



Modelo 3-D del terreno obtenido a partir de una ortofoto y un Modelo Digital del Terreno (DTM).

Vista desde aguas arriba del puente “Castillo Armas” hacia el sur. En primer plano se observa la CA-2 cruzando el río Samalá (zona de dragado) y luego dividiéndose hacia San Sebastián (al fondo derecha).

(Tomado de Navarrete Pacheco, 2003).

4.2 Análisis de lluvia, caudales y amenaza por Inundación en la Cuenca Samalá.

Elfego Orozco Ph.D., Profesor-Investigador de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS), Universidad de San Carlos de Guatemala e Ing. Pedro Tax, Departamento de Hidrología, INSIVUMEH.

Debido a la falta de información en la cuenca del río Samalá la metodología para la estimación de Caudales Máximos se basa en el análisis regional de 24 series de crecidas registradas en igual número de estaciones hidrométricas en cuencas de la Vertiente del Pacífico de Guatemala. El método consiste en obtener una ecuación que relacione el Caudal Máximo Medio (QMM) y el área de la cuenca y también los caudales estandarizados en función de distribuciones de frecuencia. Se utilizaron 24 series de datos con diferente longitud de registro (entre 8 y 20 años) de 17 cuencas y sub-cuencas y la información de la estación Cantel (Cuenca Samalá) y la estación Caballo Blanco (Sub-cuenca Ocosito).

La relación entre el promedio de los caudales máximos medios (Crecida Índice) QMM (m^3/s) – y el área tributaria – A (km^2) se obtuvo mediante análisis de regresión. Con un coeficiente de $R^2 = 0.82$ se obtuvo la siguiente ecuación:

$$QMM = 0.02 A^{1.52} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

El valor observado de QMM para la estación Cantel es de $62 \text{ m}^3/\text{s}$ para un área de 701 km^2 . Esta área tributaria corresponde a la parte superior de la cuenca cuyas características hidrológicas difieren de la parte media en cuanto a que la magnitud de las lluvias y de escorrentía son menores en la parte superior. Para la estación Caballo Blanco (en la cuenca vecina de Ocosito) el QMM es de $667 \text{ m}^3/\text{s}$ para un área de 461 km^2 . Las características hidrológicas de esta cuenca son similares a la parte media de la cuenca Samalá.

En la Fig. 16 se observa la relación de Caudal-Area para las cuencas utilizadas en el análisis, las estaciones Cantel y Caballo Blanco y la recta que representa a la Ec. 1. Debido a que la curva ajusta razonablemente ($R^2=0.82$) se decidió utilizar esta ecuación para estimar el QMM para la cuenca del Samalá (hasta el puente Castillo Armas). Para un área tributaria de 959 km^2 se obtiene un QMM de $681 \text{ m}^3/\text{s}$.

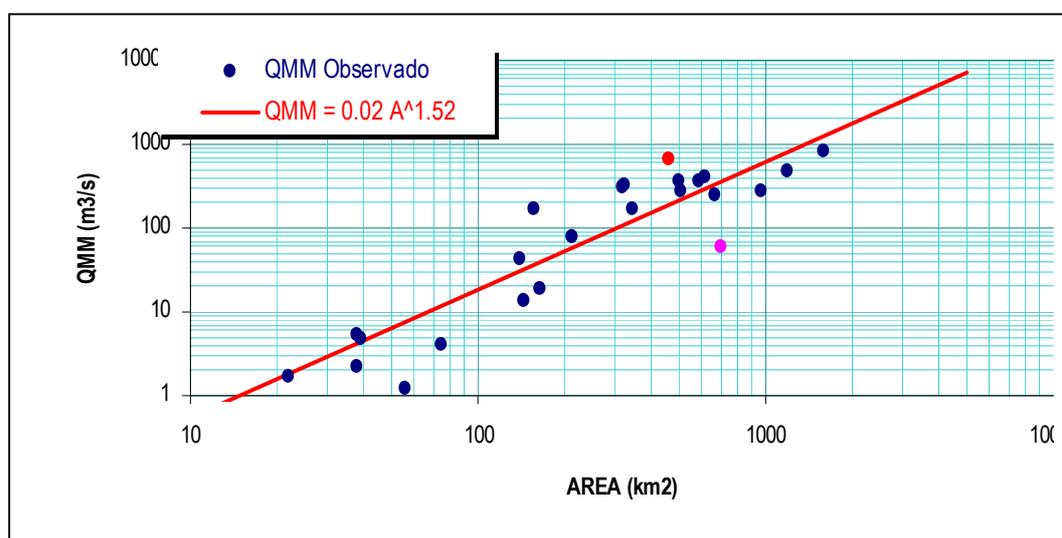


Figura 16. Relación entre el Caudal Máximo Medio observado y el área tributaria para cuencas del Pacífico guatemalteco. Se diferencian los valores observados en las estaciones Cantel y Caballo Blanco.

Para el análisis estadístico de las 24 series de datos se utilizaron cuatro distribuciones de frecuencias: Valor Extremo Generalizado (VEG), Distribución Logística Generalizada (DLG), Pearson Tipo III (P-III) y Log-Normal de 3 parámetros (LN3). Debido a que las 24 series son de diferente magnitud y extensión se estandarizaron los datos para poder compararlos. Esta estandarización se hace dividiendo el valor de cada serie entre el respectivo QMM. A esta relación se le denomina k , la cual, obviamente es adimensional. En la Fig. 17 (en escala probabilística de Gumbel) se observan las 4 distribuciones regionales de frecuencia así como los valores observados en las estaciones Cantel y Caballo Blanco.

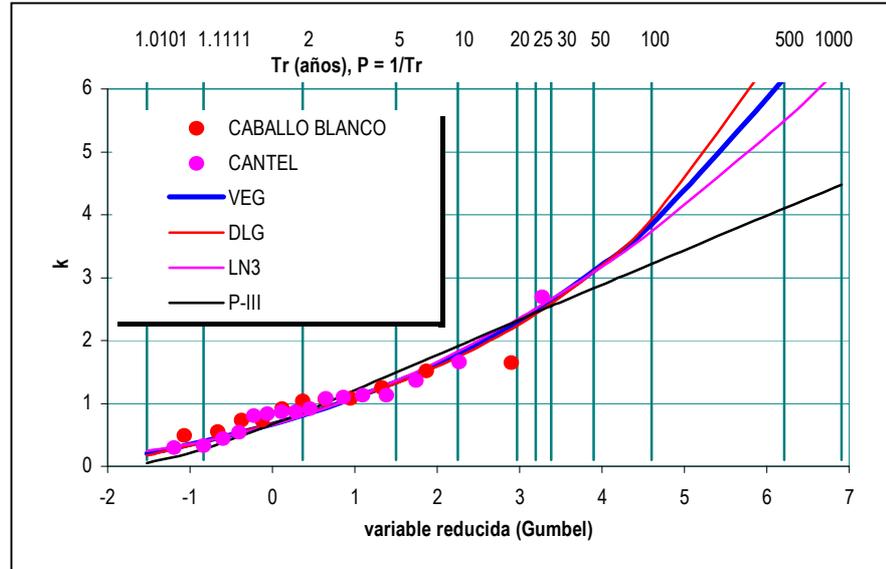


Figura 17. Caudales máximos observados (estandarizados), k , en las estaciones de Cantel (cuenca Samalá) y Caballo Blanco (cuenca Ocosito) y comparación con las cuatro distribuciones de frecuencia regionales para la Vertiente del Pacífico.

En vista que los valores observados para estas estaciones no se ajustan muy bien a las curvas regionales se utilizaron las curvas de frecuencia promedio. En la Figura 18 ya se observa un mejor ajuste de los valores observados con relación a las curvas promedio de las dos estaciones mencionadas. Se considera que, la curva promedio es la más razonable de utilizar para estimar los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en el sitio de derivación.

Por lo tanto, los caudales Q_{Tr} para la cuenca del Samalá se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Tr} = QMM * k_{Tr} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: Q_{Tr} es el caudal correspondiente a diferentes períodos de retorno Tr ; QMM es la crecida índice (en este caso es de $681 \text{ m}^3/\text{s}$) y k_{Tr} es la crecida modular (o estandarizada) que se obtiene del gráfico de la Figura 18 utilizando la curva promedio. La Tabla 1 muestra los diferentes caudales estimados.

Tabla 1. Caudales con diferentes períodos de retorno (Q_{Tr}) para la Cuenca Samalá.

Tr (años)	p (%)	K_{Tr} (-)	Q_{Tr} (m^3/s)
1,000	0.1	3.679	2,507
500	0.2	3.318	2,261
100	1	2.566	1,748
50	2	2.270	1,547
30	3.33	2.059	1,403
25	4	1.985	1,353
20	5	1.895	1,291
10	10	1.618	1,103
5	20	1.337	911
2	50	0.920	627

P= Probabilidad de excedencia.

Los caudales para períodos de retorno superiores a los 100 años deben usarse con cautela en virtud de la extensión limitada de los registros utilizados para su derivación. Los caudales en amarillo fueron utilizados para el análisis hidráulico posterior.

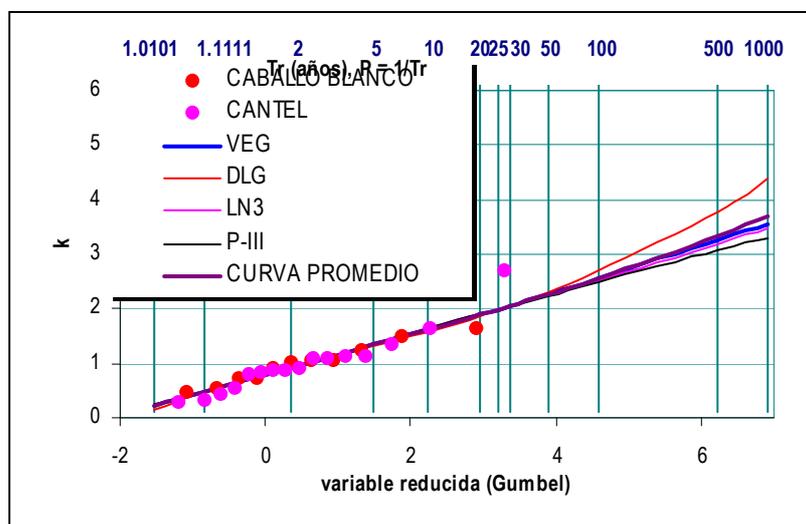


Figura 18. Caudales máximos observados (estandarizados), k , en las estaciones de Cantel (cuenca Samalá) y Caballo Blanco (cuenca Ocosito) y comparación con las cuatro distribuciones de frecuencia promedio de estas estaciones.

Para la determinación de las planicies de inundación del río Samalá se utilizó el programa HEC-RAS, un modelo matemático hidrodinámico que calcula las alturas del nivel del agua en función del caudal a régimen permanente y las condiciones topográficas del cauce natural.

Se utilizaron los caudales previamente calculados para 10, 25, 50 y 100 años de recurrencia y se determinaron las secciones transversales del cauce por medio de un levantamiento topográfico (tránsito y nivelación). Esta información fue obtenida por personal del Departamento de Servicios Hidrológicos del INSIVUMEH y de la Facultad de Agronomía-USAC.

Además, se utilizaron los coeficientes de rugosidad de Manning (0.035 en cauce principal y 0.040 en planicies de inundación) y coeficientes de contracción y expansión del cauce (0.1 y 0.3, respectivamente). La Tabla 2 muestra un resumen de la distancia entre secciones y su pendiente longitudinal, con una distancia máxima de 3,885 m y la pendiente media ponderada de 1.72%.

Tabla 2. Distancia y pendiente media entre secciones transversales del río Samalá.

Sección	Elevación fondo río (msnm)	Distancia entre secciones	Pendiente (%)
1	358.14	-----	-----
2	352.49	429.67	1.32
3	350.76	245.32	0.70
4	347.78	568.45	0.53
5	337.83	674.83	1.47
6	327.27	375.51	2.81
7	312.13	838.98	1.80
8	291.00	751.69	2.81

Escenario 1: Modelación de 4 caudales (10, 25, 50 y 100 años) por el cauce actual CON bordas de protección.

Como puede observarse en las secciones transversales de la Figura 19, no ocurriría inundación por rebase de la borda en las secciones 1, 4 y 7. Sin embargo, se determinó que esto si sucedería en el resto de secciones (2, 3, 5, 6 y 8). Particularmente importante es el caso de las secciones 5 y 6 (San Sebastián al oeste y la carretera CA-2 al este) ya que ambas muestran problemas de inundación por rebase. En el caso de la sección 5 se determinó que la borda no protegería ni siquiera contra una inundación de caudal Q_{10} ($1,103 \text{ m}^3/\text{s}$) mucho menos en el caso de caudales mayores. El problema más crítico en este caso serían los daños que podría sufrir la carretera Panamericana CA-2. Para la sección 6, también se esperarían inundaciones del lado de la carretera y adicionalmente éstas podrían extenderse en la otra ribera hasta las cercanías de San Sebastián. Hay que hacer notar que el tramo de la carretera comprendida entre las secciones 5 y 6 (km. 176.5) ya ha sido afectada en numerosas ocasiones por crecidas y lahares del río Samalá, especialmente durante las inundaciones de Nueva Caledonia en agosto de 1993 (Conde Carpio, 2000)- ver Fig. 6. En las secciones 2,3 y 8 el rebalse sería de menor magnitud y no afectaría ningún elemento físico o poblacional en particular.

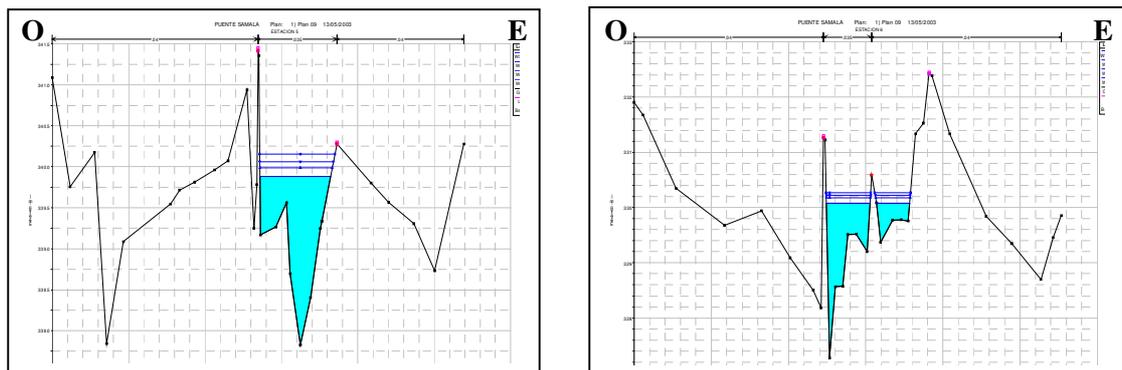


Figura 19. Secciones transversales 5 (izquierda) y 6 (derecha).

Escenario 2: Modelación del paso de 4 caudales (10, 25, 50 y 100 años) por el cauce actual SIN bordas de protección.

En este caso se determinaron los niveles de agua en el caso de que las bordas fallaran. En general, se observa que la margen oriental del río, que colinda con el trazo de la Carretera Panamericana CA-2, sería la más afectada por las inundaciones. En la sección 2, aguas abajo del Puente “Castillo Armas”, la inundación sucedería con cualquiera de los caudales calculados y cubriría la carretera en su totalidad e incluso podría llegar hasta el río Mulúa o El Niño, dañando probablemente parte de la finca Los Brillantes. A la altura de la sección 3 (Puente del Ferrocarril), se esperaba inundación con un caudal Q_{100} ($1,748 \text{ m}^3/\text{s}$) y se infiere que la antigua línea férrea y su zona de paso servirían como curso del agua hacia el otro lado de la CA-2 y podría también unirse con el río Mulúa. De acuerdo a lo observado en los tramos siguientes, al fallar las bordas, se inundaría

el tramo completo de la CA-2 con cualquiera de los caudales calculados (ver Fig. 20).

Hacia el lado occidental de las secciones 5 y 6, zona urbana de San Sebastián, se determinó que las crecidas provocadas por caudales Q_{50} y Q_{100} ($1,547 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,748 \text{ m}^3/\text{s}$) podrían alcanzar la periferia del poblado y dañar las zonas de cultivo (el nivel del agua estaría 2 m por debajo del nivel del poblado). Esta parte del escenario hay que tomarla con mucha cautela por el hecho de que solamente se evaluaron 2 secciones transversales en los alrededores de San Sebastián y al momento de una gran crecida el agua correría por muchos otros puntos del terreno que no fueron evaluados y se desconoce su altitud relativa.

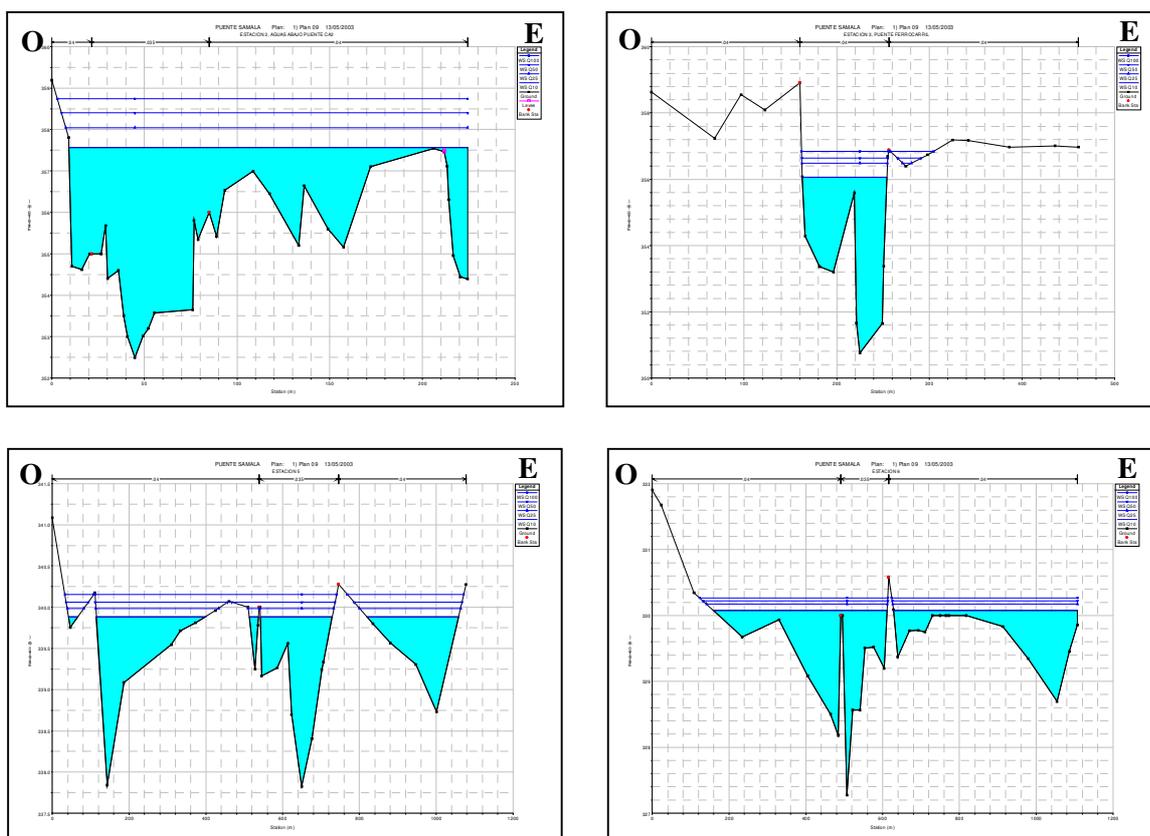


Figura 20. Secciones Transversales 2 y 3 (arriba) y 5 y 6 (abajo). En todos los casos los diferentes caudales rebasan la capacidad hidráulica del cauce natural. Esta figura demuestra gráficamente porque es importante reforzar y darle un mantenimiento constante a las bordas de protección.

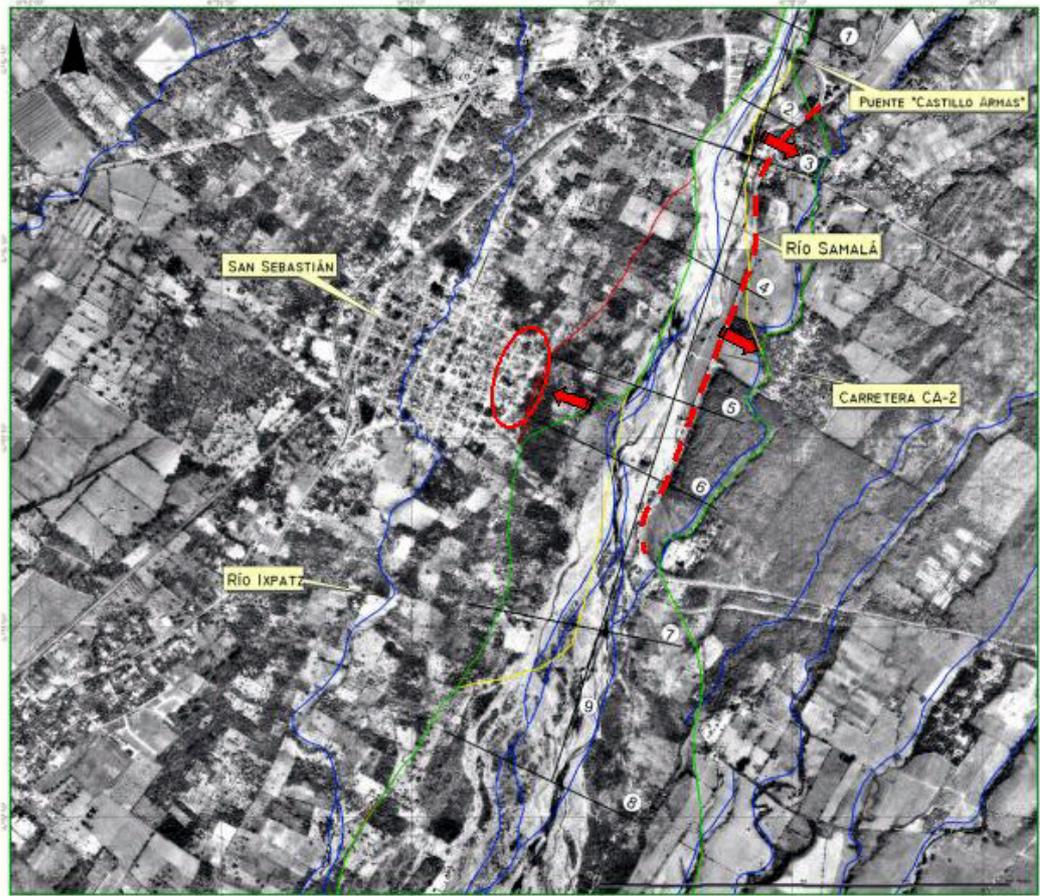


Figura 21. Zonas de afectación para 3 diferentes escenarios de inundación (indicados por polígonos rojo, verde y amarillo). Las flechas rojas indican los puntos críticos de rebalse afectando la Carretera Panamericana (línea roja punteada), Finca Los Brillantes y San Sebastián (elipse roja).

Del análisis hidráulico realizado (cálculo de caudales máximos y planicies de inundación) se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La configuración actual de las bordas de protección (a la fecha del levantamiento topográfico) permitiría contener crecidas con caudales de hasta Q_{50} —hasta $1,547 \text{ m}^3/\text{s}$ (a excepción del borde oriental de las secciones 5 y 8). En estos puntos, solamente bastaría una crecida de caudal Q_{10} ($1,103 \text{ m}^3/\text{s}$) para sobrepasar el nivel de la borda.
- Si las bordas actuales fueran reforzadas y se construyera un tramo nuevo de aproximadamente 800 m de borda en la parte occidental entre las secciones 6 y 7 el área afectada por grandes crecidas (con caudales mayores de Q_{50}) se podría limitar considerablemente.
- El peor de los escenarios, si fallaran las bordas con caudales mayores de Q_{50} , afectaría las áreas cultivadas, los barrios periféricos de San Sebastián y un amplio tramo de la Carretera Panamericana CA-2 (desde la vuelta del Niño hasta el cruce Retalhuleu-Quetzaltenango). Aparentemente, el poblado de San Sebastián se ve más afectado por las inundaciones del río Ixpatz y no del río Samalá. Se deberá poner mucha atención a los posibles daños de la CA-2 ante diferentes crecidas. Las bordas de protección en la margen oriental del río podrían ser la opción más efectiva y menos costosa para esta importante vía de comunicación.

4.3 Análisis de estabilidad de laderas en la sub-cuenca Nimá I.

Ivo Thonon M.Sc., Facultad de Ciencias Geográficas, Universidad de Utrecht, Los Países Bajos.

Para este análisis se utilizó el modelo Catch (del vocablo anglo “*catchment*” – cuenca) el cual es un modelo semi-determinístico, es decir, aplica ecuaciones físicas pero tiene una base conceptual. El modelo conceptual describe y simula como se comportan las laderas desde el punto de vista hidrológico y geomecánico y para ello utiliza 2 módulos principales: de hidrología subterránea y el de estabilidad de laderas. En el primero, se incluyen la zona saturada y no-saturada del suelo y los procesos de infiltración y percolación. Con el segundo se calcula el Factor de Seguridad a partir del concepto de Pendiente Infinita y utilizando como datos de entrada los resultados del módulo de hidrología subterránea (de Joode, A. y van Steijn, H., en prensa). Para ambos módulos, se trabaja con datos de entrada tipo raster y datos numéricos utilizando como base el programa PCRaster (Wesseling et.al. 1996), el cual es un SIG matricial que permite correr modelos dinámicos y evaluar resultados en diferentes series de tiempo. Mayor información sobre este programa se puede encontrar en <http://pcraster.geog.uu.nl>

El análisis se corrió únicamente en la sub-cuenca del río Nimá I por considerar que esta puede ser el área que aporta mayor cantidad de materiales para la formación de los lahares que posteriormente bajan a las poblaciones a través del río Samalá. Esta es una sub-cuenca de aproximadamente 70 km² con altitudes máximas de 3,500 m.s.n.m. y una precipitación pluvial anual máxima de hasta 6,000 mm (MAGA, 2001). Las unidades litológicas están compuestas principalmente por depósitos piroclásticos, tobas, cenizas, lavas andesíticas y depósitos fluvio-laháricos (MAGA, 2001; Viera, 2003).

Para los cálculos del Módulo de Hidrología Subterránea se utilizaron los datos de precipitación para el año 1998 (verano e invierno) con el propósito de evaluar no solamente el comportamiento de las laderas bajo condiciones lluviosas ‘normales’ sino también el efecto que produce la ocurrencia de una tormenta de gran intensidad (en noviembre 1998 ocurrió el Huracán Mitch). El modelo sustrae la evapotranspiración de la cantidad de lluvia y el resto la infiltra en el suelo. La cantidad de agua que no puede ser almacenada en el suelo se elimina y se le considera como escorrentía y ya no es considerada en las etapas posteriores. Para el cálculo de la percolación se toman en cuenta los parámetros de espesor del suelo, conductividad hidráulica saturada (K_{sat} , en mm/hr), contenido máximo de humedad (θ_{max} , adimensional), actual (AMC) y mínimo (θ_R). Uno de los objetivos de este módulo es calcular el espesor de la capa freática como factor condicionante de la inestabilidad de las laderas. Este parámetro, junto a la gravedad, la pendiente, densidad (UW), cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) se utilizan en el Módulo de Estabilidad de Laderas para el cálculo de la Presión de Poros (kPa) en el suelo y el Factor de Seguridad (F) – ver Tabla 1. El aumento del espesor de la capa freática en el suelo puede provocar que se vuelva inestable ya que a mayor cantidad de agua hay menor fuerza de resistencia al fallamiento. Si el valor F de una celda en el modelo del terreno es menor que 1.0

se considera a esta celda inestable para una etapa de tiempo dada. Eso significa que existe la posibilidad que ocurra un evento de movimiento de ladera (deslizamiento o flujo de escombros). Si F es mayor que 1.0 se considera que la celda es estable y es improbable que ocurra un evento.

Tabla 3. Datos geo-mecánicos utilizados en el Módulo de Estabilidad Tomados de Loti (2001).

5 Unidad Litológica	Densidad (kPa)	Cohesión (kPa)	Phi (°)
• Lava andesítica y fragmentos de roca	11	2	30
• Sedimentos del cono volcánico	18	2	30
• Depósitos aluviales	18	100	37
• Depósitos de lahares	16	2	26
• Lava dacítica	15	2	30
• Lavas y piroclásticos	16	2	30

Como parte de los resultados se obtuvieron mapas indicando las áreas estables e inestables durante el evento Mitch y total de días de inestabilidad (Fig. 22), gráficos que indican el espesor promedio de la capa freática en la cuenca, el porcentaje de área inestable total (Fig. 23) y el porcentaje de área inestable acumulado.

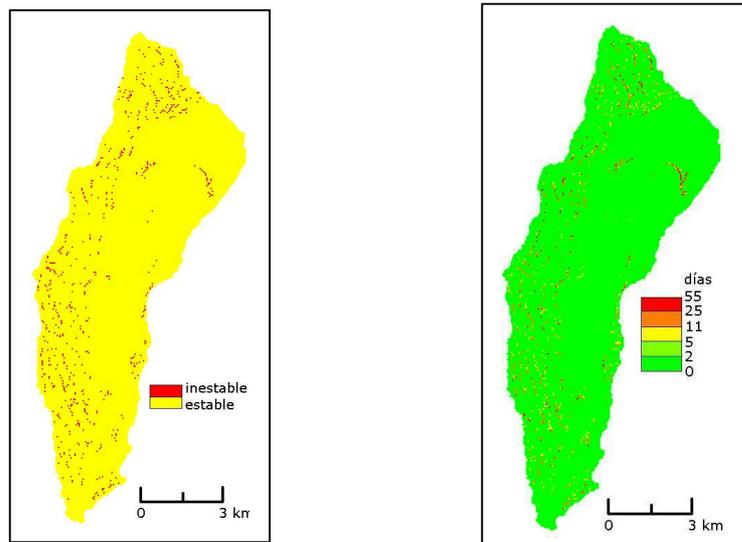


Figura 22. Zonas estables e inestables en la sub-cuenca Nimá I durante el Huracán Mitch (izquierda) y días totales de inestabilidad durante todo el año 1998 (derecha).

Como puede verse en la Fig. 22, las áreas más inestables durante la tormenta extrema del Mitch (entre 65-78 mm diarios, Fulgencio Garavito-INSIVUMEH-, comunicación verbal) se ubican hacia la parte oeste de la cuenca, la cual está conformada principalmente por lavas de baja densidad y poco consolidadas. La presión de poros es bastante alta en los escarpes rocosos ya que el agua subterránea se concentra en estos lugares antes de drenar en el cauce de los ríos por lo que disminuye considerablemente el valor de F . El período total de inestabilidad para el año Mitch alcanzó los 30 días (Probabilidad de Inestabilidad

Anual = 8%), sin embargo, las laderas no son influenciadas por la lluvia durante todo el año sino únicamente durante la época de invierno (ver Fig. 24) por lo que puede ser válido suponer que estos días de inestabilidad solamente ocurren durante la época lluviosa y por lo tanto la probabilidad de inestabilidad anual aumenta al 15% durante todo el invierno.

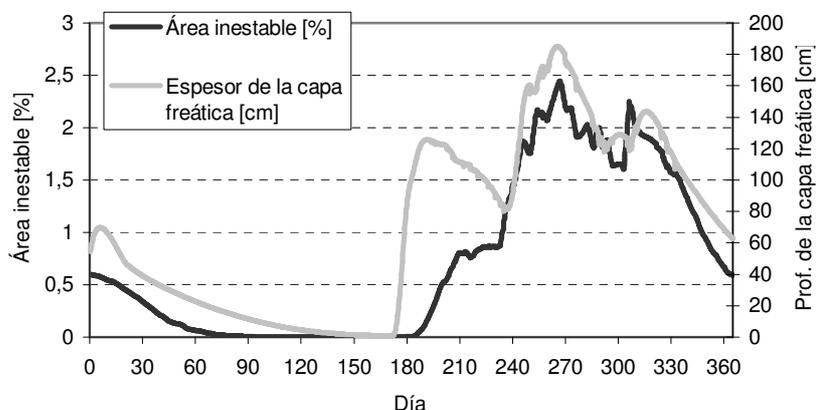


Figura 23. Gráfico que muestra el porcentaje de Área Inestable (con $F < 1.0$) – línea negra y el espesor promedio de la capa freática – línea gris durante el año 1998.

Al parecer, existe una correlación directa entre los cambios de espesor de la capa freática y la estabilidad de las laderas (Fig. 23, $r^2=0.79$). Al caer la lluvia el espesor de la capa freática aumenta y eso incide directamente en el área que se vuelve inestable. Es importante notar que la velocidad con que aumentan las dos variables es diferente: el agua subterránea reacciona más rápido a la precipitación que F (ver días 180 y 240 en Fig. 23) mientras que la disminución en la cantidad de precipitación no tiene el mismo impacto: el espesor de la capa freática disminuye con menor velocidad que el total del área inestable.

El análisis de estabilidad de laderas en la sub-cuenca Nimá I nos demuestra que las mayores inestabilidades no suceden durante la ocurrencia de un fenómeno extremo (Mitch) sino es mucho más importante el comportamiento de la lluvia en los períodos anteriores. Como puede verse en la Figura 23, el máximo porcentaje de inestabilidad en el área fue de casi 3 % y ese valor se alcanzó entre los días 263-271 (finales de septiembre), justo después de un período de precipitación abundante. En contraste, se observa que la tormenta de mayor intensidad del año (que sucedió en el día 170) provocó poca inestabilidad ya que en los días previos la precipitación había sido escasa y por eso el espesor de la capa freática era reducido. Estos hechos demuestran que la precipitación acumulada es más importante para la generación de inestabilidad de laderas que la intensidad de una sola tormenta.

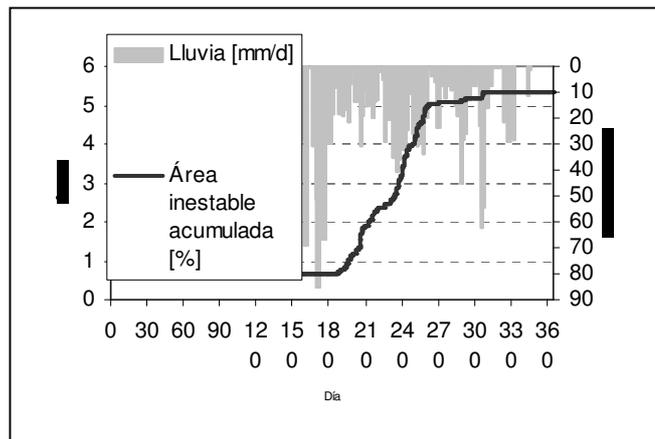


Figura 24. Gráfico que muestra el porcentaje de Área Inestable acumulada con relación al régimen de precipitación de 1998.

5.1 Análisis de amenaza por flujos piro-clásticos del Volcán Santiaguito.

Ing. Estuardo Lira e Ing. Manolo Barillas, Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), Oficina Guatemala.

En este apartado, se entiende como *flujos piroclásticos* a todos aquellos eventos generados directamente por los “domos” del Volcán Santiaguito y que se caracterizan por la producción inicial de una columna eruptiva compuesta por una mezcla de gas y piroclastos, que luego de elevarse hacia la atmósfera colapsa y se desplaza por gravedad y energía cinética a través de los flancos del volcán generando nubes ardientes y variados depósitos de pómez, cenizas y piroclastos (Fisher y Schmincke, 1984). Salvo algunas excepciones, estos eventos son precedidos por flujos de lava de magnitud variada.

Para el análisis de ocurrencia de flujos piroclásticos se utilizó el modelo de “*Cono de Energía*” (Fig. 24), el cual considera que si una columna eruptiva o un domo colapsa el flujo gravitacional que se genera se moverá hacia abajo del flanco del volcán bajo la influencia de la energía potencial y la gravedad (Malin *et.al.*, 1982). En caso de eventos explosivos, se adicionará un componente cinético a la energía del flujo provocando un desplazamiento ligeramente mayor (Sheridan, 1979). La aceleración del flujo gravitatorio en un punto dado estará definida por:

$$a = g (\text{Sen}\beta - \text{Tan}\theta \text{Cos}\beta) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\mu = \text{Tan}\theta = H/L \quad \text{Ecuación 2}$$

La aceleración de los flujos está gobernada por la fuerza de la gravedad (g), la pendiente local del cono volcánico y sus alrededores (β) y la tangente de la pendiente de la línea de energía (θ), ésta última conocida como Coeficiente de Heim. Este concepto de la línea de energía lo que define realmente es la relación entre la elevación de la columna de la erupción (H) y la máxima distancia de desplazamiento del flujo piroclástico (L), es decir, trata de representar la tasa de disipación de la energía total del flujo.

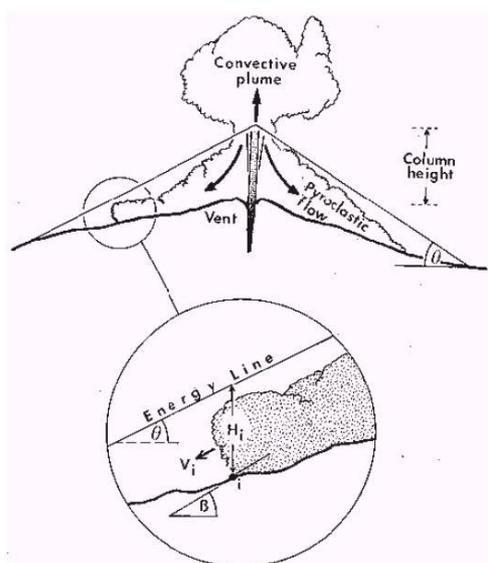


Figura 25. Esquema conceptual del modelo del Cono de Energía para flujos piroclásticos.

Tomado de Wadge et al., 1988.

En el cálculo de la extensión de las corrientes piroclásticas no se hace distinción entre los flujos piroclásticos y las oleadas piroclásticas. Sin embargo, por razones de simplificación se asume que ambos fenómenos se describen con el mismo Modelo del Cono de Energía. En realidad, los flujos y las oleadas representan procesos físicos diferentes, a pesar de que pueden ocurrir al mismo tiempo y exhibir una interacción muy cerrada. Los flujos piroclásticos son más densos que las oleadas y tienden a seguir los valles a pesar de que son capaces de superar pequeñas barreras. Las oleadas piroclásticas son turbulentas, fluyen cerca de la superficie y, dependiendo de su densidad y velocidad, se pueden mover fácilmente en forma ondulada, de arriba hacia abajo en los cerros.

Si se dispone de suficientes datos de campo de los límites y alcances de diferentes depósitos piroclásticos de procedencia identificada se puede calcular un rango muy aceptable de los parámetros de Heim y luego por un análisis estadístico se pueden obtener tendencias de probabilidad espacial de ocurrencia de los flujos piroclásticos (Sheridan *et al.*, 1995). Sin embargo, cuando no se dispone de la información suficiente, como es el caso de este análisis, se deben utilizar los valores reportados en la literatura para otras erupciones similares del propio cono o de otros.

Se utilizaron en este análisis los criterios sugeridos por Sheridan *et al.* (1983) y Wadges *et al.* (1988) que describen los parámetros necesarios para la implementación práctica del Modelo del Cono de Energía en tres dimensiones, los cuales son:

- ✓ *Ubicación del cráter.* Este es un factor muy importante ya que si el cráter activo está situado en un flanco del volcán en lugar del ápice cambiará drásticamente el control de la dirección de la corriente piroclástica.
- ✓ *Altura de colapso.* La elevación de la columna eruptiva por encima del cráter es directamente proporcional a la energía de la erupción.
- ✓ *Ángulo de colapso.* Este ángulo indica la pendiente del cono de energía (Coeficiente de Heim) que define la línea de energía apropiada para un tipo específico de erupción.

- ✓ *Topografía.* Se necesita conocer las elevaciones de la superficie de dispersión del flujo piroclástico. En nuestro caso, este parámetro está representado por el Modelo Digital del Terreno (DTM).
- ✓ *Distancia del cráter.* Se necesita un mapa que represente las distancias desde el cráter hacia todos los puntos de posible dispersión de los flujos piroclásticos. Este mapa puede calcularse a partir del DTM.

En la Tabla 1 se presentan algunos coeficientes de Heim para diferentes aparatos volcánicos y tipos de erupción lo cual evidencia que los flujos piroclásticos más grandes tienen coeficientes de Heim menores de 0.2 y desplazamientos mayores de 10 km.

Con valores específicos para H_c (altura de la columna) y μ (Coeficiente de Heim) se pueden realizar los cálculos siguientes:

$$CONO = H_{\text{cráter}} + H_c - \mu * \text{Distancias}$$

$$\Delta H = CONO - DTM$$

ΔH es la diferencia de elevación entre el Cono de Energía y el terreno por lo que todos los valores mayores a 0 estarán en Zona de Amenaza, los menores a 0 estarán fuera de la influencia del flujo piroclástico, y por consiguiente, de la zona de amenaza y los valores iguales a 0 representarán los puntos en que el Cono de Energía se intersecta con el terreno y por lo tanto la energía de disipación del flujo también es igual a 0. En teoría, estos serán los puntos más lejanos en los que se podrán encontrar evidencias deposicionales y/o estructurales de la ocurrencia de los flujos piroclásticos.

Tabla 4. Relaciones de H_c/L para diferentes tipos de erupción.

<i>Erupción</i>	<i>H/L</i>	<i>Dif. Elevación H (m)</i>	<i>Desplazamiento L (m)</i>
Aira caldera, Ito pf	0.06	4200	70000
Aso caldera, Aso 4 tuff	0.06	4560	76000
Aira caldera, Ito pf	0.07	4200	60000
Long Valley Caldera, Bishop tuff	0.08	4560	57000
Aso caldera, Aso 4 tuff	0.09	4500	50000
Aira caldera, Ito pf	0.11	3850	35000
Long Valley Caldera, Bishop tuff	0.11	4620	42000
Long Valley Caldera, Bishop tuff	0.12	4440	37000
Valles caldera, Bandelier tuff	0.14	4620	33000
Long Valley Caldera, Bishop tuff	0.15	4500	30000
Valles caldera, Bandelier tuff	0.16	4640	29000
Valles caldera, Bandelier tuff	0.19	4560	24000
Katmai 1912	0.20	4400	22000
Unzen 1991	0.22	1200	5455
Hibok-Hibok dec 1951	0.27	500	1852
Santiaguito sept 1973	0.30	500	1667
Asama 1783 Kambara tuff	0.30	3000	10000

<i>Erupción</i>	<i>H/L</i>	<i>Dif. Elevación H (m)</i>	<i>Desplazamiento L (m)</i>
Komagatake 1929	0.31	1000	3226
Santiaguito abril 1973	0.36	500	1389
Mayon 1968	0.45	600	1333
Mayon 1968	0.47	600	1277
Mayon 1968	0.50	600	1200
Unzen 1991	0.50	600	1200
Asama 1783 Agatsuma tuff	0.53	3000	5660
Mayon 1968	0.57	600	1053
Ngauruhoe 1974	0.74	500	676

Tomado de: Sheridan, (1979); Sheridan *et al.*, (1983) y Yamamoto *et al.*, (1993).

El análisis realizado en el Volcán Santiaguito comprende la evaluación de 7 diferentes escenarios con variaciones de alturas de columna eruptiva (600 a 2,500 m) con el Coeficiente de Heim obtenido de las erupciones de 1973.

Básicamente, se determinó que los grandes centros urbanos (Quetzaltenango, Retalhuleu y San Sebastián) no serían afectados por columnas eruptivas de hasta 2,500 m. Sin embargo, más de 120 centros poblados (fincas, aldeas y caseríos) se encuentran ubicados en la zona de Baja Amenaza lo cual significa que más de 40,000 personas (MAGA, 2001) tienen el 40% de probabilidades de verse afectadas por un evento de tal magnitud. Además, se vería afectada la carretera que conduce hacia la ciudad de Quetzaltenango y una línea eléctrica de 69Kv que atraviesa la zona en dirección casi norte-sur. Esta zona de Baja Amenaza corresponde aproximadamente con el alcance que tuvo el flujo piroclástico de 1929 (Rose, 1987).

En el área de Amenaza Media (60% de probabilidad), se ubican hasta 19 centros poblados, fincas cafetaleras que ya han sufrido daños anteriores (La Florida, El Faro y El Patrocinio) y que juntas podrían agrupar hasta 1,500 personas. Esta zona equivaldría a una zona de transición entre ocurrencia de eventos moderados (1929) y eventos pequeños (1973) y correspondería al área de afectación por flujos de lava.

Finalmente, a pesar de que el área de Alta Amenaza (80-100%) incluye únicamente 2 centros poblados (Santo Domingo Palajunoj y San José Patzulín) – 47 personas, podría tener una mayor importancia como “*área fuente*” de material volcánico (piroclastos y lavas) para la formación de lahares y flujos de lodo a lo largo del río Nimá I y El Tambor.

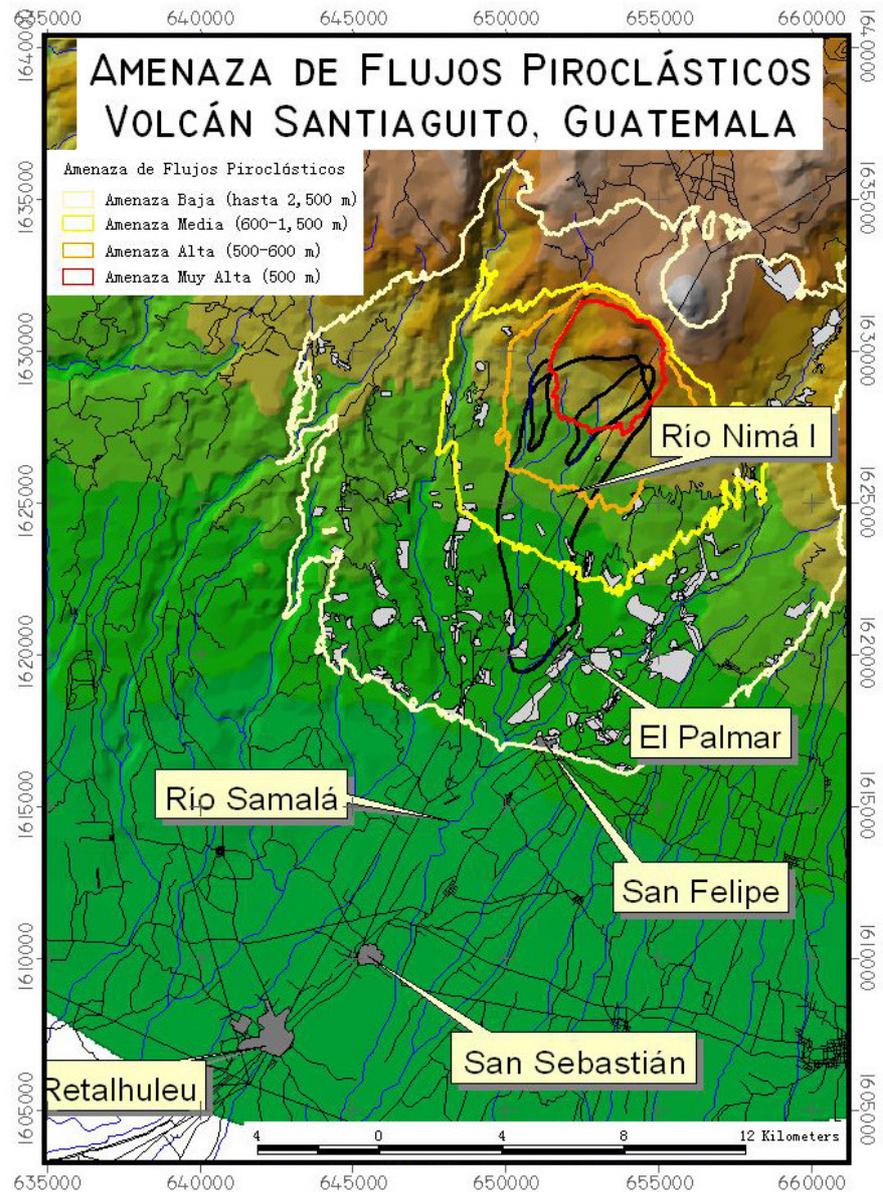


Figura 26. Resultados del análisis de amenaza por flujos piroclásticos del Volcán Santiaguito. La red vial dentro de las áreas de amenaza da una idea de la gran cantidad de centros poblados ubicados en dichas áreas (caseríos, fincas y aldeas). Los polígonos negros indican el área afectada por los flujos piroclásticos de 1929 (polígono grande) y de 1973 (polígonos pequeños), ambos tomados de Rose, 1987.

5.2 Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo en el poblado de San Sebastián, Retalhuleu.

Graciela Peters M.Sc., Instituto Internacional de Ciencias de la Geo-información y Observación Terrestre (ITC), Holanda.

En su trabajo de investigación, Peters y colaboradores (2003) argumentan que en áreas con escasez de datos y presupuesto bajo o inexistente para ser invertido en la captura de información como San Sebastián es muy difícil realizar un análisis convencional de riesgo por inundación ya que se necesitan datos muy precisos de precipitación y caudales para generar modelos hidrológicos con descargas máximas, distribución transversal de tirantes de agua y planicies de inundación. En su lugar, promueven la idea de realizar análisis de amenaza, vulnerabilidad y ‘pérdidas o daño esperado’ por medios de técnicas que se apoyan en fuentes secundarias de información y recuentos históricos de la comunidad que por constituyen la “memoria colectiva” de los pobladores afectados. Este conocimiento puede ser recolectado por medio de técnicas que han venido utilizándose eficazmente por organismos como la Cruz Roja Internacional y que usan mecanismos como entrevistas con líderes comunitarios y actores interesados, muestreos del área investigada y censos a pequeña escala. Cuando esta información es recolectada de manera sistemática puede ser posteriormente ordenada y procesada en una base de datos.

En el análisis se realizó inicialmente foto-interpretación convencional para determinar patrones y efectos de daños por inundación en el tiempo. Se utilizaron fotografías aéreas de 1964, 1991 y 2001, éstas últimas, proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, de mayor resolución y precisión sirvieron para la elaboración de la base de datos catastral y digitalización de manzanas, lotes y techos. Los atributos físicos y socioeconómicos de la base de datos fueron recolectados por medio de muestreos y entrevistas personales directas para lo cual se contó con la colaboración de personal voluntario del Grupo FEMID (Fortalecimiento de Estructuras Locales para la Mitigación de Desastres), el cual opera en la localidad desde hace varios años gracias a proyectos de la Agencia de Cooperación Alemana (GTZ) y CONRED. Las entrevistas se centraron principalmente en la recopilación de datos de daños a viviendas y sus contenidos, altura alcanzada por el agua y otras características de la inundación provocada por el paso del Huracán Mitch en noviembre de 1988 (Fig. 27).

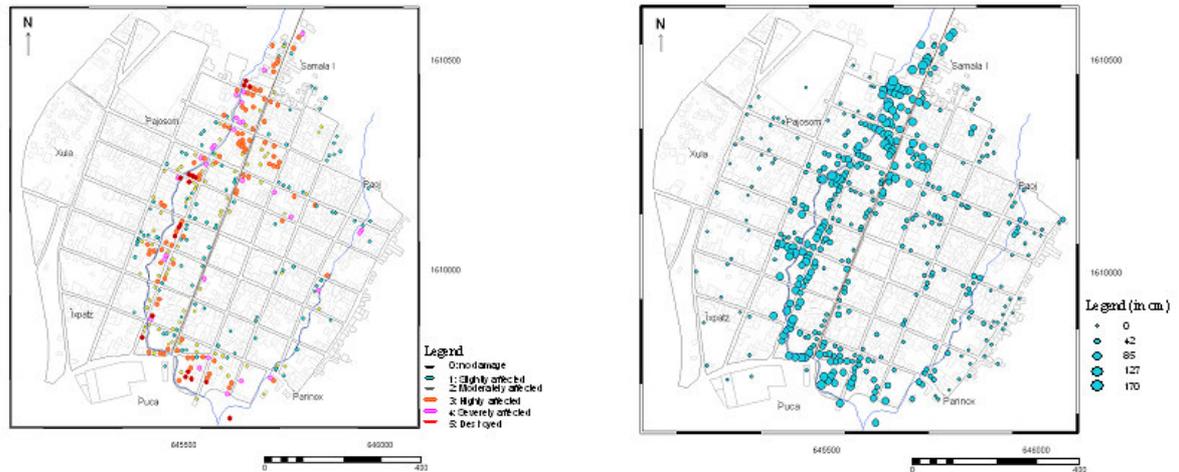


Figura 27. Mapa de Daños en Edificios (izquierda) y Altura de Agua (derecha) para la inundación Mitch 1998 en la zona urbana de San Sebastián. Tomado de Peters *et. al.*, en prensa.

Seguidamente, los puntos de altura de agua fueron interpolados (por el método de Krigging en ILWIS) y se generó un Modelo Digital que recrea la inundación de 1998 en el área de estudio (Fig. 28).

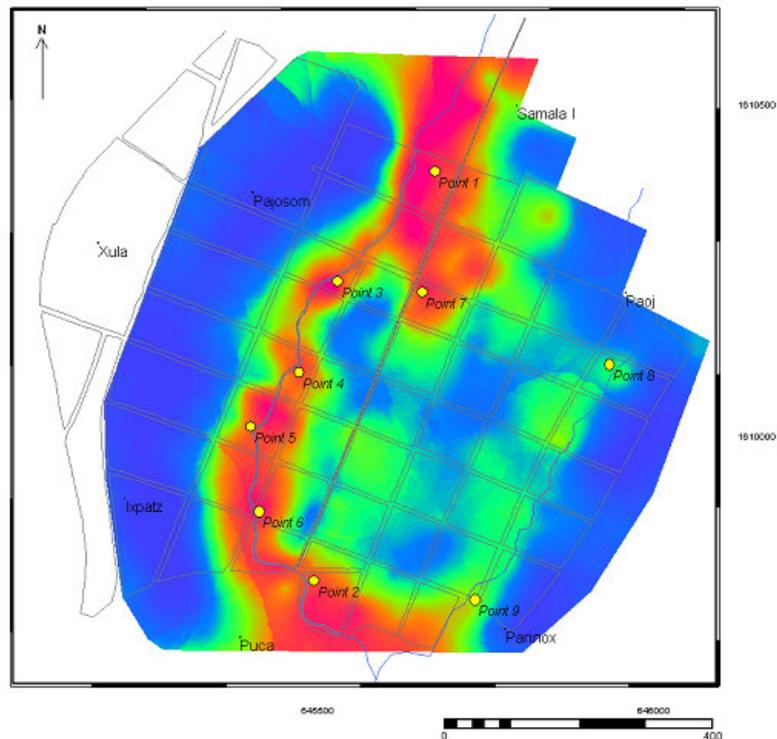


Figura 28. Modelo Digital de la inundación Mitch 1998 en la zona urbana de San Sebastián. La zona roja corresponde a las mayores profundidades de agua y en el otro extremo los tonos azules representan las zonas no afectadas. Tomado de Peters *et. al.*, en prensa.

El mapa de Altura de Agua muestra que la inundación de 1998 ocurrió en los 4 cantones urbanos de San Sebastián particularmente aquellos que están localizados cerca de los ríos Ixpatz y Cachel y a lo largo de la Avenida Central. El análisis a detalle de las áreas más afectadas revela que en cierto momento, la altura de la inundación alcanzó una altura mayor a los 130 cms en dos sectores (puntos 1 y 2 de la Fig. 28), en donde se reportaron 6 casas destruidas, 3 severamente dañadas y 16 altamente dañadas. Los adoquines que cubrían las principales calles y avenidas fueron completamente removidos y luego fueron utilizados por los vecinos para formar barreras de protección en el frente de sus casas. La carretera que comunica a San Sebastián con la Carretera Panamericana también sufrió graves daños ya que el asfalto fue totalmente removido y amontonado a ambos lados. En otros puntos críticos (8 y 9 de la Fig. 28), localizados a lo largo del río Cachel, se determinó que las causas principales del desbordamiento del río fueron la estrechez del canal derivado de la construcción de casas en sus riveras y el relleno del mismo con desechos y basuras arrojadas por los propios pobladores. A pesar que no existen datos puntuales de intensidades de lluvia se considera que las precipitaciones sucedidas durante el Huracán Mitch son una de las más fuertes en la historia reciente por lo que fácilmente pueden catalogarse hipotéticamente como valores máximos de inundaciones de 25 a 50 años de retorno.

El análisis de vulnerabilidad se llevó a cabo para tres de los principales elementos urbanos: edificios, contenido de edificios y vías de comunicación. Para determinar la vulnerabilidad de los edificios ante una inundación como la evaluada se tomó en cuenta tres factores:

- ✓ **Altura de columna de agua afectando cada punto individual.** En este paso se tomó en cuenta la altura de la vivienda con respecto al nivel de la calle. Este valor se restó de la altura de la inundación en ese punto específico con el fin de determinar la ‘columna de agua’ precisa que afectó cada construcción.
- ✓ **Ubicación del lote con respecto a las corrientes de agua.** Se elaboró un mapa de distancias de los ríos Ixpatz y Cachel así como de la Avenida Central (que en aquel evento funcionó como canal) y luego se calcularon las distancias promedio de cada uno de los lotes a estas corrientes.
- ✓ **Material de construcción de las casas.** En este caso, se utilizó el material que tenían las viviendas antes de ser afectadas por la inundación, principalmente para aquellas viviendas que fueron destruidas completamente.

En general, se determinaron 3 principales tipos de materiales de viviendas: concreto reforzado y mampostería (columnas de concreto reforzado con hierro y paredes de ladrillo todas repelladas), madera (tableros horizontales o verticales sin cimientos) y mixtas (paredes de hasta 70 cm de block, ladrillo o piedra y coronadas por madera). Solamente las casas construidas de madera y mixtas sufrieron en algunos casos una destrucción total aunque las mixtas mostraron una mayor eficiencia contra el impacto de las corrientes debido a la pared basal de material resistente. Las casas edificadas de concreto reforzado en ningún caso fueron totalmente destruidas.

Los datos recolectados del daño sufrido por edificios fueron clasificados de acuerdo a la tabla 5. Para edificaciones del mismo tipo los niveles de daños

experimentados fueron ploteados versus la altura del agua que los provocó con el fin de encontrar una correlación. Igualmente, se hizo un ploteo del daño sufrido por los edificios versus la distancia de los mismos a las corrientes de agua, ya que esto se consideró como un indicador de la velocidad de flujo. Algunos de los resultados se muestran en la Figura 29.

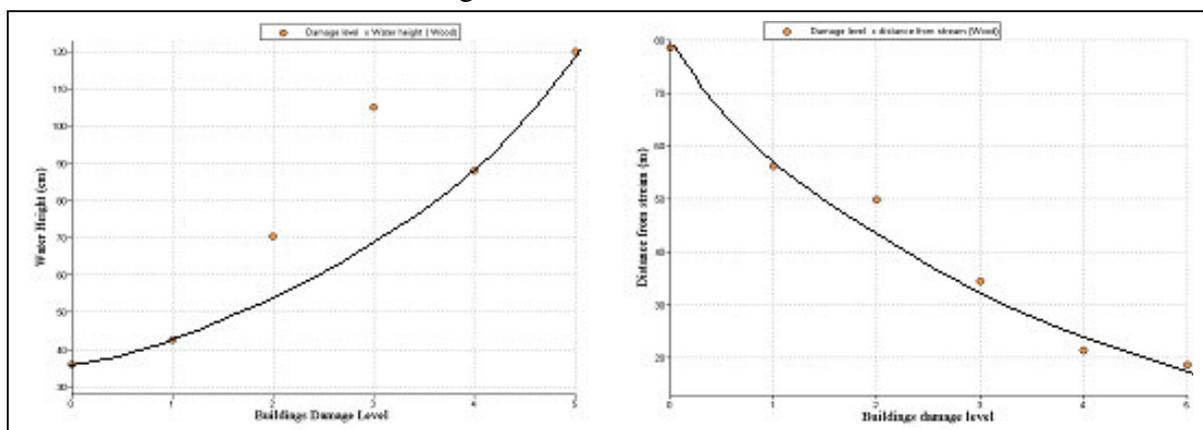


Figura 29. Curvas de Vulnerabilidad: daño de construcciones en madera vrs. altura del agua (izquierda) y daño de construcciones en madera vrs. distancia a la corriente (derecha).

Tomado de Peters *et. al.*, en prensa.

A partir de estas gráficas fueron construidas curvas de daños desde 0 (sin daño) a 1 (daño total). Posteriormente se produjo un Mapa de Vulnerabilidad de las Construcciones ante Inundaciones (Fig. 30).

La vulnerabilidad de los contenidos de las construcciones fue determinada con base a factores de valor de reemplazo del contenido y al porcentaje de daño de los contenidos. Para tal efecto y con base en la valoración socioeconómica del área de estudio se definieron 4 clases principales: Clase Baja, Media Baja, Media y Media Alta. Esto se hizo debido a que los contenidos de las viviendas varían drásticamente en función de la clase socio-económica y del número de habitantes. En la investigación se encontraron 3 características implícitamente relacionadas:

- ✓ **Fuerte influencia indígena.** La mayoría de los habitantes tienden a mantener sus valores en forma de joyería en lugar de poseer utensilios y muebles de gran valor.
- ✓ **Número de habitantes/vivienda.** Se tomó un valor promedio reportado por estudios anteriores de 4.9 habitantes/vivienda para las clases Media y Media Alta y de 7.0 para las clases Baja y Media Baja.
- ✓ **Listado de contenidos estándar.** En muchos casos se detectó que ciertos artículos se encontraban en todas las clases de viviendas pero el precio y el número de los mismos por vivienda variaba de acuerdo al nivel de ingreso.

Teniendo en cuenta cuatro valores de altura del agua de inundación (menos de 30 cm, menos de 50 cm, menos de 90 cm y mayor de 90 cm) se evaluó el grado de vulnerabilidad de 0 a 1 para cada artículo en cada una de las listas. Este valor representa el porcentaje de daño esperado el cual se multiplicó por el precio del artículo. Posteriormente, se calculó un valor total de vulnerabilidad para cada lista (o nivel socioeconómico), por cada una de las alturas de agua evaluadas, sumando las pérdidas esperadas de los artículos individuales y dividiéndolo por el costo total de la lista.