999, Universidad Católica Andrés Bello. (2000)
- M. González S. y J. R. Córdova, consideraciones sobre la probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas en la zona litoral del norte de Venezuela. *Seminario Internacional "los aludes torrenciales de diciembre de 1999"* Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- J. P. Grases, J. I. Amundaray, A. Malaver, P. Feliziani, L. Francheschi, J. C. Rodríguez, *Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en diciembre de 1.999*. PNUD. CDB Publicaciones. CAF. (Editorial Torino. 2000).

- L. G. Hidalgo, la gran lluvia venezolana de diciembre 1999. *Seminario Internacional Los aludes torrenciales de diciembre de 1999* Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- J. Hübl y H. Steinwendther , Debris Flow hazard assessment and risk mitigation. FELSBAU 18 (2000) (Hübl & Steinwendther, 2000)
- Japan Internacional Cooperation Agency JICA y Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales MARN, Proyecto de Control de Torrentes de las Cuencas de los ríos San Julián y Camurí Chiquito, estado Vargas, Venezuela. (2000)
- A. Kezdi. *Manual de la mecánica de suelos. Tomo I, Física del suelo*. Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca. Caracas, 1975.
- Y. Linares, V. Davies, J.R. Duque y otros, *Y el Ávila bajó al mar. Testimonios y fotografías de la tragedia de Vargas*. Los Libros del Nacional. Caracas (2000).
- J.L. López, Consideraciones sobre el desastre de Carmen de Uria. *Seminario Internacional "Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999"* Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- J. L. López, D. Pérez H., R. García M., Z. Shucheng, Evolución hidro-geomorfológica de los aludes torrenciales de diciembre de 1999 en Venezuela. Seminario Internacional "Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999" Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- M.A.R.N., Información Hidrometeorológica del Litoral Central y zonas afectadas por las lluvias del mes de diciembre de 1999. (2000).
- Ministerio de Defensa, Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea. Análisis de las situaciones meteorológicas que afectaron al área norte costera del país durante el mes de diciembre del año

de 1999. (2000)

- G. Pacheco T., Las iras de la serranía. Lluvias torrenciales, avenidas y deslaves en la Cordillera de la Costa, Venezuela: un enfoque histórico. (Fondo Editorial Tropykos, Caracas, 2002)
- O'Brien, J.S., 1993. "Hydraulic modeling and mapping of mud and debris flows," Proceedings of the 1993 ASCE Conference, San Francisco, CA, ed. H.W. Shen, S.T. Su, and F. Wen, ASCE, New York, 1762-1767.
- O'Brien, J.S. and P.Y. Julien, 1997. "On the importance of mudflow routing," Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, CA, ed. Cheng-lung Chen, ASCE, New York, pp. 677-686.
- J. S. O'Brien, *FLO-2D USERS MANUAL, Versión 2000.10*. Nutrioso, Arizona, (2000).
- D. Pérez H., Procesos geomorfológico-fluviales asociados al evento catastrófico del Edo. Vargas, Venezuela. Diciembre 1999. *Seminario Internacional "los aludes torrenciales de diciembre de 1999"* Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000)
- V. Sardi, Gasto Máximo de los ríos y las quebradas del Litoral Central. *Colegio de Ingenieros de Venezuela. Revista N° 275* 14(4), (1959)
- O. Sucre A. Daños causados por la Tormenta del 15 al 17 de Febrero de 1951 (1951)
- F. Urbani, J.A. Rodríguez, L. Barboza, S. Rodríguez, V. H. Cano, L. Melo, A. Castillo, J. C. Suárez, V. Vivas, H. Fournier. Geología del estado vargas, Venezuela. *Seminario Internacional "los aludes torrenciales de diciembre de 1999"* Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela (2000).
- Urbani y Ostos, *Léxico Estratigráfico de Venezuela*. Caracas (1989)
- Z. Wan y Z. Wang. *Hyperconcentrated Flow*. IAHR, AIRH Monograph (1994)

Páginas Web consultadas:

<http://espanol.weather.com/glossary/>

<http://www.terra.com.ve/especiales/vargas.htm>

<http://www.corpovargas.gov.ve>

12. CURRÍCULO VITAE

MARÍA ESPERANZA NOYA L.

Información personal

Dirección: La Candelaria, Caracas

Teléfonos: 0212-5723458 Hab.

0416-6375029 Cel.

Dirección de correo electrónico: mary_noya@hotmail.com

Estado civil: Soltera

Nacionalidad: Venezolana - Española

Lugar de nacimiento: Caracas

Fecha de nacimiento: 12 de septiembre de 1969

Educación

MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA - UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA 1994 -
2003

PERITO AVALUADOR DE BIENES INMUEBLES – COLEGIO DE INGENIEROS DE VENEZUELA
1998

INGENIERO CIVIL - UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO 1988 – 1994

TÉCNICO SUPERIOR UNIVERSITARIO EN CONSTRUCCIONES CIVILES - INSTITUTO
UNIVERSITARIO DE TECNOLOGÍA REGIÓN CAPITAL 1986 - 1988

Idiomas

Ingles instrumental.

Experiencia profesional

INGENIERO CIVIL – INSTITUTO DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS - UNIVERSIDAD CENTRAL DE
VENEZUELA - Desde 2001: Participación en el estudio hidráulico de las cuencas Osorio, Cariaco, La
Alcantarilla, San José de Galipán y El Cojo del Estado Vargas, en el marco del Proyecto Ávila -

Mapas de Riesgo, en el que se usó como principal herramienta el modelo FLO-2D. Participación en el proyecto de investigación Modelo de Circulación General y Dinámica Sedimentaria del Estuario de Maracaibo.

INGENIERO CIVIL - PNUD – CUERPO DE SOCORRO SUIZO - 2000 - 2001: Participación en el estudio hidráulico de las cuencas Tócome y Anauco del Valle de Caracas, en el marco del Proyecto Ávila - Mapas de Riesgo.

INGENIERO RESIDENTE - CONSTRUCTORA SAMBIL – 1997 - 1999: Participación en la construcción de edificios residenciales, de oficinas y centros comerciales en Caracas.

INGENIERO CIVIL - OTEPI CONSULTORES, S.A. - 1995: Participación en la Ingeniería de Detalle del Proyecto BITOR (Orimulsión), y en la ingeniería básica y de detalle del proyecto Procter & Gamble de Venezuela, donde se desarrolló el sistema de alcantarillado de aguas de lluvia y aguas servidas, el sistema de aducción de agua potable de la planta y las instalaciones sanitarias para las edificaciones.

PROFESOR DE GEOMETRÍA DESCRIPTIVA - INSTITUTO UNIVERSITARIO NUEVAS PROFESIONES – DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA 1995 – 1997: Profesor de Geometría Descriptiva en el Departamento de Computación.

REPRESENTANTE DE VENTAS - HEVENCA, C.A. - 1994 – 1995: Venta y cálculo de bombas hidráulicas y equipos hidroneumáticos para el sector construcción.

INGENIERO CIVIL - VENMARCA, C.A. MIXTO-LISTO - 1993: Participación en el Proceso de Elaboración y Control de Calidad del Concreto Premezclado.

T.S.U. en CONSTRUCCIONES CIVILES - GEOHIDRA C.A.- 1988: Participación en la Ingeniería de Detalle de Patios de Almacenamiento de Productos derivados del Petróleo. Participación en Estudios

Hidrológicos.

Trabajo de Grado

CONTROL DE CALIDAD ACTUAL DEL CONCRETO PREMEZCLADO EN LA ZONA METROPOLITANA DE CARACAS: Donde se da al Premezclador herramientas para identificar que factores afectan la calidad del concreto. Al cliente de estos productores se le facilita un cuestionario con el cual se evalúa la capacidad del Premezclador para producir un concreto con calidad. Se obtuvo con este trabajo mención **PUBLICACIÓN**

Cursos

- SEMINARIO DE ALUDES TORRENCIALES. 2000 – UCV
- RÍOS DE MONTAÑA Y ALUDES TORRENCIALES: 2000 - UCV
- INGLES INTENSIVO. 1996 – ASPECT INTERNATIONAL SCHOOL, VANCOUVER – CANADA.
- INSTALACIONES SANITARIAS. 1995 – CIV.
- AUTOCAD. 1995 – OTEPI.
- II JORNADAS DE VIALIDAD DR. JACOBO CARCIENTE. MARZO 1994 – UCLA
- JORNADAS 40 AÑOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UCAB. 1993 – UCAB.
- GLOBALIZACIÓN: LA INTEGRACIÓN MUNDIAL. 1993 – UCAB.
- RETO EMPRESARIAL. 1992 – UCAB.
- I CICLO DE CONFERENCIAS DE INGENIERÍA CIVIL. 1993 – UCAB.
- SEMINARIO DEL CONCRETO. 1993 – AVICOPRE
- INGENIERÍA HOY. MAYO 1992 – UNIVERSIDAD METROPOLITANA.
- CALIDAD TOTAL. JUNIO 1989 – UCAB.