

CUADRO 2.47: PROPUESTA PARA LA GESTIÓN SOCIAL DE RIESGOS EN SANTIAGO ATITLÁN

OBJETIVOS	ACTORES	ACCIONES/OBSERVACIONES
Fortalecer la conciencia pública	Población de Panabaj y municipalidad.	Sensibilización, retroalimentado de las lecciones aprendidas.
Fortalecer la organización comunitaria	OG's, universidades, ONG's y municipalidad.	Capacitando, incidiendo a nivel educativo escolar y siendo incluyentes. Haciendo efectiva las leyes y Código Municipal en lo referente al tema de desarrollo y descentralización.
Legislar el tema de riesgos a nivel municipal y departamental (políticas públicas)	CONRED, Gobernación Departamental, municipalidad y líderes comunitarios del departamento de Sololá.	Con apoyo jurídico, enfoque de políticas públicas y enfoque participativo local.
Monitoreo, evaluación y seguimiento del trabajo realizado en el tema de gestión de riesgo.	Universidades, CONRED, COCODE, ONG's, municipalidad y población de Panabaj.	Debe ser permanente y hacerse en cada fase. Aprendiendo de la experiencias.
Investigar: Estudio de desarrollo urbano y rural. Estudio de gestión de riesgos.	Universidades, ONG's, OG's, municipalidad y población de Panabaj.	Con la participación de equipo multidisciplinarios a nivel técnico y profesional. Poniendo énfasis el combate a la pobreza y seguridad alimentaria. Previo a habitar áreas y edificios afectados.
Establecer un plan para conocer pronósticos de fenómenos naturales.	INSIVUMEH y municipalidad.	Con el fin de estructurar mecanismos de alerta temprana que permitan otorgar amplio tiempo de reacción ante amenazas.
Reconstruir las comunidades afectadas, considerando ambitos: humano, social, cultural, material y económico.	OG's, municipalidad, ONG's, universidades y población de Panabaj.	Valorando, respetando y tomando en cuenta la articulación de la estructura de la comunidad.
Fortalecer proceso de descentralización municipal.	Municipalidad, COMUDE y COCODES	Considerando el marco jurídico existente para ello y capacitar a la población en cuanto al tema.
Inclusión social: género.	Toda la población e instituciones.	Inciendo en políticas públicas, campo educativo, familiar, local y nacional.
Formar y capacitar a la COLRED	Municipal, COMUDE, COCODE y CONRED.	En forma permanente y con recurso humano capacitado de la comunidad.
Inclusión social: étnica.	Toda la población e instituciones.	Considerando y valorando los aspectos culturales y sociales de la comunidad.

Fuente: CORDILLERA 2006

2.5.4. Consideraciones finales acerca de la dimensión social, política, y judicial del desastre

Existen iniciativas locales para la reconstrucción de la zona siendo una de las principales la formulada por parte de la municipalidad la cual se incluye en el Anexo I. El proceso de reconstrucción se ha visto polarizado por la falta de consenso entre los actores protagónicos de la zona acerca de la selección del lugar preciso para la construcción de nuevas viviendas. Se construyeron cerca de 100 nuevas casas en un sector de alto riesgo de Tzanchaj las cuales ahora tienen la categoría de inhabitables. La complejidad de la amenaza por flujo de detritos, que involucraría intervenciones estructurales en por lo menos 4 microcuencas, le proporciona un muy bajo grado de viabilidad a intervenciones estructurales para la mitigación de las amenazas y no estimula de ninguna manera la permanencia de los habitantes de Panabaj, Tzanchaj, y en menor proporción Panul-Chuul-Pachichaj en los sitios que han sido afectados por los flujos de detritos. Estos escenarios de riesgos apuntan a la implementación de un proceso de movilización de los aproximadamente 8,000 habitantes en zonas de riesgo a sectores más seguros dentro del municipio.

El proceso de reconstrucción también se ha estado implementando de manera independiente por parte de algunos pobladores a lo interno de la comunidad de Panabaj, por encima de los flujos de lodo que sepultaron a los residentes. El Alcalde de Santiago ha visitado la comunidad para persuadir a algunos habitantes de que no continúen con la construcción de casas nuevas en el centro del lugar donde ocurrió el desastre pero sus intentos no han fructificado y por el contrario se reporta una actitud agresiva de algunos residentes en contra de las Autoridades Municipales y una voluntad de continuar con la construcción de casas nuevas. Este escenario apunta que las estrategias locales de gestión de riesgos deben orientarse en dos ejes fundamentales: 1. fortalecimiento de la gobernabilidad mediante la formulación de un Plan de Fortalecimiento Municipal y su posterior implementación, y 2. implementación de un programa de sensibilización y concientización ciudadana acerca del desastre.

La reubicación de la población expuesta a alto riesgo en un sector más seguro enfrenta el principal obstáculo de que el precio de la tierra ha estado sujeto a fuerte especulación en el sector norte del municipio donde existen las zonas más seguras. La zona tiene vocación turística lo cual también ha incidido en un alto precio de los terrenos. Se tiene conocimiento de que cerca del 25% del territorio de Santiago es comunal pero debido a que el catastro no está hecho no se tiene conocimiento de la distribución espacial precisa de estos terrenos. De acuerdo al Cabecera Mayor la mayoría de estos terrenos se encuentran cerca de los cráteres de los volcanes lo cual los hace inutilizables para vivienda.

Los escenarios antes descritos demandan la formación de una mesa de diálogo que permita alcanzar un consenso, entre líderes tradicionales y organizaciones formales (Municipalidad, COCODE, Alcalde Auxiliar, Comité de albergues y otros), para llegar a acuerdos que beneficien a la comunidad en la etapa de reconstrucción. También se propone que los resultados de la presente evaluación de riesgos sean tomados en cuenta para la selección del sitio final a donde se reubicarían los pobladores afectados.

El problema central de la reconstrucción gira alrededor de la problemática arriba descrita pero para una gestión integral de riesgos también deben de tomarse en consideración las siguientes conclusiones y propuestas que se muestran en el Cuadro 2.48.

CUADRO 2.48. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA LA GESTION INTEGRAL DE RIESGOS.

CONCLUSIONES	PROPUESTA
Noventa por ciento de la población en pobreza. Disminuido esto por la destrucción de campos de cultivo, bajó plusvalía del área y problemas en la salud mental.	Reconstrucción del tejido social generando programas: educativo, salud mental, alimentos, organización comunitaria, proyectos productivos y de capacitación. (Formar comunidad modelo de reconstrucción).
Época de lluvias estará presente en corto plazo. Lo que representa una amenaza severa a la población que habita próxima a las cuencas secas y áreas contiguas.	Elaboración e implementación de Plan de Emergencia y Rutas de Evacuación; refuerzo de los albergues actuales.
Centro de Justicia ubicado en la comunidad, ha sido limpiado y reparado ciertos daños. Centro de Justicia promueve desarrollo, seguridad, estímulo a la población del Cantón. Si se habilita, esto influirá que la densidad población se incremente.	Postergar su rehabilitación y uso de éste, otros inmuebles y áreas, hasta tener resultados técnicos y haber cumplido con obras y recomendaciones que éstos brinden por seguridad. Establecer una política de desarrollo urbano y rural en la comunidad, normas de urbanización que contemple el tema de riesgo.
La población es culturalmente Iz'utujil. Los índices de analfabetismo elevados y los de escolaridad baja.	Todo programa debe considerar como prioridad para desarrollar cualquier proyecto los siguientes elementos: Incluir ejes transversales relacionados a los temas de: equidad de género, democracia participativa y derechos humanos.
No está conformada la COLRED en la comunidad u otra organización que cumpla sus funciones.	Organizar y fortalecer la COLRED en forma sostenible. El Representante de CONRED para la Región, aparte de no contar con el equipo básico para el desarrollo de su labor, tiene a su cargo 18 municipios uno de los cuales es Santiago Atitlán. Es evidente que la demanda por servicios de gestión de riesgos de la región rebasa notablemente la oferta, en este caso la capacidad institucional de CONRED por lo que resulta imprecisible fortalecer a CONRED no solo en su sede central sino en las sedes regionales y departamentales
Los líderes de la comunidad participan en forma activa en el proceso de descentralización a nivel municipal.	Fortalecer a líderes comunitarios en este tema.
Población de la comunidad insatisfecha por apoyo recibido en la reconstrucción de su Cantón. Se sienten "olvidados por que no se les daño sus viviendas" " Sólo se toma en cuenta a quienes perdieron viviendas y no cultivos"	Inclusión a la población de T'zanchaj en la etapa de reconstrucción. Es comunidad vecina, con las mismas características, socioeconómicas y habitan un sector físico compartido. Formar la Mancomunidad de Cantones Panabaj y T'zanchaj, en el proceso de desarrollo y descentralización.
Los centros educativos tienen carencias de tipo: falta de docentes, mejoramiento del edificio, refacción escolar no llega, equipamiento. Atienden a niños (a) de familias en extrema pobreza.	En el programa de reconstrucción, dar prioridad a solventar problema educativo y seguridad alimentaria en niñez y juventud.
Municipalidad débil; Oficina de Planificación Municipal, no cuenta con suficiente recurso humano técnico y profesional, así como de equipamiento.	Elaborar Plan de Fortalecimiento Municipal; Dotar a la Oficina de Planificación Municipal de personal y equipo para atender las necesidades que requieren los distintos órganos de la municipalidad en su proyección y satisfacción de necesidades prioritizadas de la población del municipio.

Por otro lado, el país no cuenta con una Ley de Aguas que permita regular en el mismo sentido. Aún el proyecto de Ley de Aguas que se encuentra estancado en el Congreso de la República no toma en cuenta que los cauces fluviales migran (especialmente en abanicos aluviales y zonas torrenciales como las de Panabaj y Tzanchaj) y cambian de sección durante las inundaciones. De este modo, resulta importante que las definiciones legales en gestión de riesgos tomen en cuenta criterios geomorfológicos y sedimentológicos.

Los aspectos fundamentales del Código Municipal vigente, aparte de que no consideran la temática de riesgos, no han sido aplicados para la elaboración de planes de ordenamiento territorial específicos de las microcuencas donde puede volver a registrarse otro desastre. La Municipalidad de Santiago Atitlán no cuenta con un Reglamento de Construcción de modo que las tendencias imperantes se basan en el mercado y la intuición de los habitantes quienes al no estar sensibilizados y/o concientizados acerca del desastre continúan construyendo sitios de alta peligrosidad. Se desconoce hasta que punto los Estudios de Impacto Ambiental realizados en la zona han tomado en consideración la temática de riesgos aparte de que el MARN basado en la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente no enfatiza la temática de riesgos y desastres. Por las dimensiones sociales del desastre ocurrido cualquier EIA que se realice en la zona debería de tomar en consideración esta temática.

En algunos países la insuficiencia de los criterios legales en seguridad ha llevado al desarrollo de Criterios de Aceptabilidad Social del Riesgo pero no se tiene conocimiento de la existencia de este tipo de criterios para la gestión de riesgos en el país. Una de las formulaciones más difundidas en este tipo de criterios es el tipo F-N, siendo F la frecuencia anual esperable de un suceso que puede producir N muertos. Este criterio ha sido adoptado en forma concreta por el Gobierno de Hong Kong²³ y muy bien puede explorarse la posibilidad de utilizarlo en Guatemala.

La legislación del país es insuficiente para una gestión adecuada de riesgos naturales. Si bien la Ley de CONRED y la Ley de Desarrollo Social contemplan algunos aspectos interesantes no se han aplicado eficientemente para una reducción efectiva de desastres y no toman en cuenta la seguridad específica de la población ante deslizamientos, inundaciones y/o flujos de detritos.

En países como España e Italia un desastre donde han muerto un promedio de 100 personas²⁴ ha ocasionado que se ponga en marcha un proceso de revisión de todo el marco en que ocurrió la tragedia llevando normalmente a la decisión de declarar la zona donde se registró el desastre como no urbanizable.

Los desastres como el ocurrido en Panabaj pueden ocasionar un debilitamiento de los poderes públicos los cuales pueden ser sometidos a cuestionamiento por los medios de comunicación y por la ciudadanía la cual puede dudar de la capacidad del Gobierno para cumplir con lo que señalan el Artículo 1 y el Artículo 3 de la Constitución Política de la República. Sin embargo, se considera que dentro del marco legal vigente en el país puede llevarse a cabo una gestión efectiva de riesgos que permita reducir vulnerabilidades en la zona de Santiago Atitlán.

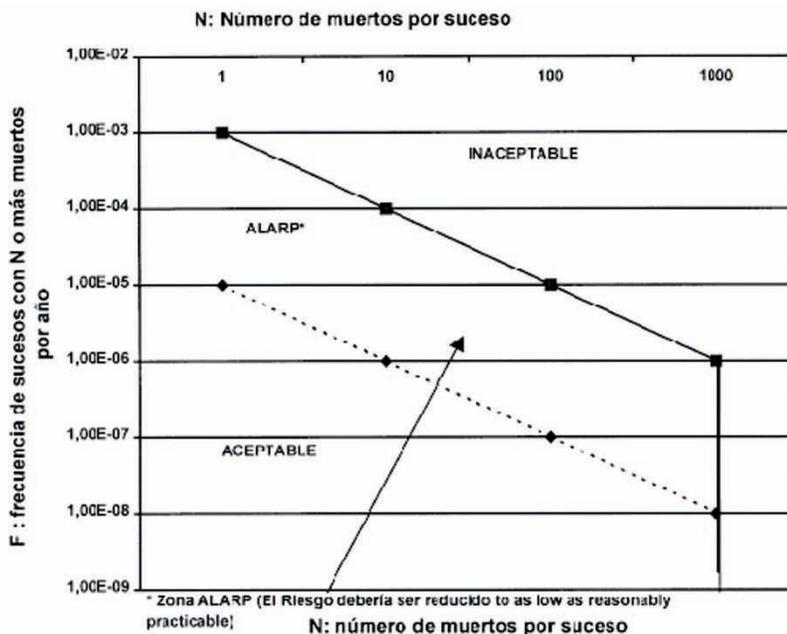


Figura 1. Criterio de Aceptabilidad Social del Riesgo del Gobierno de Hong Kong (Wrigley y Tromp, 1995)

²³ Wrigley, Y and Tromp, F., 1995, Risk management of major hazards in Hong Kong, in Melchor & Stewart (Editors): Integrated Risk Management. Balkema. P. 37-41

²⁴ Ayala-Carcedo, F., 2000, Riesgos Naturales. Editorial Ariel. 1150 p.

2.6. Fuentes de referencia

Bibliografía:

1. Cahuec, Eleuterio, s.f. HISTORIA Y MEMORIAS VOLUMEN II, COMUNIDAD ÉTNICA TZ'UTUHIL. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
2. IGN (Instituto Geográfico Nacional), 1981. DICCIONARIO GEGRÁFICO NACIONAL, TOMO II. Guatemala: Tipografía Nacional. Compilación crítica Francis Gall.
3. INE (Instituto Nacional de Estadística), 2003. Cracterísticas de la población y de locales de habitación. Censos nacionales XI de población y VI de Habitación, 2002. Julio. Guatemala.
4. FUNCEDE (Fundación Centroamericana para el Desarrollo); et al., 1994. DIAGNÓSTICO DEL MUNICIPIO DE SANTIAGO ATITLÁN DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ. Guatemala.
5. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). DIVERSIDAD ÉTNICO CULTURAL: LA CIUDADANÍA UN ESTADO PLURAL. INFORME NACIONAL DE DESARROLLO HUMANO. Guatemala.

Documentos:

1. ADECCAP (1) (Asociación para el Desarrollo Comunitario del Cantón Panabaj), 2006. ACTA DE ASAMBLEA 22 DE ENERO 2006. Cantón Panabaj, Santiago Atitlán, Sololá Guatemala.
2. ADECCAP (2) (Asociación para el Desarrollo Cominitario del Cantón Panabaj), 2006. HISTORIAL DE ADECCAP. Cantón Panabaj, Santiago Atitlán, Sololá Guatemala.
3. Centro de Salud, Santiago Atitlán, Sololá, 2005. CONSOLIDADO CENSO DE POBLACIÓN POR GRUPO DE EDAD, DISTRIO 4 SANTIAGO ATITLÁN, AÑO 2005. Guatemala.
4. Mogollón Narciso, Juan Luis, 2004. MONOGRAFÍA DEL DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Humanidades Departamento de Pedagogía, Sección Sololá.
5. Municipalidad de Santiago Atitlán, 2005. MENSAJE AL MUNDO POR LA SIUTACIÓN QUE VIVIEN LAS FAMILIAS DAMNIFICADAS, AZOTADAS POR EL HURACÁN STAN EN EL MUNICIPIO DE SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLÁ. Guatemala.
6. MSPAS (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social), 2005. INDICADORES DE SALUD DE: SOLOLÁ MUNICIPIO DE SANTIAGO ATITLÁN. Guatemala: Dirección General del Sistema Integral de Atención en Salud, Departamento de Epidemiología.
7. UTM (Oficina Municipal de Planificación-Unidad Técnica Municipal de la municipalidad de Santiago Atitlán), 2006. REPORTE DE DAÑOS CAUSADOS POR LA TORMENTA TROPICAL STAN EN EL MUNICIPIO DE SANTIAGO ATITLÁN 04,05 Y 06 DE OCTUBRE 2005. Santiago Atitlán, Sololá Guatemala.

Entrevistas:

INFORMANTE N° 1

Agricultor

Cantón Panabaj, Santiago Atitlán Sololá.

Fecha de la entrevista 05 de abril de 2006.

Por seguridad se abstiene a dar nombre de la persona informante.

AJANEL DAMIAN, Tomas

Presidente de COCODE

Cantón T'zanchaj, Santiago Atitlán Sololá.

Fecha de entrevista 06 de abril de 2006.

BOTAN, CHIVILIU, Ana

Lider del grupo de mujeres ADECCAP

Cantón Panabaj, Santiago Atitlán Sololá

Fecha de la entrevista: 04 de abril 2006

COCHE ESQUINA, Juan Esteban

Director de Escuela Nacional de Autogestión Comunitaria
Cánton T'zanchaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de entrevista: 06 de abril 2006

COCHE PABLO, Francisco

Presidente de COCODE
Cánton Panabaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de entrevista: 05 de abril 2006

CRISTAL, Gaspar

Personal permanente Cuerpo de Bomberos Voluntarios 45° Compañía, Santiago Atitlán, Sololá.
Fecha de entrevista: 06 de abril 2006.

CHOJPEN, Domingo

Comisión de Verificación de Auditoría Social Procuraduría de Derechos Humanos
T'zanchaj, Santiago Atitlán, Sololá.
Fecha de entrevista: 06 de abril 2006.

GONZÁLEZ, Salvador

Director Escuela Rural Mixta Cánton Panabaj
Cánton Panabaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de entrevista: 05 de abril de 2006

IXBALAN CH., Antonio.

Alcalde Auxiliar
Cánton T'zanchaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de entrevista: 06 de abril de 2006

MENDEZ, Rufino Valdemar

Director de la ERM
Cánton T'zanchaj, Santiago Atitlán
Fecha de entrevista: 06 de abril de 2006

PACACH, Salvador

Psicólogo y docente universitario
Santiago Atitlán, Sololá
Fecha de la entrevista: 07 de abril de 2006

RAMIREZ TINEY, Nicolas

Alcalde en Funciones
Municipalidad de Santiago Atitlán, Sololá
Fecha de la entrevista: 06 de abril de 2006.

TACAXOY, Esteban

Vecino de Panabaj y asociado a ADECCAP
Cánton Panabaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de entrevista: 05 de abril de 2006

TINEY, Salvador Damian

Comerciante de Tul y petate
Cánton Panabaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de la entrevista: 05 de abril de 2006

VASQUEZ, Dolores

Secretaria ADECCAP
Cánton Panabaj, Santiago Atitlán Sololá
Fecha de la entrevista: 07 de abril de 2006

3. CAPITULO III

Análisis Hidrometeorológico

3.1. Análisis de lluvia

Del banco de datos hidrometeorológico de las estaciones cercanas a la zona de estudio, preparado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura, utilizados para efectuar el análisis hidrometeorológico de la zona. Se selecciono la Estación Santiago Atilán, por su localización dentro de la subcuenca del Lago de Atilán y el registro histórico que presenta, que permite su análisis.

Se realizó un análisis estadístico de precipitación y temperatura anual y mensual, durante un período de 36 años, a partir del año 1970 hasta el 2005. Para el caso de la precipitación, se amplió el análisis a nivel diario, particularmente para los meses de septiembre y octubre del año 2005, fecha en la cual el Huracán Stan afectara al país y dramáticamente a la zona. Todo lo anterior, con el fin de elaborar un modelo de precipitaciones para la zona, que permitirá entender su relación con los eventos de inundaciones o deslizamientos en el área.

El modelo de precipitaciones será unificado con el modelo geomorfológico fluvial para que de alguna manera, la población pueda anticiparse al desencadenamiento de estos eventos.

3.1.1 Historial de Lluvias

Los datos de precipitación anual se muestran en la Figura 3.1. Aquí se observa que existe cierta fluctuación de la precipitación durante los 36 años, destacándose cuatro eventos en particular, el primero ocurrido en el año 1973 donde se produjo un aumento de precipitación alcanzando un promedio de 1455.6 mm anual; el segundo evento sucedido en 1995 con un aumento de precipitación de 1629.7 mm; el tercero durante el año 1998 (año donde ocurrió el Huracán Mitch) existiendo un marcado aumento de lluvia que alcanzo los 2,829.2 mm; por último el cuarto evento ocurrido en el año 2005 (año de la tormenta Stan) donde aumenta la precipitación de 1099.7 mm (año 2004) a 1705.1 mm (año 2005).

La Figura 3.2 muestra el comportamiento de la precipitación durante los doce meses del año. Puede observarse que los meses con mayor intensidad de lluvia son Junio y Septiembre con valores muy cercanos (210.8mm y 211.0mm respectivamente). Por el contrario, los meses más secos son Enero (3.7mm) y Febrero (9.6mm).

Los datos de lluvia diaria fueron analizados para los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre del año 2005, con el objeto de observar el comportamiento de las precipitaciones ocurridas antes, durante y después de un evento de precipitación intensa, para establecer la relación de las lluvias como factor desencadenante de inundaciones u otros.

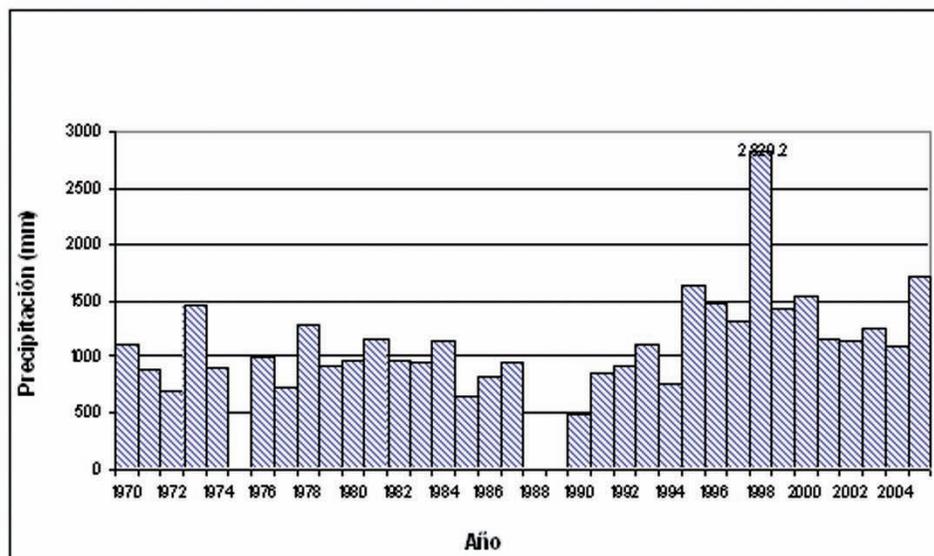


Figura 3.1. Promedio anual de lluvias durante el período de 1970-2005, en Santiago Atilán.



Figura 3.2. Promedio mensual de lluvias durante el período de 1970-2005. Cordillera S.A., 2006.

La Figura 3.3 contiene datos de lluvia diaria para los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre del año 2005. Puede observarse que los niveles de lluvia más altos fueron alcanzados durante los primeros días de Octubre, iniciando a partir del día 3 con 13.4 mm de precipitación, el día 5 de Octubre se observa un aumento drástico, alcanzando 230.7 mm, en esta fecha es donde sucedieron los primeros eventos de desastre. Valores menores pero significativos (152.5 mm) se alcanzaron el día 6. A partir del día 7 del mismo mes se ve un descenso muy marcado en los niveles de precipitación (10.7 mm).

Para tener un parámetro de la magnitud de Stan (2005) respecto a la lluvia acumulada, se realizó una comparación entre éste y el comportamiento de lluvias en la zona durante el Mitch (1998). Para ello se observó la precipitación durante un lapso de 15 días que contenga el período en el cual ocurrieron Mitch y Stan. Los resultados se muestran en la Figura 3.4.

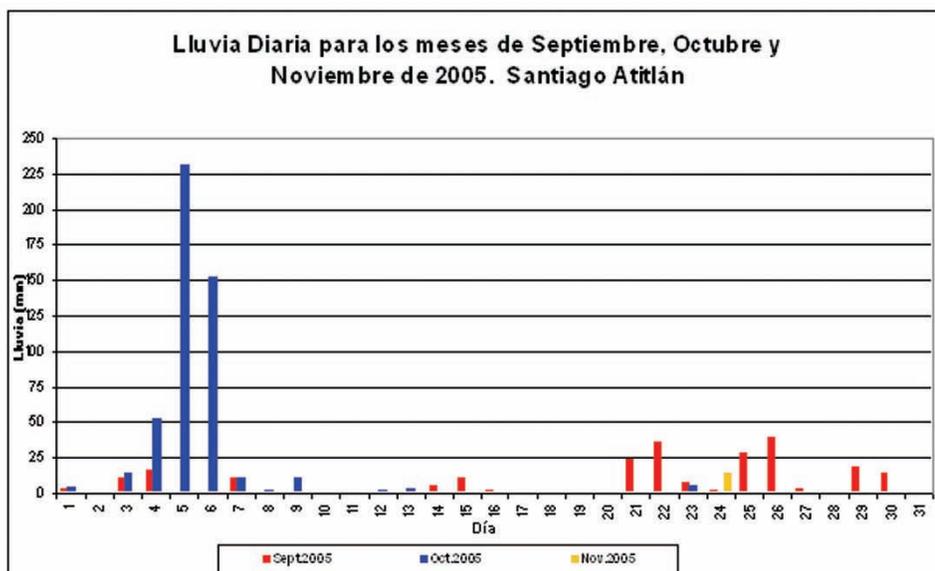


Figura 3.3. Datos de lluvia diaria en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre de 2005. Cordillera, S.A. 2006.

La Figura 3.4 muestra que el período de lluvias más intensas durante el Huracán Mitch fue de 6 días alcanzando un máximo de 95.2 mm, mientras que para Stan, las lluvias intensas se produjeron en un lapso de 3 días con un máximo de precipitación de 230.7 mm. Puede observarse además, que la lluvia acumulada durante Stan fue mucho mayor en comparación con Mitch. La comparación del parámetro de lluvia acumulada entre los dos eventos se aprecia mejor en la Figura 3.5.

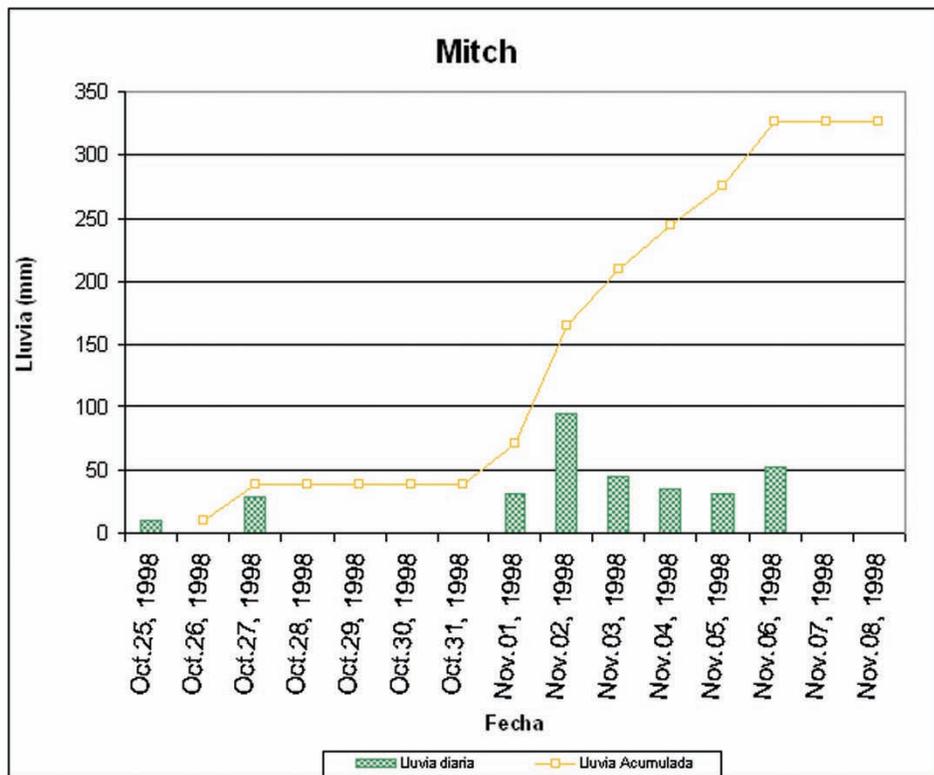
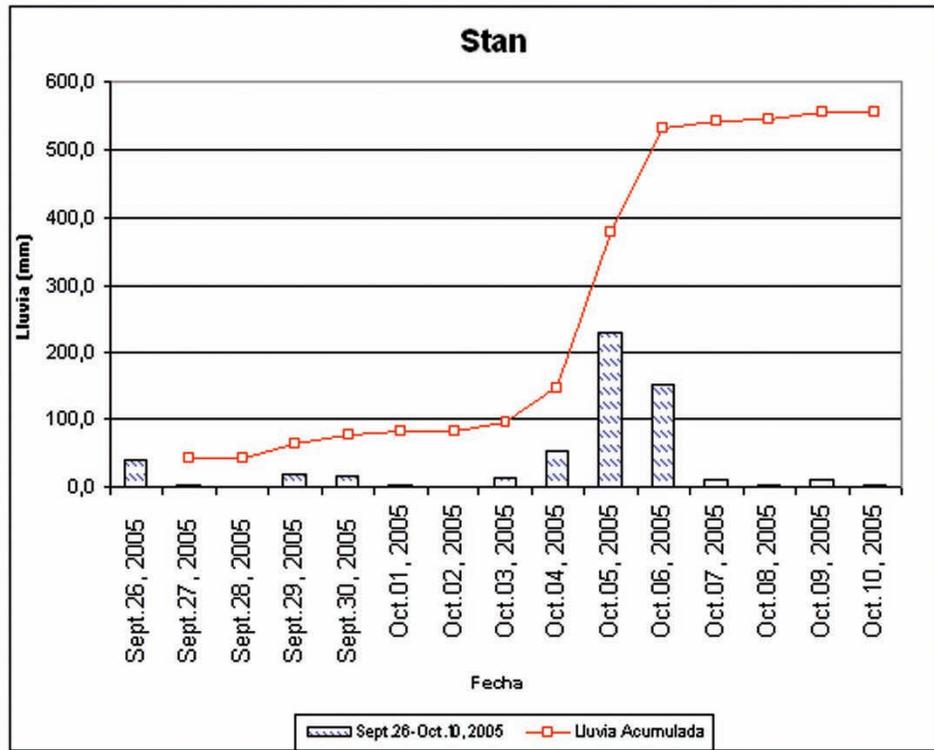
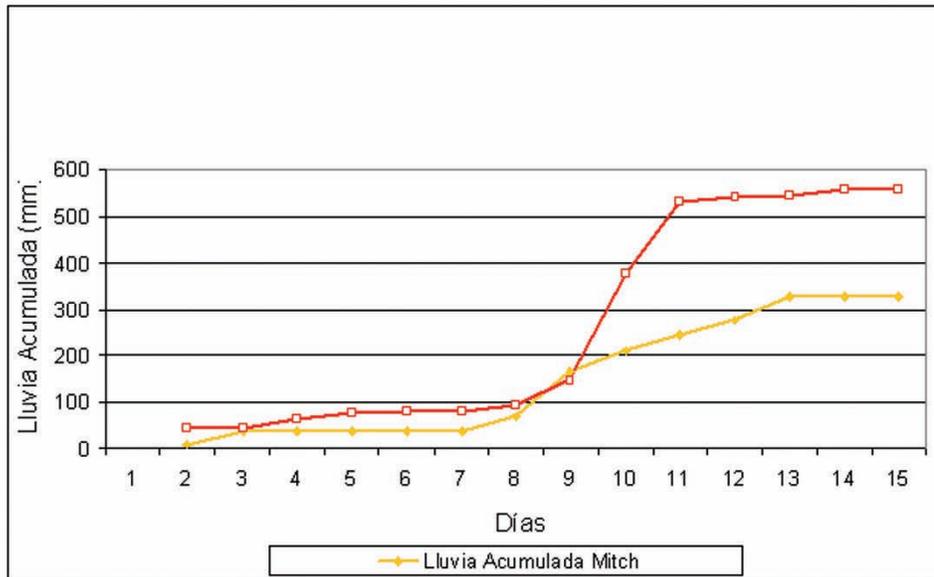


Figura 3.4. Datos de lluvia diaria (barras) y acumulada (líneas) para los eventos Mitch (1998) y Stan (2005) en Santiago Atitlán, (Cordillera S.A., 2006).

Durante Mitch, los valores máximos de lluvia acumulada (326.7 mm) fueron alcanzados de manera paulatina, permaneciendo constantes durante 3 días; mientras que para Stan los valores máximos de lluvia acumulada (556.9mm) fueron alcanzados de manera abrupta y permanecen relativamente constantes hasta el final del evento, con una variación de alrededor a 26 mm en 3 días. Esto significa que las lluvias fueron más intensas durante el Huracán Stan además de que sucedieron en un periodo de tiempo más corto que en comparación con Mitch.



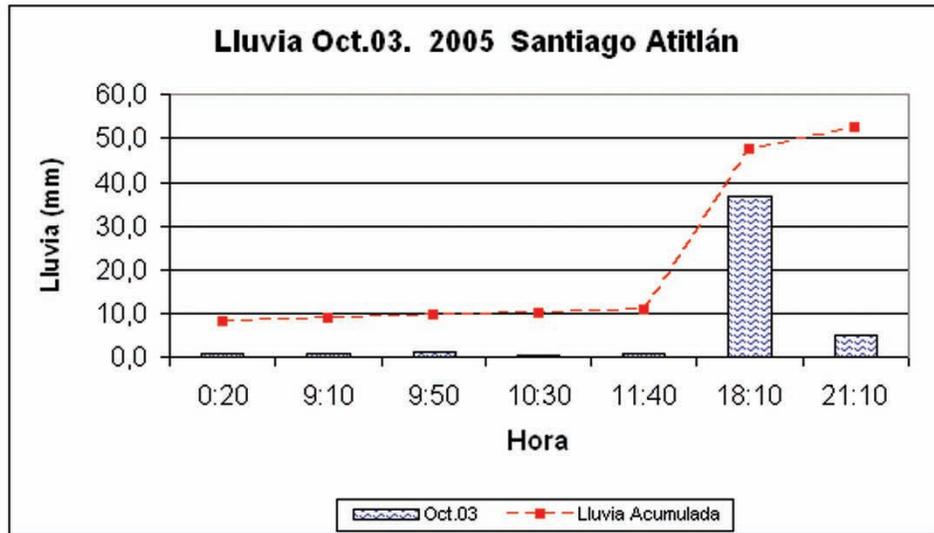
La Figura 3.5 puede convertirse en un instrumento analítico importante para la gestión de riesgos de Santiago Atitlán por lo que es importante socializar los resultados de este diagrama particularmente considerando que los habitantes de Panabaj y Tzanchaj, producto del shock psicológico que han experimentado en relación con el desastre de octubre pasado, ya estaban atemorizados el día 23 de abril durante la entrada de una ligera tormenta que en nada se compara con lo ocurrido en los primeros días de octubre del 2006.

Por otro lado se hace necesario la capacitación del personal local en cuanto a la interpretación de los datos del pluviógrafo existente en Santiago para que de este modo ellos realicen las interpretaciones de lluvia de ser posible cada hora y comparen los resultados con los datos de la Figura 3.5 y no tengan que estar esperando que alguien en Ciudad de Guatemala interprete los datos y se los envíe después de la tormenta. Actualmente existen estudiantes voluntarios de la USAC en la zona vinculados con la gestión de riesgos que muy bien pueden colaborar en esta tarea. Aunque el entorno geomorfológico de la zona no estimula la implementación de un Sistema de Alerta Temprana por flujos de detrito en base a datos de lluvia muy bien puede avanzarse en la integración de los datos con el fin de la formulación de este tipo de medidas.

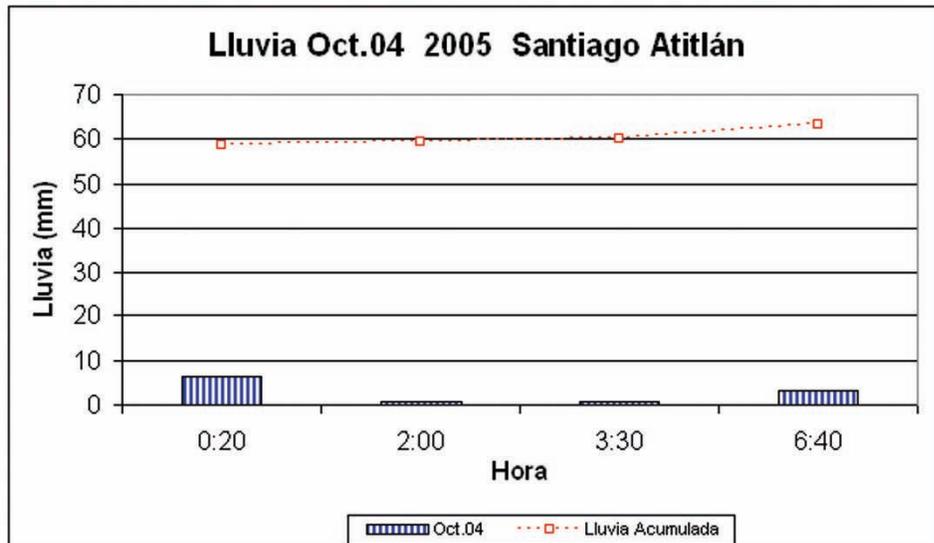
Generalmente, los deslizamientos grandes y catastróficos corresponden a altos valores de precipitación en periodos largos de tiempo (algunos días o semanas), mientras que los flujos de detritos ocurren principalmente bajo lluvias de alta intensidad en periodos cortos de tiempo (minutos o pocas horas).

Para entender con mejor precisión lo sucedido durante Stan en la zona, el personal técnico del INSIVUMEH procesó digitalmente los datos de lluvia horaria de la Estación Santiago Atitlán generando los diagramas que se muestran en la Figura 3.6.

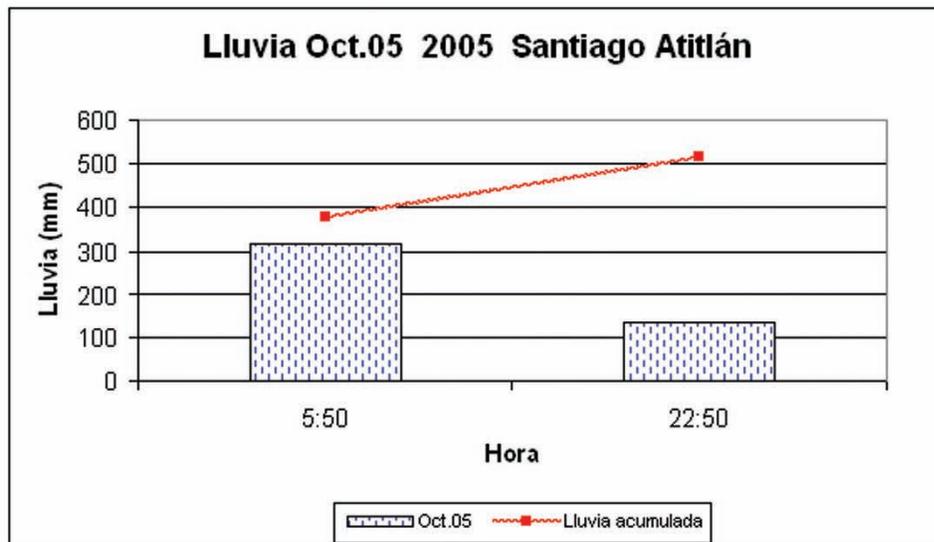
a)



b)



c)



d)

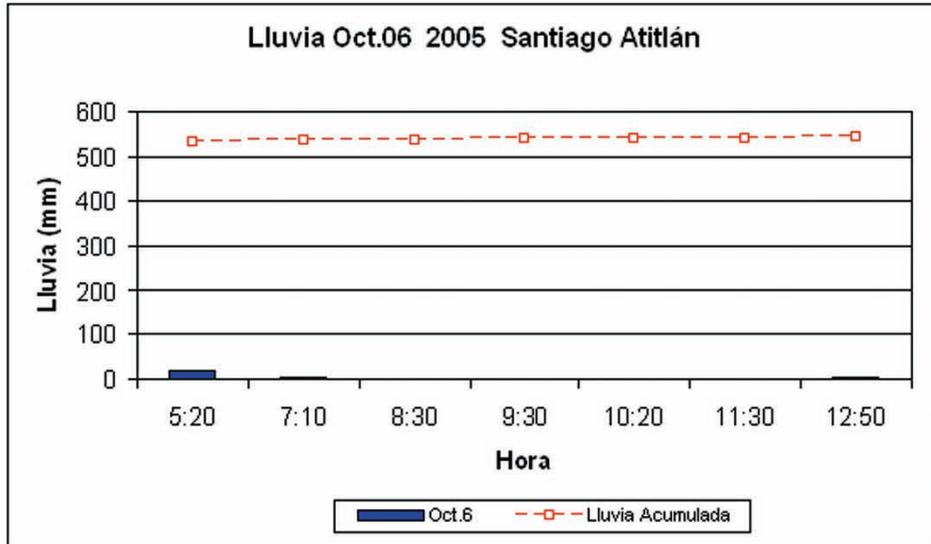


Figura 3.6. Gráficos de lluvia diaria (barras) y acumulada (líneas) en los días de lluvia intensa durante Stan en el 2005. a) Lluvia en Octubre 3. b) Lluvia en Octubre 4. c) Lluvia en Octubre 5. d) Lluvia en Octubre 6. (INSIVUMEH, 2006).

La Figura 3.6, muestra como las lluvias intensas sucedieron repentinamente. En un lapso de 23 horas la lluvia acumulada pasa a tener de 63.2 mm a 378.5 mm (entre el día 4 y 5 de Octubre), para llegar a acumular 533.4 mm en alrededor de 24 horas después (6 de octubre). Durante el día 6 de Octubre la intensidad de lluvia tiene un descenso, sin embargo, continua acumulándose lluvia hasta alcanzar 543 mm sobre el medio día. Si se considera que la lluvia horaria máxima registrada en el mundo ha sido de 425mm¹ puede concluirse, en base a la Figura 3.6, que la tormenta registrada en Santiago Atitlán, si bien no sobrepasa la cifra de 425mm/hora, ha sido una de las más intensas registradas en el planeta.

Los datos de lluvia horaria acumulada han sido examinados por algunos investigadores con objeto de establecer los valores normales de fondo y anómalos que permitan caracterizar este factor desencadenante de deslizamientos y flujos de detritos^{2 3 4}. En la elaboración de estos modelos se han comparado distintos criterios existentes sobre lluvias desencadenantes de flujos de detritos por lo que se han agrupado datos de distintos autores y representado en el diagrama que se muestra en la Figura 3.7 donde se correlaciona la intensidad de lluvia con diferentes periodos de tiempo.

Es necesario resaltar que en la Figura 3.7 la lluvia se presenta en términos acumulados por lo que las lluvias de duración más corta (por ejemplo en 1 hora) están contenidas en la lluvia del periodo de tiempo más largo, en la misma secuencia de lluvias. La Figura 3.7 muestra datos de tormentas registradas en lugares de Brazil, Chile, Colombia, y Venezuela donde se han registrado flujos de detritos severos. En base a este diagrama puede observarse que el límite inferior para todos los casos registrados lo constituye una curva que representa las condiciones mínimas de desencadenamiento de flujos de detritos inducidos por lluvia y puede representarse con la ecuación

$$P = 22,4 (t)^{0.41}$$

en donde P representa la lluvia acumulada (mm) y t es el periodo de tiempo correspondiente en horas.

Los resultados de lluvia horaria que se ilustran para el Huracán Stan en Santiago Atitlán en la Figura 3.6 se han incorporado de manera esquemática a la Figura 3.7 donde puede observarse que la intensidad y duración del evento está muy por encima de la línea curva que indica el límite para eventos catastróficos (CE).

¹ Shaw, E., 1994, Hydrology in Practice. Chapman and Hall. 569 p

² Kanji, M. A., Cruz, P. T., Massad, F., Araújo Filho, H.A., 1997, Basic and Common Characteristics of Debris Flows: 2nd Panamerican Symposium on Landslides. ABMS/ABGE, R. Janeiro, v.1, p. 223-231.

³ Kanji, M. A., Cruz, P.T., Massad, F., Araújo, Filho, H.A., 2001, Environmental effects of Debris Flows and their protection measures: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering., Istanbul, Balkema, v.3, p. 1913-1916.

⁴ Neyama, Y., 1989, Relationship between the Nature of Heavy Rains and Landslides in Western Japan. Japan-Taipei Joint Seminar of Natural Hazards Mitigation. P. 244-260

3.1.2. Tasa de retorno de lluvias

El cálculo de la Tasa de Retorno se utiliza para evaluar de manera aproximada el tiempo en que tarda un evento en volver a suceder y a partir de este puede calcularse la probabilidad de ocurrencia.

La ecuación utilizada para el cálculo de la tasa de retorno es:

$$T = \frac{n + 1}{M} \quad \text{Donde, } T = \text{Tasa de retorno, } n = \text{número de valores máximos de registro, } M = \text{rango del registro respecto a los restantes}$$

$$\text{La probabilidad de ocurrencia esta dada por: } P = \frac{100 * M}{n + 1}$$

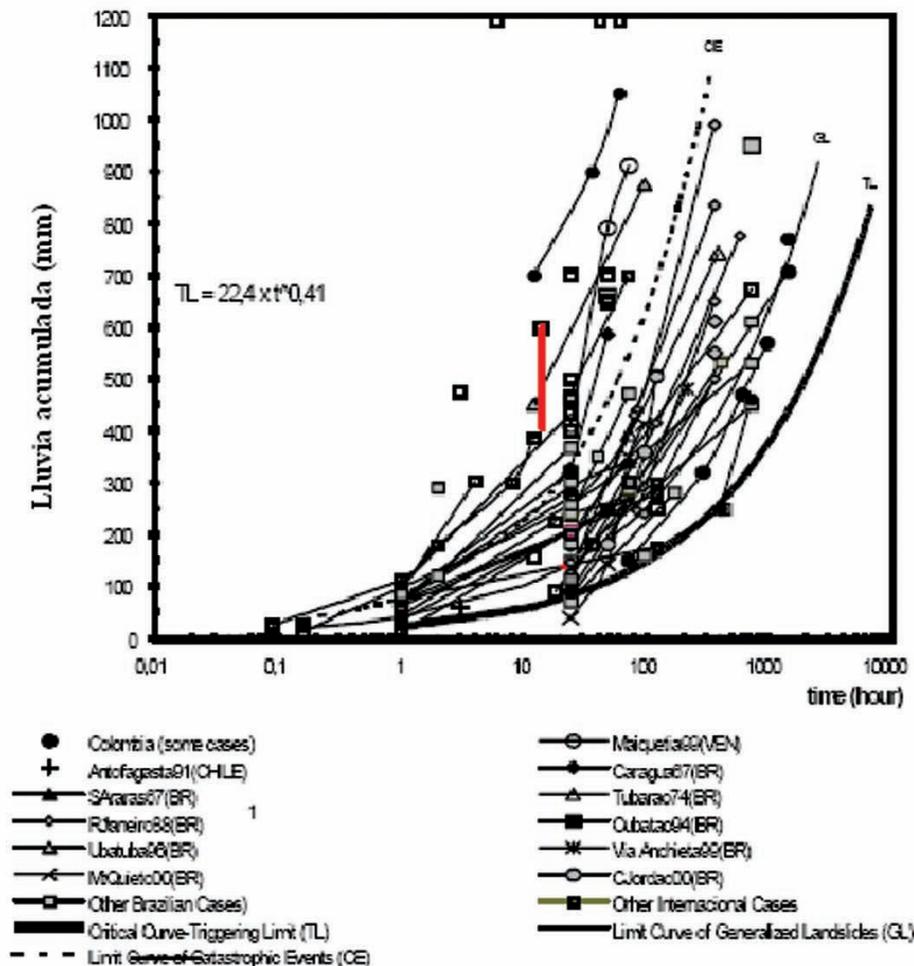


Figura 3.7. Diagrama de lluvia acumulada versus tiempo respectivo que ocasiona flujos de detritos y deslizamientos grandes (ligeramente modificada de Kanji y otros, 1997). La línea de color rojo superimpuesta al diagrama representa la intensidad y duración aproximada del Huracán Stan en Santiago Atitlán durante el 5 y 6 de octubre cuando se registraron los deslizamientos y subsecuentes flujos de detritos.

TL = Curva Crítica de Limite de Desencadenamiento
 GL = Curva Limite de Deslizamientos Generalizados
 CE = Curva Limite de Eventos Catastróficos

Para este estudio, se calculó la tasa de retorno de lluvia en la zona, utilizando los datos de la Estación Santiago Atitlán, en el periodo 1970-2005, exceptuando los años 1988 y 1989 donde no hay registro. Los resultados se muestran el Cuadro 3.1.

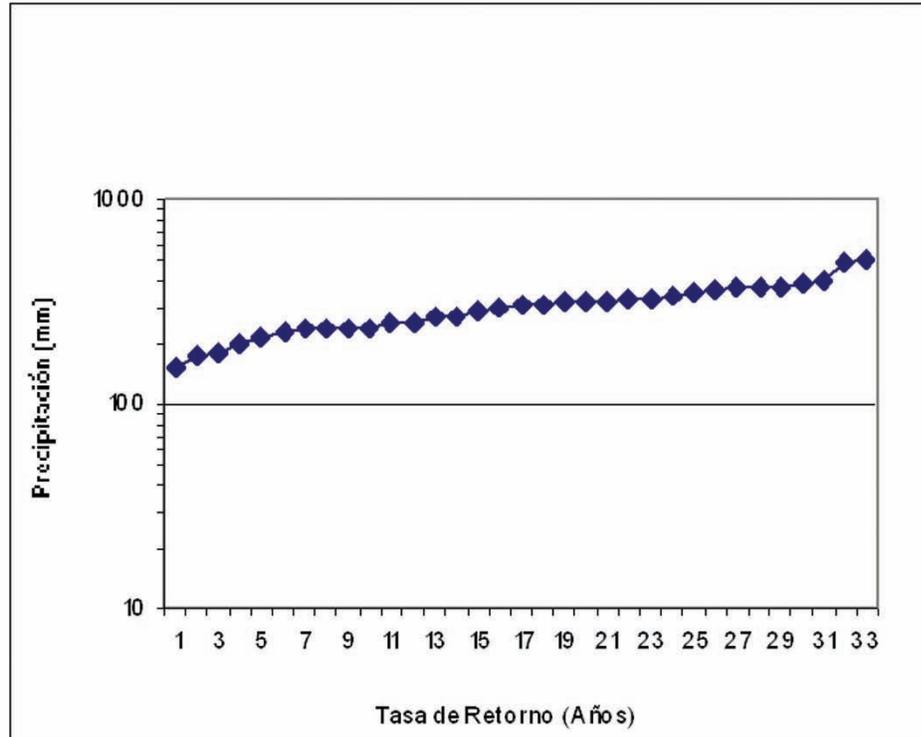
Cuadro 3.1. Tasa de retorno de lluvia, calculada para Santiago Atitlán. Período de 1970-2005

Año	Precipitación	Rango "M"	Tasa de Retorno "T" (Años)	Probabilidad de Ocurrencia "P" (%)
1970	377.1	5	6.60	15.2
1971	196.2	30	1.10	90.9
1972	321.6	13	2.54	39.4
1973	385.5	4	8.25	12.1
1974	318.5	14	2.36	42.4
1975	SD	SD	SD	SD
1976	373.7	6	5.50	18.2
1977	177.9	31	1.06	93.9
1978	514.3	1	33.00	3.0
1979	234.3	26	1.27	78.8
1980	235.5	24	1.38	72.7
1981	305.9	16	2.06	48.5
1982	325.8	11	3.00	33.3
1983	170.8	32	1.03	97.0
1984	305.6	17	1.94	51.5
1985	249.1	22	1.50	66.7
1986	248.7	23	1.43	69.7
1987	233.4	27	1.22	81.8
1988	***	***	***	***
1989	***	***	***	***
1990	213.1	29	1.14	87.9
1991	267.7	21	1.57	63.6
1992	223.3	28	1.18	84.8
1993	285.8	19	1.74	57.6
1994	151.3	33	1.00	100.0
1995	341.8	10	3.30	30.3
1996	267.9	20	1.65	60.6
1997	298.2	18	1.83	54.5
1998	347.4	9	3.67	27.3
1999	372.1	7	4.71	21.2
2000	398.0	3	11.00	9.1
2001	317.7	15	2.20	45.5
2002	357.4	8	4.13	24.2
2003	325.4	12	2.75	36.4
2004	234.9	25	1.32	75.8
2005	496.1	2	16.50	6.1

Este cuadro permite establecer que ha existido un evento extremo con una precipitación máxima de 514.3 mm, ocurrido en el año 1978. Este evento podría ocurrir cada 33 años con una probabilidad baja de que suceda de 3.0%. Un evento de precipitación que alcanza valores cercanos a los 151.3 mm como el ocurrido en 1994, puede suceder cada año, con una probabilidad de ocurrencia del 100%. Eventos con valores cercanos a 496.1 mm como el que ocurrió en el mes de octubre de 2005 (tormenta Stan), podrían presentarse cada 16.5 años con una probabilidad de 6.1% de que sucedan.

La figura 3.8a (izquierda) muestra de manera gráfica la tasa de retorno respecto a la precipitación y la figura 3.8b (derecha) muestra la probabilidad de Ocurrencia en relación a la Precipitación.

a)



b)

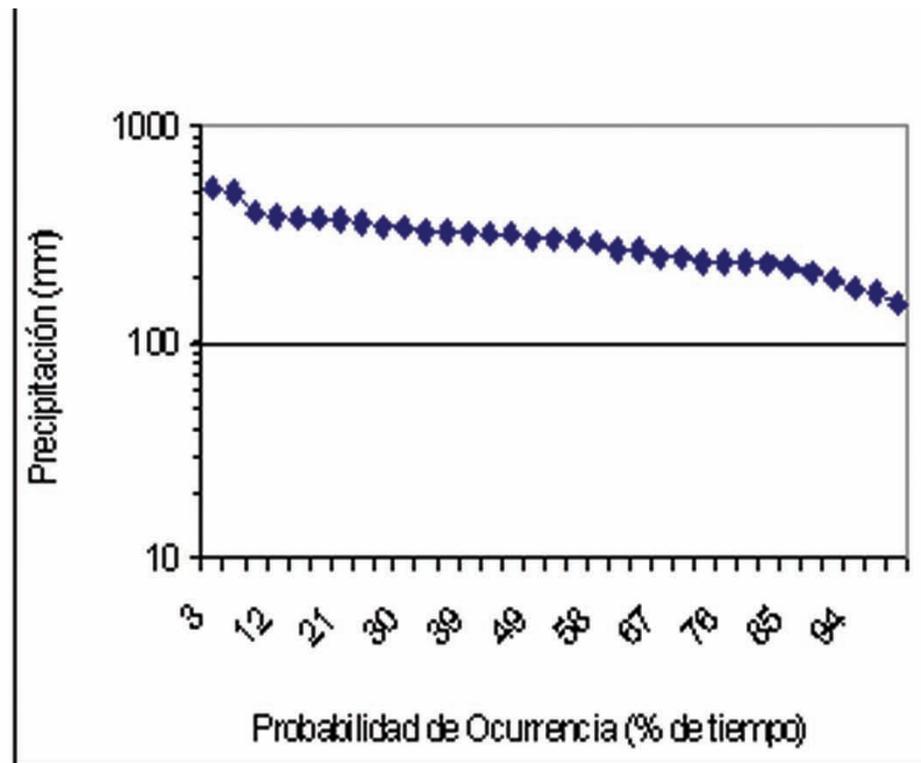


Figura 3.8. a) Tasa de retorno de lluvia para Santiago Atitlán. b) Probabilidad de Ocurrencia de eventos de lluvia. (Cordillera S.A., 2006).

3.1.3 Distribución espacial de lluvias

Debido a que la lluvia es el principal factor desencadenante de la amenaza se trató de zonificar su distribución espacial aún y cuando solamente se posee una estación hidrometeorológica para la zona. Para alcanzar este objetivo se obtuvo el promedio anual de lluvia para todo el periodo de observación de la estación de Santiago. Luego se asumió un gradiente ascendente de lluvia en base a la topografía de la zona. El gradiente estimado tomó en cuenta los mapas regionales de distribución de lluvia que tiene el MAGA para el occidente de Guatemala así como la geomorfología de la zona que se describe más adelante en el Capítulo IV.

El mapa de isoyetas generado para la zona se muestra en la Figura 3.9 y aunque es altamente especulativo constituye una muy buena primera aproximación. En base a este mapa puede concebirse que los dos conos volcánicos tienen un fuerte control en la distribución espacial de la lluvia para la zona.

3.2. Balance Hídrico

El balance hídrico de la zona se hizo en base al análisis realizado para los datos de la Estación de lluvia que se localiza en la cabecera municipal de Santiago Atitlán. Se tomaron en cuenta las características geológicas, tipos de suelos, uso de la tierra, clima y geomorfología. Los parámetros que se analizaron fueron: Temperatura, Evapotranspiración, Precipitación, Escorrentía, Infiltración, Humedad del suelo y Recarga.

A continuación se hace una breve descripción de la manera en que estos parámetros fueron analizados y los resultados que fueron obtenidos.

3.2.1. Temperatura

Para el análisis de temperatura se realizó el tratamiento estadístico de los datos de temperatura de los últimos 36 años registrados en Santiago Atitlán, que van desde el año 1970 al 2005. Estos datos arrojaron una temperatura media mensual de 21°C.

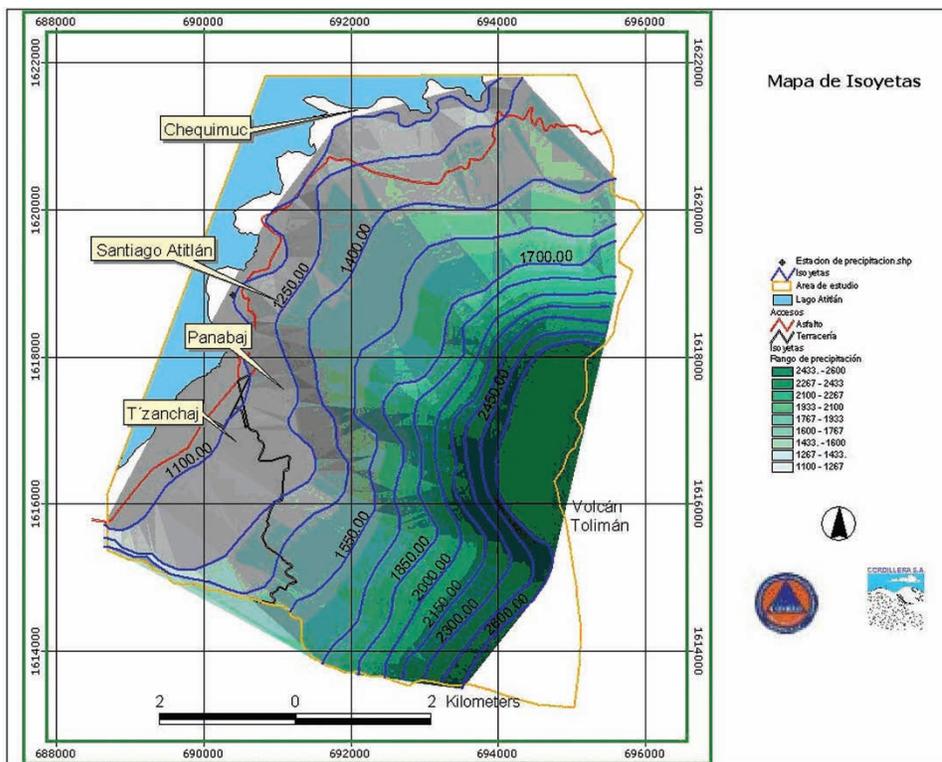


Figura 3.9. Mapa de isoyetas que muestra la distribución espacial de la lluvia en municipio de Santiago Atitlán. (Cordillera S.A., 2006).

La figura 3.10. Muestra el comportamiento gráfico de la temperatura media mensual para la zona. Se observa que durante Febrero se presentan las temperaturas más bajas, con una temperatura promedio de 15.9 °C, mientras que en Agosto se alcanzan las temperaturas más altas con un promedio de 19.4°C.

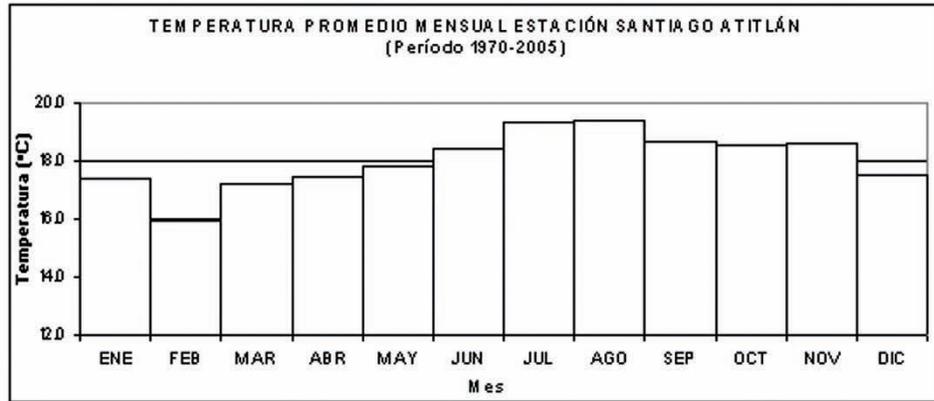


Figura 3.10. Temperatura promedio mensual en Santiago Atitlán durante el período de 1970-2005. (Cordillera S.A. 2006)

3.2.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida total de agua de la cuenca, esta pérdida de agua se produce debido a que no existe en ningún momento deficiencia de agua en el suelo para ser utilizada por la vegetación del lugar, a este fenómeno se le conoce como evapotranspiración potencial. Frecuentemente no existe suficiente agua disponible en la humedad del suelo, siendo estas las condiciones reales que se observan en el campo, es decir la Evapotranspiración real.

El cálculo de la evapotranspiración potencial de la subcuenca se realizó utilizando la ecuación de Thornthwaite:

$$ETP = 16 * \left[\frac{10t}{TE} \right]^a$$

donde, ETP = evotranspiración potencial; t = temperatura, TE = sumatoria de índices de calor (I_t) para los doce meses del año; $a = 0.000000675(TE)^3 - 0.0000771(TE)^2 + 0.01792(TE) + 0.49239$.

La Figura 3.11 muestra el comportamiento de la evapotranspiración mensual, la cual alcanza un promedio anual de 68.0 mm anuales.

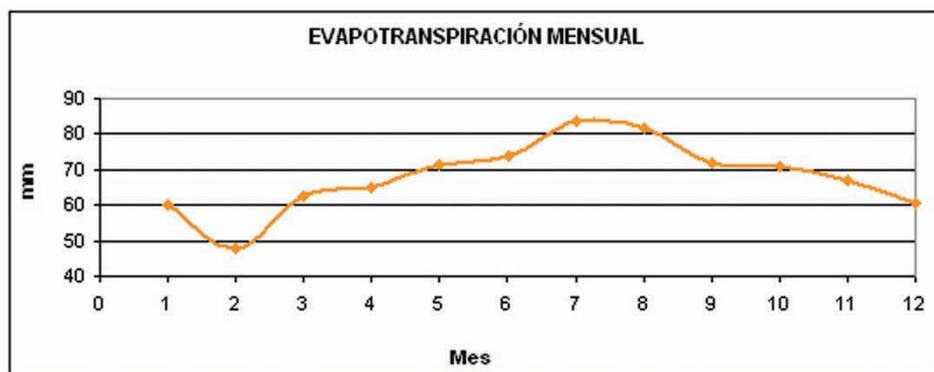


Figura 3.11. Evapotranspiración mensual en Santiago Atitlán. (Cordillera S.A. 2006)

3.2.2 Precipitación

Para el análisis de la precipitación ocurrida en cada mes del año, se utilizó la precipitación registrada en la estación Santiago Atitlán.

Los resultados del análisis mensual de lluvia ya se mostraron en la Figura 3.2. Se observa que existe dos picos de precipitación muy marcados dentro del gráfico, el primero ocurre en el mes de junio con una precipitación promedio de 210.8 mm, el segundo ocurre en el mes de septiembre con una precipitación similar (211 mm) a junio. Los meses más secos son Enero y Febrero.

3.2.4. Escorrentía

Los suelos en la subcuenca del Lago de Atitlán se localizan sobre en su mayoría sobre una topografía abrupta mayor a 10°, desarrollada de los Volcanes Tolimán y Atitlán, hasta una topografía relativamente plana que limita la subcuenca del Lago de Atitlán. Estos suelos son derivados de sedimentos principalmente Cuaternarios de origen volcánico. El uso que se da a la tierra es: Bosque (en las partes altas), Cultivo de Café (partes medias) y Maíz.. El valor del coeficiente de escorrentía es de 0.45.

La escorrentía mensual se observa en el Cuadro 3.2 de Balance Hidrico para la zona. Pueden notarse que para los meses de Enero y Febrero, la escorrentía es muy baja (1.67mm y 0.25 mm respectivamente), mientras que los meses donde existe alta escorrentía son Junio y Septiembre. Estos datos son concordantes con los datos de precipitación mensual calculados.

3.2.5. Infiltración

El cálculo de infiltración se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$I = P - E$$

donde

p = Precipitación
E = Evapotranspiración

Los resultados muestran una infiltración anual de 582.92 mm, produciéndose mayor infiltración en los meses de Junio y Octubre con valores de 115.9mm y 116.1mm respectivamente. Enero y Febrero son los meses con menor infiltración. Los resultados a nivel mensual, se encuentran en el Cuadro de Balance Hídrico para la subcuenca.

3.2.5. Humedad total del suelo

Los datos de humedad total del suelo ocurren cuando el resultado de la resta de la Infiltración con la Evapotranspiración Potencial ajustada no es negativo. Existen valores de humedad del suelo establecidos en función de la pérdida de humedad, por lo que se suman los valores negativos calculados. El resultado del cálculo de humedad total del suelo se presenta en el Cuadro de Balance Hidrico.

El Cuadro 3.2 muestra El Balance Hidrico para la Subcuenca del Lago de Atitlán. Puede observarse que existe congruencia en los resultados de cada parámetro debido a que existe relación entre los elementos del balance durante todo el año.

La Figura 3.13 presenta de manera gráfica la relación entre los elementos del balance hídrico de la zona durante el año, particularmente Precipitación, Escorrentía, Humedad del suelo e Infiltración. Aquí puede observarse que existe una fuerte relación entre los elementos, donde influencia de la precipitación en el comportamiento de la Escorrentía, la infiltración y la Humedad del suelo es muy alta.

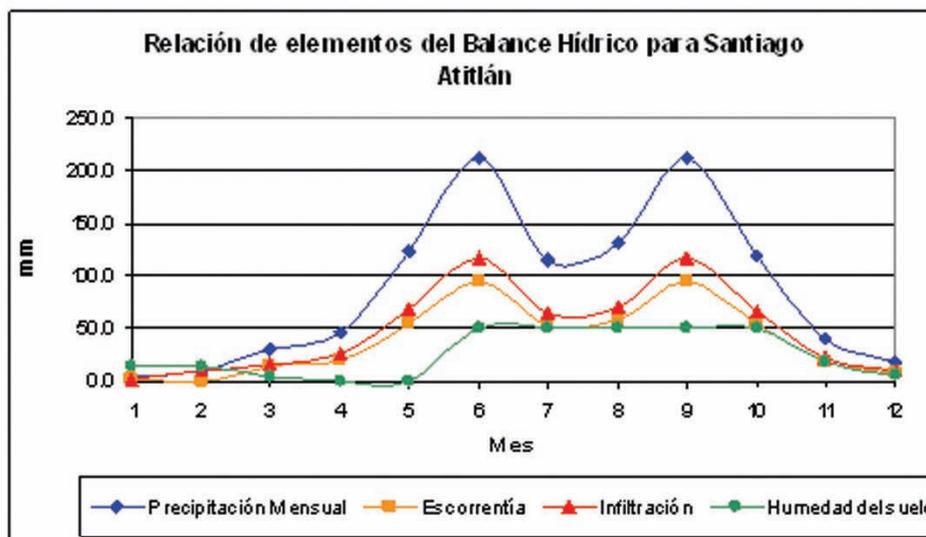


Figura 3.13. Relación entre algunos de los elementos del balance Hídrico de la subcuenca del Lago de Atilán. (Cordillera S.A., 2006).

CUADRO 3.2. BALANCE HÍDRICO PARA LA SUBCUENCA DEL LAGO DE ATILÁN.

PARÁMETRO	Símbolo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total anual
Temperatura (°C)	T	17.4	15.9	17.2	17.5	17.8	18.4	19.3	19.4	18.7	18.6	18.6	17.5	
Índice de calor	I_t	6.606	5.763	6.492	6.664	6.8375	7.1894	7.73	7.7892	7.368	7.31	7.3081	6.664	83.72
Evapotranspiración Potencial	ETP (mm)	59.25	49.69	57.93	59.92	61.938	66.078	72.5	73.269	68.2	67.5	67.487	59.92	763.69
Factor de ajuste	Fac Aj	0.97	0.9	1.03	1.04	1.1	1.09	1.11	1.09	1.02	1.01	0.95	0.96	
ETP Ajustada	ETP Aj	57.47	44.72	59.67	62.31	68.132	72.025	80.5	79.863	69.56	68.2	64.113	57.52	784.06
Precipitación	P (mm)	3.7	9.6	29.8	46.7	122.9	210.8	115.5	130.1	211.0	119.8	39.7	18.3	1057.90
Coefficiente de escorrentía	C (R/O)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
Escorrentía superficial	E_0 (mm)	1.665	0.25	13.41	21.02	55.305	94.86	52	58.545	94.95	53.9	17.865	8.235	
Infiltración (P - E_0)	I (mm)	2.0	9.4	16.4	25.7	67.6	115.9	63.5	71.6	116.1	65.9	21.8	10.1	585.92
I - ETP Aj		-55.4	-35.4	-43.3	-36.6	-0.5	43.9	-17.0	-8.3	46.5	-2.3	-42.3	-47.5	-198.15
3Neg(I-ETP Aj)		-54.7	-90.1	133.3	170.0	-170.5						-42.9	-90.4	
Humedad del suelo	Hs (mm)	15	15	4	1	1	50	50	50	50	50	19	6	
Cambio en la humedad del suelo	dHs		0	-11	-3	0	49	0	0	0	0	-31	-13	-9.00
Evapotranspiración Real	ETR (mm)	18.7	24.6	33.8	47.7	68.132	72.025	80.5	79.86	69.56	68.2	58.7	24.3	646.08
Percolación	PERC (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.1	-17.0	-8.3	46.5	-2.3	0.0	0.0	13.82

Fuente: Cordillera S.A., 2006.

La Figura 3.14 muestra el comportamiento de los parámetros de precipitación, infiltración y evapotranspiración real durante los doce meses del año en la subcuenca.

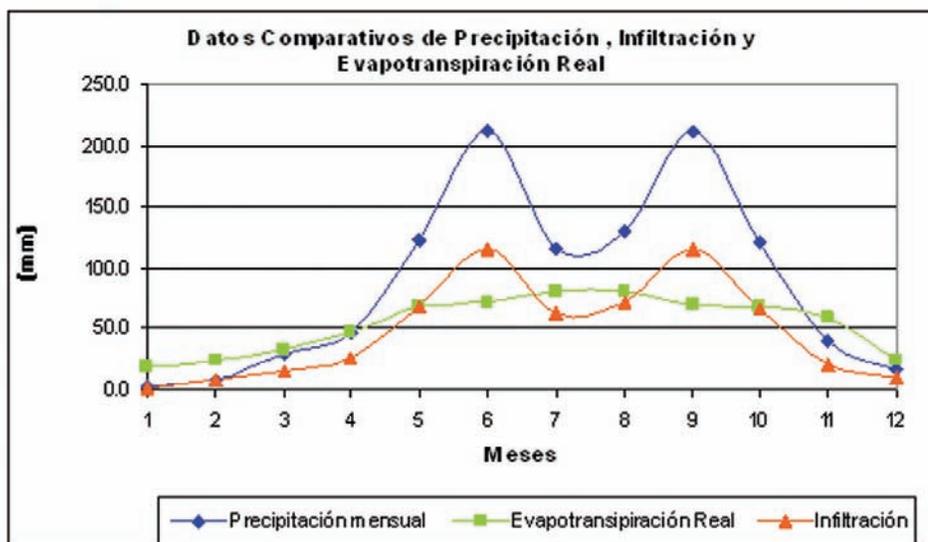


Figura 3.14. Comparación entre la Precipitación, Infiltración y Evapotranspiración en la subcuenca del Lago de Atitlán. (Cordillera S.A., 2006).

Se observa que durante el período de Abril hasta Noviembre, la infiltración predomina pese a que existe evapotranspiración relativamente continua durante este período, esto debido a que es también en este período, que se alcanzan los valores máximos de precipitación, principalmente en los meses de Junio y Septiembre donde ocurren los dos picos de precipitación notables.

4. CAPITULO IV

Análisis de Geomorfología Fluvial

Uno de los factores críticos relacionados a deslizamientos y generación de flujo de detritos es la geomorfología fluvial de una cuenca la cual tiene un fuerte control en el comportamiento hidráulico de las corrientes. El análisis geomorfológico comprende principalmente tres aspectos: (i) configuracional, referido a las formas de la superficie terrestre; (ii) dinámico, respecto a las acciones que desarrollan los procesos fluviales y productos resultantes (formas y depósitos); y por último (iii) evolutiva, por las tendencias y ritmos en la modificación de relieve con repercusiones en zonas inundables.

Este reporte contiene un análisis de los factores geomorfológicos condicionantes de riesgo por deslizamientos y flujo de detritos en las principales microcuencas aledañas a la zona de estudio bajo el aspecto morfométrico de las microcuencas; para ello se hace necesario elaborar un modelo geomorfológico cuantitativo que permitirá realizar un análisis detallado y objetivo.

4.1. Geomorfología de la subcuenca de Santiago Atitlán

La zona de interés se ubica en la parte sur de la cuenca del Lago de Atitlán por lo que se denomina aquí como subcuenca de Santiago Atitlán. La geomorfología de la zona esta íntimamente relacionada a la actividad de los volcanes Atitlán y Tolimán, por lo que pueden definirse unidades geomorfológicas de acuerdo a las etapas eruptivas de los volcanes y la dinámica de los sedimentos.

Se definen 7 unidades geomorfológicas principales que se muestran en el Mapa 4.1, la descripción de cada una de estas unidades se hace a continuación:

4.1.1 Planicie Volcánica Lacustre

Esta unidad geomorfológica se sitúa en el borde oriental del Lago de Atitlán sobre la Bahía de Santiago. Comprende una planicie que ha servido de depósito para el depósito de sedimentos que han sido erosionados de la parte media y alta de las microcuencas. Dentro de esta planicie se han formado una serie de abanicos aluviales (o conos de deyección) producto del transporte de sedimentos y del abrupto cambio de pendiente que experimentan los canales fluviales al descender de los conos volcánicos y alcanzar la superficie del lago.

Tal y como se discute más abajo este complejo de abanicos aluviales juega un papel protagónico en el comportamiento hidráulico de los canales y en la ocurrencia del desastre asociado con el Huracán Stan.

4.1.2 Abanicos aluviales antiguos

Esta unidad aflora al sur de la subcuenca conteniendo una serie de flujos de detritos de diferentes episodios. Tiene una fuerte relación entre varios eventos históricos de desastres ocurridos en la zona, el último ocurrido en Octubre de 2005 cuando el Huracán Stan afectó la zona. Se encuentra en contacto con Unidad de Cono de Estrato Volcán particularmente la porción occidental del Volcán Tolimán.

4.1.3. Conos de estrato volcanes

Esta unidad aflora en el occidente de la zona y está compuesta por dos prominentes estructuras cónicas del volcán Tolimán y Atitlán. Los estudios geológicos previos que se citan más adelante y el reconocimiento geológico de campo realizado muestra que ambas consisten en estrato volcanes donde predomina una secuencia piroclástica intercaladas con flujos andesíticos ocupando un 40% del área de influencia del proyecto.

4.1.4. Cráteres

Son estructuras que se ubican en el centro de los conos volcánicos constituyendo el conducto principal por donde han emergido los flujos de lavas y piroclásticos.

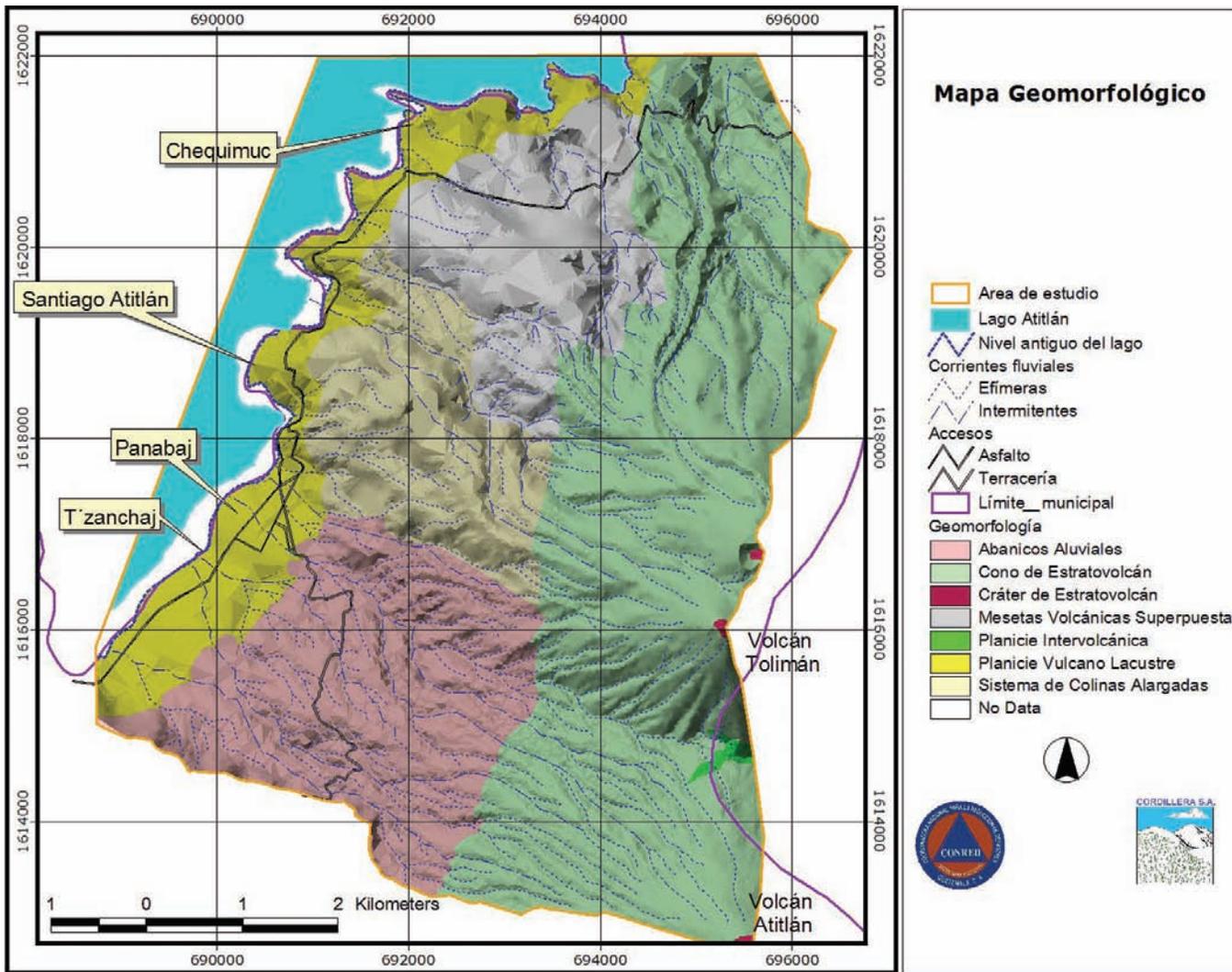


Figura 4.1. Mapa que muestra las principales unidades de paisaje para la zona (CORDILLERA S.A. 2006)

4.1.3. Planicie intervolcánica

Esta unidad constituye una pequeña área al sur del Volcán Tolimán la cual posiblemente constituye una meseta estructural delimitada por fallas de orientación este-oeste y N50E.

4.1.4. Mesetas Volcánicas Superpuestas

Esta unidad aflora al norte del municipio y está compuesta por flujos andesíticos que han condicionado la formación de una serie de mesetas las cuales constituyen terrenos relativamente estables con bajas probabilidades de generar flujos de detritos.

4.1.5. Sistema de colinas alargadas

Esta unidad aflora en la parte central del municipio y está compuesta por un sistema de colinas de alargadas de orientación N45W. Aparentemente constituyen flujos de lava más antiguos que las mesetas volcánicas y que ha sido disectados fuertemente por erosión.

4.2. Geomorfología fluvial

Debido a que la amenaza principal de la zona lo constituyen flujos de detritos se consideró que la elaboración de un mapa de corrientes fluviales se constituiría en un instrumento importante para el modelizado de la amenaza. Se utilizó la base topográfica 1:50,000 disponible por parte del IGN para la elaboración de un mapa de corrientes fluviales, intermitentes y efímeras, para la zona el cual se muestra en la Figura 4.2.

El mapa de corrientes fluviales se constituyó en la base para la delimitación de microcuencas habiendo establecido un total de 13 microcuencas para la zona cuya distribución espacial se muestra en la Figura 4.3. A continuación se realiza una breve descripción de cada microcuenca.

4.2.1 Microcuenca Del Cementerio

Se ubica al noreste de la subcuenca y drena en dirección norte. Esta microcuenca se origina en el flanco norte del volcán Tolimán. Tiene una extensión de 5.6 Km² y la constituyen únicamente una corriente intermitente y una serie de corrientes efímeras que la alimentan. El patrón de drenaje responde al tipo subparalelo.

4.2.2 Microcuenca Patzajayé

Abarca un área de 2.3 Km² sobre la parte noreste, colindando con la microcuenca Del Cementerio, y al igual que ésta, se extiende en dirección norte. Las principales corrientes que la comprenden son efímeras con bajo número de corrientes.

4.2.3 Microcuenca del Sumidero

Esta microcuenca tiene un área de 2.5 km² localizada al norte de la subcuenca del Lago Atitlán, al igual que las anteriores drena en dirección norte. La conforma solamente una corriente intermitente y varias corrientes efímeras que “desaparecen” en una depresión de origen volcánico ubicada en el sector. La densidad de drenaje es baja.

4.2.4 Microcuenca Chequimuc

Con una extensión de 3.1 km², esta microcuenca se encuentra al norte de Santiago, colindando al este con la microcuenca Del Sumidero. La comprenden en su totalidad un número escaso de corrientes efímeras. Fue nombrada Chequimuc debido a que dentro de ella se aloja el Sitio arqueológico que lleva el mismo nombre.

4.2.5 Microcuenca De Las Mesetas

La microcuenca De Las Mesetas abarca 2.5 km² y se localiza al noroeste de la subcuenca, extendiéndose en dirección Este-Noroeste, la constituyen una corriente intermitente alimentada de un número escaso de corrientes efímeras de mayor longitud en comparación con las existentes en Chequimuc.

4.2.6 Microcuenca Tolimán Oeste

Esta microcuenca se ubica en la parte central de la subcuenca del Lago de Atitlán, tiene un área de 6.0 Km² extendiéndose del Este al Noroeste. La comprenden una serie de corrientes intermitentes y efímeras, algunas de ellas de mayor longitud, que se originan en la parte alta del volcán Tolimán. Su sistema de drenaje muestra un patrón de drenaje que va de subparalelo a subrectangular que responden a un control estructural y geomorfológico existente en la zona. Tiene colindancia con las microcuencas de las mesetas al Norte y al Sur con Santiago Atitlán, Quelbaljuyú y Panabaj Norte.

Un flujo de lodo pequeño, c.a. 2,500 m³, descendió a lo largo de esta microcuenca en octubre del 2005 afectando a los cantones Pachichaj-Panul-Chuul y causando la muerte de 2 residentes.

4.2.7 Microcuenca Santiago Atitlán

La microcuenca Santiago Atitlán comprende una pequeña área de 1.3 Km² localizada en la porción este central de la subcuenca. Sobre su parte Norte colinda con la microcuenca Tolimán y al Sur con Quelbaljuyú. Esta compuesta de escasas corrientes efímeras que drenan en dirección Este-Oeste. Fue nombrada así debido a que aloja gran parte de la cabecera de Santiago Atitlán.

4.2.8 Microcuenca Quelbaljuyú

Se encuentra al Este central de la subcuenca con una extensión de 1.5 Km². Al igual que la microcuenca Santiago Atitlán se compone de un número pequeño de corrientes efímeras que drenan en dirección Este-Oeste. Colinda al Norte con Santiago Atitlán, al Este con Tolimán, al Sur con Panabaj Norte y al Oeste con el Lago de Atitlán. Dentro de su área aloja al poblado urbano Quelbaljuyú.

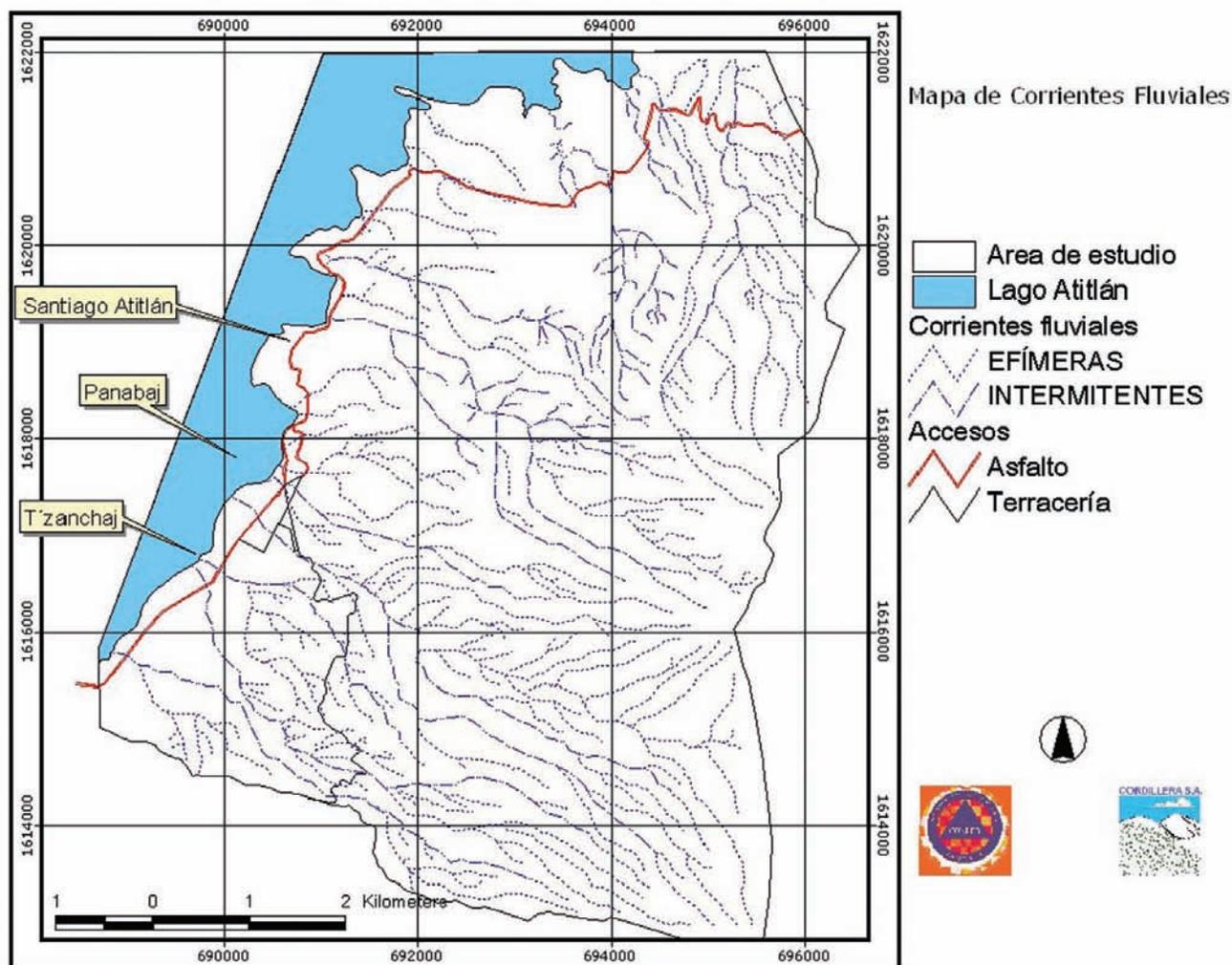


Figura 4.2. Mapa de corrientes fluviales para el municipio de Santiago Atitlán (CORDILLERA S.A. 2006).

4.2.9 Microcuenca Panabaj Norte

Esta microcuenca se localiza sobre la parte central de la subcuenca del Lago Atitlán, extendiéndose de Este a Oeste abarcando una superficie de 2.1 Km². La constituyen un pequeño número de corrientes intermitentes que se originan en el Volcán Tolimán, drenan la microcuenca en dirección Este. Panabaj Norte aloja parte del centro urbano de Panabaj.

4.2.10 Microcuenca Panabaj Sur

La microcuenca Panabaj Sur es la de mayor extensión dentro de la Subcuenca del Lago de Atitlán con 10.0 km² ubicados al Sur de la misma. Sus corrientes se originan en los flancos sur y norte de los Volcanes Tolimán y Atitlán respectivamente, y están comprendidas en menor proporción de corrientes intermitentes y en mayor porcentaje de corrientes efímeras que presentan un patrón de drenaje subparalelo y desembocan en el Lago de Atitlán. Esta microcuenca aloja parte del Poblado de Panabaj.

Las microcuencas Panabaj Norte y Sur constituyen las sub-cuencas a lo largo de las cuales se formaron y descendieron los flujos de lodo que el 5 de octubre del 2005 afectaron a la comunidad de Panabaj. Al respecto es importante señalar que la comunidad de Panabaj fue emplazada en un sector donde confluyen ambas microcuencas.

4.2.11 Microcuenca Tzanchaj

Se localiza al sureste de la subcuenca ocupando un área de 2.4 km². Esta comprendida de una única corriente intermitente y una serie de corrientes efímeras de corta longitud que drenan la cuenca de Sureste a Noroeste. Dentro de su área se localiza el poblado de Tzanchaj de donde deriva su nombre. Colinda al Norte y Este con la microcuenca Panabaj Sur y al Sur con la microcuenca La Providencia que se describe más abajo.

Esta microcuenca experimentó flujos de lodo en menor escala durante el pasado 5 de octubre del 2005. El reconocimiento de campo efectuado demostró que un puente fue severamente afectado por flujos de lodo que se desarrollaron, según opinión de los vecinos, aproximadamente hace 50 años. Cualquier acción de ordenamiento territorial para la zona debe de tomar en cuenta no solo los flujos de lodo que se formaron el año pasado sino flujos de lodo más antiguos como lo que han afectado a esta microcuenca.

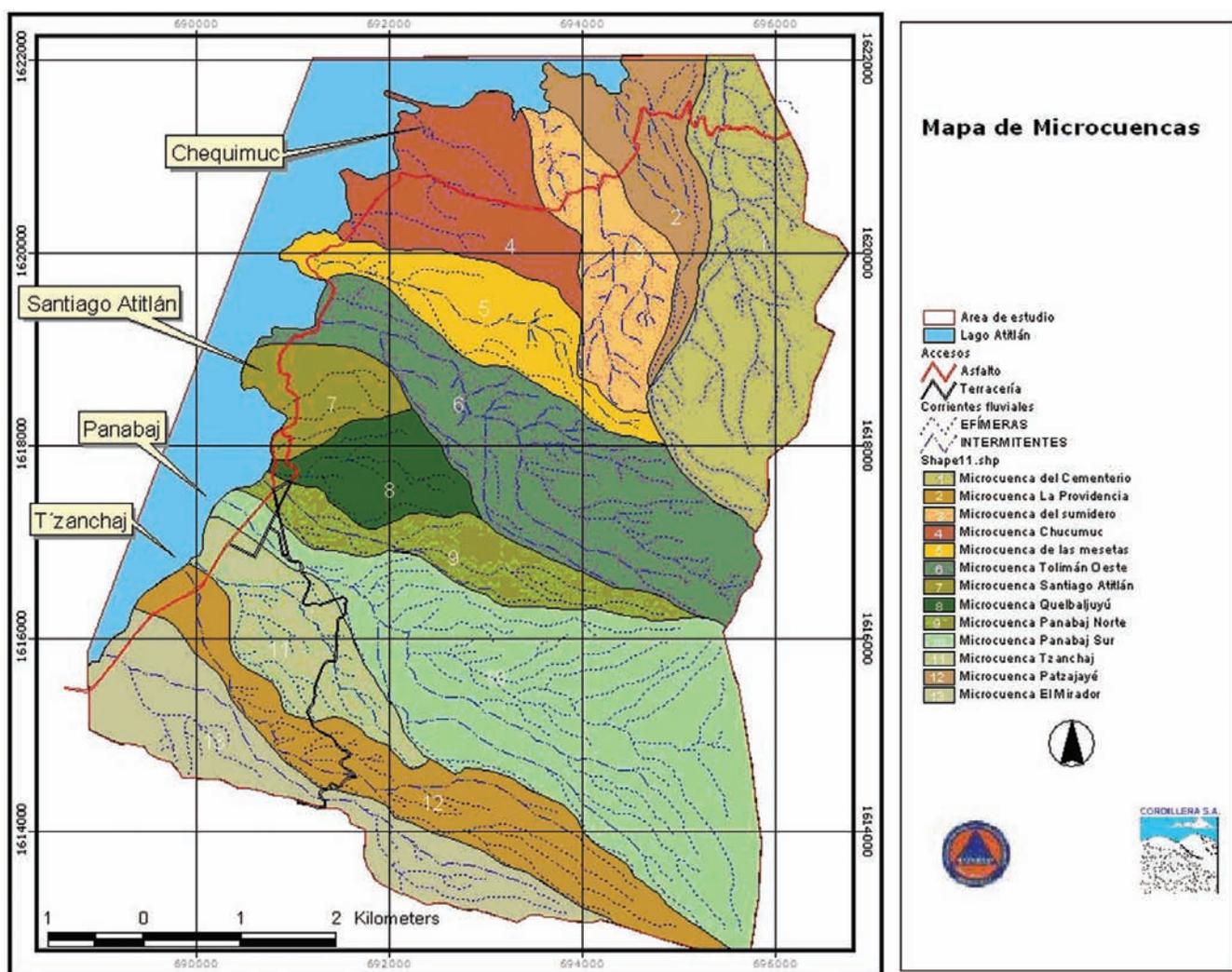


Figura 4.3. Mapa de microcuencas para el municipio de Santiago Atitlán (CORDILLERA S.A. 2006)

4.2.12 Microcuenca La Providencia

Ubicada al Sur de la subcuenca, la microcuenca La Providencia ocupa 4 Km² del total de la subcuenca del Lago de Atitlán. Esta conformada por una serie de corrientes intermitentes y efímeras cuyo patrón de drenaje es subparalelo, esta microcuenca se origina sobre el flanco norte del volcán Atitlán. Tiene colindancia con al Norte con las microcuencas Tzanchaj y Panabaj Sur y al sur con la microcuenca Bahía de Santiago.

El reconocimiento geológico realizado muestra que esta microcuenca también está expuesta a la formación de flujos de lodo. Los daños que se reportaron para el evento del 5 de octubre del 2005 en esta microcuenca son mínimos ya que en este sector es muy poco poblado. Sin embargo, para efectos de ordenamiento territorial debe tomarse en cuenta que esta microcuenca también es vulnerable por este tipo de fenómenos.

4.2.13 Microcuenca El Mirador

Esta microcuenca ocupa una extensión de 3.7 km² sobre la parte Sur de la Subcuenca, drenando el área en dirección Este-Noroeste. Comprende una única corriente intermitente y un número escaso de corrientes efímeras, algunas de ellas originadas alrededor de las faldas del volcán Atitlán. Al Norte colinda con la microcuenca La Providencia y al Sur con el límite Sur de la Subcuenca del Lago de Atitlán. Aloja un pequeño centro urbano llamado Residenciales Bahía de Santiago del cual toma su nombre.

El escarpe que sirve de límite al sur de la microcuenca ha sido afectado por varios deslizamientos pequeños lo cual evidencia la inestabilidad de los terrenos. Aunque en esta microcuenca no se registraron flujos de lodo significativos durante octubre del año pasado se constató que su parte baja consiste de sedimentos típicos de abanicos aluviales los cuales se han formado por la acumulación de flujos de lodo antiguos.

4.3. Morfometría de las Microcuencas

Para el análisis detallado de la geomorfología fluvial de la zona se seleccionaron 3 microcuencas : Panabaj Sur, Panabaj Norte, y Tzanchaj por ser éstas las que controlan el área de influencia donde se registró el desastre del 5 de octubre pasado. El análisis morfométrico resulta de particular importancia si se considera que el escenario geomorfológico del desastre consiste de microcuencas en áreas montañosas donde el factor orográfico es crítico.

Para llevar a cabo el análisis morfométrico se utilizaron metodologías de varios autores las cuales han sido sintetizadas por Singh¹. Se ha puesto particular énfasis en la evaluación de los sistemas de canales, las características oscilatorias de las microcuencas (área, perímetro, longitud, sinuosidad, etc), relieve de las microcuencas, su orientación y textura. Todo lo anterior, con el fin de caracterizar las microcuencas respecto a las características de tamaño, forma y altura, lo cual se integrará con el análisis hidrometeorológico realizado, que permitirá caracterizar la zona del desastre.

4.3.1 Sistema de Canales Fluviales

Dentro de las 3 microcuencas hidrográficas se hacen presentes 2 sistemas de canales: Intermitentes (que alojan agua durante invierno) y efímeros (que almacenan agua únicamente durante la tormenta).

A continuación se da una descripción del sistema de canales.

4.3.1.1 Segmentos de Arroyo

4.3.1.1.1 Orden del Arroyo (w)

El orden de un arroyo no es más que identificar con un número cada uno de los segmentos de corriente que forman un arroyo, donde una corriente de primer orden es aquella corriente más pequeña sin ramificación superior (bifurcación), una de segundo orden es aquella donde dos o más corrientes de primer orden se juntan originando una corriente (corriente de segundo orden), y así hasta establecer un número "n" de ordenes dentro de la microcuenca, aumentando su número aguas abajo.

El Cuadro 4.1, muestra que tanto las microcuencas Panabaj Norte y Panabaj Sur presentan corrientes de 1er, 2do y 3er Orden, mientras que Tzanchaj las excede en una corriente de 4to. Orden. La Figura 4.4,

¹ Singh, V., 1989, Hydrologic Systems. Volume II-Watershed Modeling. Prentice Hall. 320 p.

representa de manera gráfica el número de arroyos versus el orden de estos, para cada una de las tres microcuencas.

4.3.1.2 Relación de Ramificación

4.3.1.2.1 Relación de Bifurcación (Rb)

Es el promedio del número de corrientes de bajo orden en relación a las corrientes del siguiente orden más alto. Para este cálculo se toman en cuenta los segmentos perdidos de corrientes. La ecuación utilizada para calcular este parámetro es:

$$R_b = \frac{N_w}{N_w + 1} \quad [\text{Ec. 1}]$$

en donde,

R_b = relación de bifurcación

N_w = número de corrientes de bajo orden

N_{w+1} = número de corrientes del siguiente orden más alto

El Cuadro 4.1 muestra el orden de los canales para cada una de las tres microcuencas analizadas.

CUADRO 4.1. ORDEN DE LOS CANALES Y RELACIÓN DE BIFURCACIÓN PARA LAS MICROCUENCAS PANABAJ NORTE Y SUR, Y TZANCHAJ.

Microcuenca	Orden de Canales					Relación de Bifurcación (Rb)			
	1er. Orden	2do. Orden	3er. Orden	4to. Orden	Total	Rb1	Rb2	Rb3	Promedio de Rb
Panabaj Norte	12	6	1		19	2.00	6.00		4.00
Panabaj Sur	47	15	1		63	3.13	15.00		9.07
Tzanchaj	22	9	2	1	34	2.44	4.50	2.00	2.31

Fuente: Cordillera S.A, 2006.

Puede concluirse que Panabaj Sur tiene mayor tendencia a la bifurcación en sus canales.

4.3.1.2.2 Relación de División (Rd)

A diferencia de la bifurcación, en este parámetro no se incluyen los segmentos perdidos, lo que hará variar el número de arroyos encontrados anteriormente.

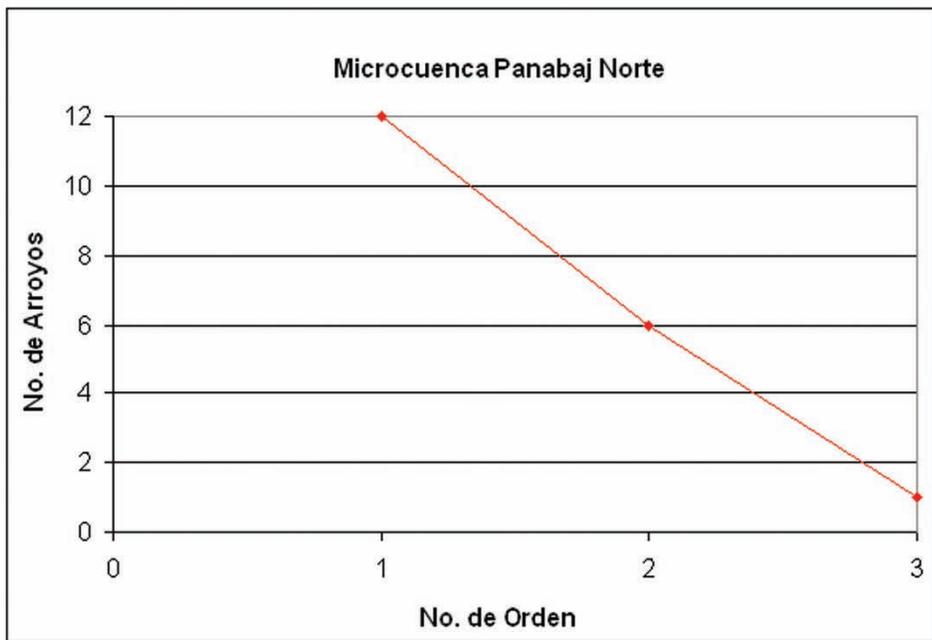
El Cuadro 4.2 los resultados en el cálculo de la relación de división para cada microcuenca.

CUADRO 4.2. ORDEN DE CANALES SIN SEGMENTOS PERDIDOS Y RELACIÓN DE DIVISIÓN.

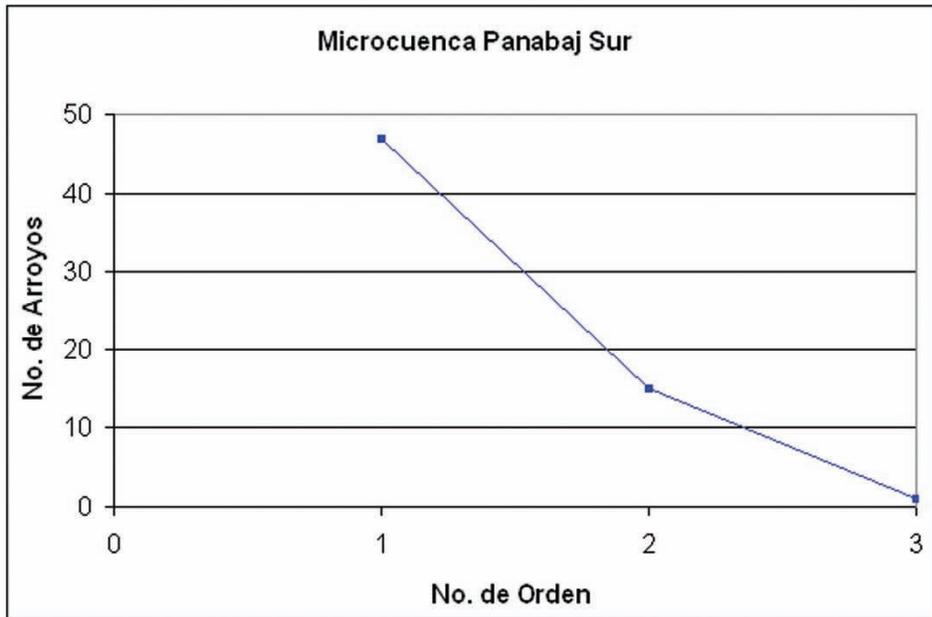
Microcuenca	Orden de Canales (excluyendo segmentos perdidos)					Relación de división Rd		
	1er. Orden	2do. Orden	3er. Orden	4to. Orden	Total	Rd1	Rd2	Rd3
Panabaj Norte	12	6	1		19	2.00	6	
Panabaj Sur	39	15	1		55	2.60	15	
Tzanchaj	20	9	2	1	32	2.22	4.5	2.22
Total	71	30	4	1				

Fuente: Cordillera S.A, 2006.

a)



b)



c)

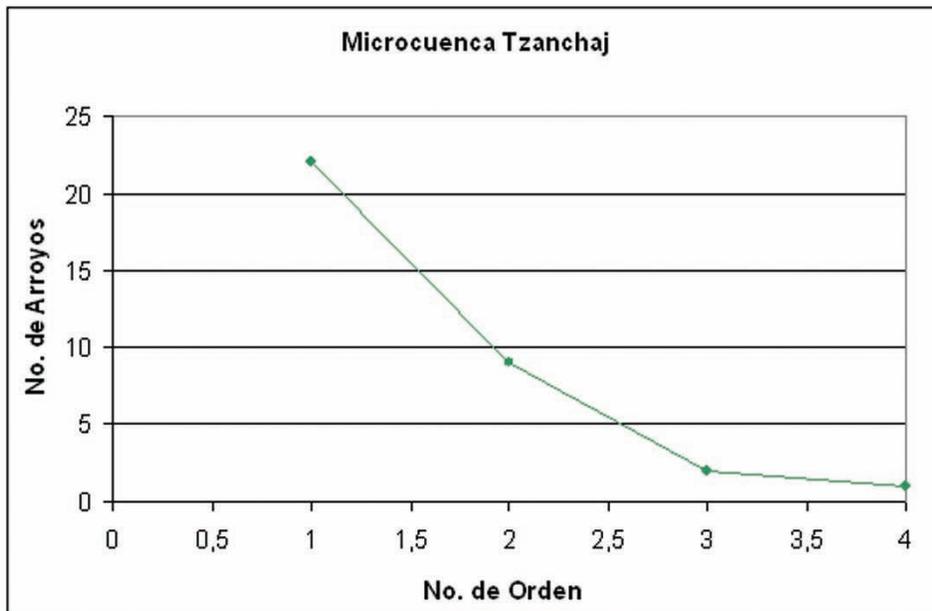


Figura 4.4. Número de arroyos Vrs. Orden, para las microcuencas a) Panabaj Norte, b) Panabaj Sur y c) Tzanchaj.

4.3.1.2 Longitud de los Arroyos

4.3.1.2.1 Longitud de Arroyos de orden w

La longitud de los arroyos de orden w (L_w) es la longitud total de todos los arroyos de la microcuenca. Siendo:

$$L_w = \sum_{j=1}^N L_j \quad [\text{Ec. 2}]$$

en donde,

N = número de arroyos de orden w

L_j = longitud del j-ésimo segmento de orden w

Los resultados se muestran en el Cuadro 4.3, observándose que la longitud de los canales es mayor en la microcuenca Panabaj Sur, principalmente en los canales de 1er orden, su longitud total es de 31.52 km, mientras que Panabaj Norte tiene 9.51 km y Tzanchaj 9.98 km.

4.3.1.2.2 Longitud total de Arroyos

La longitud total de arroyos para una microcuenca se define como la suma de las longitudes de los arroyos de todas las órdenes.

$$L_w = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^{N_i} L_{ij} \quad [\text{Ec. 3}]$$

en donde,

L_{ij} = longitud del j-ésimo segmento de orden i-ésimo

N_i = número de arroyos de orden i-ésimo

Los resultados aparecen en el Cuadro 4.3, notándose que la mayor longitud total de arroyos la posee la microcuenca Panabaj Sur. Panabaj Norte y Tzanchaj muestran valores similares de 9.51 km y 9.98 km respectivamente.

4.3.1.2.3 Longitud Media de Arroyos de orden w (L_w)

Esta longitud se define como:

$$\overline{L_w} = \frac{L_w}{N_w} \quad [\text{Ec. 4}]$$

en donde,

L_w = longitud total de arroyos

N_w = número de corrientes

La longitud media de los canales se muestra en el Cuadro 4.3.

CUADRO 4.3. LONGITUD DE CANALES SEGÚN EL ORDEN, LONGITUD TOTAL EN LAS MICROCUENCAS Y LONGITUD MEDIA DE CANALES

Subcuenca	Longitud de canales (Km)					Longitud media de los canales (Km)				
	1er. Orden	2do. Orden	3er. Orden	4to. Orden	Long. Total	Lw1	Lw2	Lw3	Lw4	Promedio Total
Panabaj Norte	7.06	2.27	0.18		9.51	0.59	0.38	0.18		0.38
Panabaj Sur	21.42	8.76	1.34		31.52	0.55	0.58	1.34		0.82
Tzanchaj	5.00	3.36	1.13	0.49	9.98	0.25	0.37	0.57	0.49	0.40

Fuente: Cordillera S.A., 2006.

4.3.1.2.4 Longitud del canal principal (Lc)

Se refiere a la longitud del arroyo principal desde la divisoria de aguas superficiales hasta la raíz de la cuenca. El cuadro 4.4 muestra la longitud del río principal para cada microcuenca. Nuevamente, la microcuenca Panabaj Sur presenta el más alto valor, ahora respecto a la longitud de su canal principal, siendo este de 8.2km, seguida, aunque con un valor mucho menor, de Panabaj Sur con 4.6km y por último Tzanchaj con 3.6 Km.

CUADRO 4.4. LONGITUD DEL CANAL PRINCIPAL (LC)

Microcuenca	Longitud (Lc) en Km
Panabaj Norte	4.6
Panabaj Sur	8.2
Tzanchaj	3.6

4.3.2 Características Oscilatorias

4.3.2.1 Relación de Sinuosidad (Rs)

La Sinuosidad es la relación que existe entre la longitud a lo largo de la línea central del río a la longitud a lo largo del valle. Así, la microcuenca Panabaj Norte muestra valores de sinuosidad de 1.1, Panabaj Sur con 1.6 y Tzanchaj con 1.2.

A partir de estos resultados puede concluirse que Panabaj Sur tiene cauces de corrientes más sinuosos, es decir con un grado de curvatura mayor en comparación a los dos restantes microcuencas.

4.3.3 Sistema de Cuenca de Drenaje

Tanto el área como el perímetro de una cuenca son parámetros geomorfológicos del sistema de cuenca de drenaje. Para la microcuenca Panabaj Norte el área es de 2.06 Km² y su perímetro es de 10.77 km; Panabaj Sur abarca la mayor área dentro de la subcuenca del Lago de Atitlán, con 10.03 km² y un perímetro de 17.04 km, mientras que Tzanchaj tiene 2.37 Km² de área y 7.91 km de perímetro.

4.3.3.1 Dimensiones de la Cuenca

Las dimensiones de la cuenca son definidas por la longitud y ancho de la misma. La microcuenca Panabaj Norte tiene una longitud de 3.15 km y ancho de 0.73 km; Panabaj Sur cuenta con 7.25 km de longitud y 2.03 de ancho; por último, Tzanchaj tiene 3.35Km y 1.17 Km de longitud y ancho respectivamente.

4.3.3.2 Centroides de la Cuenca (Lca)

Se refiere a la longitud del canal, medida a partir de la salida de la cuenca a un punto adyacente al centroide del área de drenaje. Para estimar la relación entre la longitud del arroyo principal y el centroide del área de drenaje se utilizó la siguiente ecuación:

$$L_{ca} = 0.54 L_b^{0.96} \quad [Ec. 5]$$

en donde,

L_b = Longitud del canal principal

Para el caso de Panabaj Norte este parámetro tiene un valor de 2.31km, Panabaj Sur 4.06 km y Tzanchaj con 1.83 km.

4.3.3.3 Forma de la Cuenca

La forma de la cuenca influye en la cantidad de escorrentía producida. Para calcular este parámetro se establecieron los siguientes factores:

4.3.3.3.1 Factor de Forma (Rf)

Este factor relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de la longitud de la misma. Para su cálculo se utilizó la ecuación:

$$R_f = \frac{A}{L^2} \quad [\text{Ec. 6}]$$

en donde,

A = Área de la cuenca
L = longitud del cauce (millas)

El factor de forma para las microcuencas Panabaj Norte y Tzanchaj es de 0.21 mientras que para Panabaj Sur es de 0.19.

4.3.3.3.2 Relación de Circularidad (Rc)

Trata de relacionar el área de la cuenca con el área de una circunferencia de un perímetro igual al de la cuenca. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{4 * \pi * A}{L^2} \quad [\text{Ec. 7}]$$

en donde,

A = Área de la cuenca
L = longitud del cauce (millas)

El índice de circularidad de la microcuenca Panabaj Norte es de 0.22, para Panabaj Sur es de 0.43 y para el caso de Tzanchaj es de 0.48.

4.3.3.3.3 Relación de elongación (Re)

Aquí se relaciona el diámetro de un círculo D_c que tiene la misma área que la de la cuenca con la longitud máxima. A medida que la forma de la cuenca se va acercando a un círculo el valor se acerca a 1. Para su cálculo se usó la ecuación:

$$R_e = \frac{D_c}{L_c} \quad [\text{Ec. 8}]$$

en donde,

D_c = el diámetro de un círculo que tiene la misma área que la de la cuenca
 L_c = longitud máxima

Los valores encontrados para las microcuencas son: Panabaj Norte con 0.51, Panabaj Sur con 0.88 y Tzanchaj con 0.45. Por lo que puede interpretarse que Panabaj Sur tiene una forma más cercana a un círculo en comparación a las dos microcuencas restantes.

4.3.3.3.4 Factor de Forma Circular (Rn)

Este factor relaciona la longitud de la corriente principal al diámetro de un círculo de la misma área que la cuenca, siendo el valor 1 para cuencas circulares. Se establece mediante la ecuación:

$$R_n = \frac{L_c}{D} \quad [\text{Ec. 9}]$$

en donde,

D = el diámetro de un círculo que tiene la misma área que la de la cuenca
 L_c = longitud de la corriente principal

Para el caso de la microcuenca Panabaj Norte, el factor de forma circular es 3.0, para Panabaj Sur 2.3, por último para Tzanchaj es de 2.1.

4.3.3.3.5 Factor de forma unitario R_u

En este caso se relaciona la longitud de la cuenca a la raíz cuadrada del área de la cuenca, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

$$R_u = \frac{L_B}{A^{1/2}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

en donde,

L_B = longitud del cuenca
 A = área de la cuenca

Panabaj Norte tiene un factor de forma unitario de 2.20, Panabaj Sur 2.29 y Tzanchaj 2.17. Estos resultados indican que la microcuenca que más se asemeja a un círculo es Panabaj Sur aunque su semejanza es muy ligera.

4.3.3.3.6 Relieve de la Cuenca

A continuación se describen características cuantitativas del relieve en cada una de las microcuencas.

4.3.3.3.7 Relieve total (H)

El relieve total de una cuenca es la distancia vertical máxima entre la raíz y el punto más alto de la cuenca localizado en el parte aguas. Se utiliza como un indicador de energía potencial de una cuenca para mover agua y sedimentos aguas abajo.

El relieve total en Panabaj Norte es de 1.44 Km, en Panabaj Sur es de 1.92 Km, y en el caso de Tzanchaj es de 1.84 Km. De los resultados se concluye que es Panabaj Sur quien tiene mayor energía potencial, seguida cercanamente por la microcuenca Tzanchaj.

4.3.3.3.8 Relación de relieve (R_h)

La relación de relieve puede ser calculada relacionando el relieve y la distancia sobre la que se mide el relieve, aplicando la siguiente ecuación:

$$R_h = \frac{H}{L_B} \quad [\text{Ec. 11}]$$

en donde,

H = relieve de la cuenca
 L_B = distancia sobre la que se mide el relieve

Para Panabaj Norte la relación de relieve utilizando es de 0.46 , en Panabaj Sur es de 0.26 y en Tzanchaj es de 0.55, lo cual indica que en el caso de Tzanchaj existe mayor relación entre el relieve y la distancia a diferencia de Panabaj Sur, donde no existe una fuerte relación entre estos factores.

4.3.3.3.9 Relieve Relativo (R_p)

Aquí se relaciona el relieve de la cuenca y la longitud del perímetro, indicando la inclinación general de la cuenca desde la cima hasta la desembocadura.

$$R_p = \frac{H}{P} \quad [\text{Ec. 12}]$$

en donde,

H = relieve de la cuenca
 P = longitud del perímetro

Este relieve relativo es de 0.13 en Panabaj Norte, 0.11 para Panabaj Sur y 0.23 para Tzanchaj. Esto quiere decir que existe mayor inclinación de la cuenca en Tzanchaj mientras que Panabaj Sur y Norte es menos de la mitad.

4.3.3.3.10 Número de Rugosidad (Rn)

En este caso se hace una relación entre el relieve de la cuenca y la densidad del drenaje, siendo:

$$R_n = H \cdot D \quad [\text{Ec. 13}]$$

en donde,

H = relieve de la cuenca

D = Densidad del drenaje

Para Panabaj Norte el número de rugosidad es de 6.65, en Panabaj Sur es 6.03 y en el caso de Tzanchaj es de 7.74. De los resultados se observa que si existe relación entre el relieve de la cuenca y la densidad de drenaje, siendo Tzanchaj el que presenta el valor más alto, con valores relativamente cercanos se encuentran las restantes dos cuencas.

4.3.4 Orientación y Textura de la Cuenca

La orientación de la cuenca es el azimut en grados de la dirección del flujo del agua de la corriente principal. La orientación para Panabaj Norte es aproximadamente N109°, Panabaj Sur N130°, por último Tzanchaj N133°.

4.3.4.1 Textura de la cuenca

La densidad de drenaje y la frecuencia de canales son dos factores indicativos para el análisis de textura en una cuenca, por lo que se describen a continuación.

4.3.4.1.1 Densidad de Drenaje (D)

Se establece la relación entre la longitud total de los arroyos dentro de una cuenca al área de la misma. Siendo:

$$D = \frac{\sum L_w}{A_w} \quad [\text{Ec. 14}]$$

en donde,

L_w = longitud de todos los arroyos

A = área de la cuenca

Los resultados son los siguientes: Panabaj Norte tiene una densidad de 0.005/m, Panabaj Sur 0.031/m y Tzanchaj 0.004/m. A partir de estos resultados puede observarse que es Panabaj Sur la microcuenca con mayor densidad de drenaje, en contraste con Panabaj Norte que aunque posee mayor longitud, tiene la más baja densidad entre las tres microcuencas.

La mayor densidad de drenaje de Panabaj Sur le proporciona un mayor potencial de arrastre por sedimentos y tal como lo demuestran los mapeos geológicos realizados que se describen más adelante esta microcuenca se constituye en la principal unidad hidrográfica de donde se derivaron los mayores flujos de sedimentos.

4.3.4.1.2 Frecuencia de Canales (Cf)

Se relaciona el número de arroyos con el área de la cuenca. Esta frecuencia se establece mediante la siguiente ecuación:

$$C_f = \frac{\sum N_w}{A_w} \quad [\text{Ec. 15}]$$

en donde,

N_w = Número de arroyos

A = Área de la cuenca

La frecuencia de canales en Panabaj Norte responde a 9.23/km, en Panabaj Sur es de 6.28/km, mientras que Tzanchaj tiene la más alta frecuencia con 14.33/km.

Los resultados de los principales índices morfométricos descritos con anterioridad se resumen en el cuadro 4.5.

El Cuadro 4.5 muestra que existen diferencias morfométricas significativas en distintos parámetros evaluados para las tres microcuencas que tienen mayor influencia en el área del desastre ocurrido el 5 de octubre del 2005. De todos los parámetros evaluados puede concluirse que el área y la densidad de drenaje de Panabaj Sur tienen un mayor control en la generación de flujos mayores que los derivados de Panabaj Norte y Tzanchaj. Los parámetros pueden ser utilizados para una amplia variedad de proyectos que pudieran implementarse en las microcuencas. De este modo, las mayores pendientes registradas en Panabaj Norte dificultan notablemente las intervenciones estructurales que pudieran proponerse como medidas de mitigación para esta microcuenca.

CUADRO 4.5. PARÁMETROS CALCULADOS PARA EL ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO FLUVIAL DE LAS MICROCUENCAS PANABAJ NORTE, PANABAJ SUR Y TZANCHAJ.

PARAMETRO	Panabaj Norte	Panabaj Sur	Tzanchaj	Total
Relación de sinuosidad (Rs)	1,07	1,55	1,17	3,79
Área	2,06	10,03	2,37	15,99
Perímetro	10,77	17,04	7,91	41,32
Longitud de la cuenca	3,15	7,25	3,35	13,75
Ancho	0,73	2,03	1,17	3,92
Centroide (Lca)	2,31	4,06	1,83	8,20
Factor de forma (Rf)	0,21	0,19	0,21	0,61
Circularidad de la cuenca (Rc)	0,22	0,43	0,48	1,13
Relación de Elongación (Re)	0,51	0,49	0,52	1,53
Factor de forma circular (Rn)	2,80	2,29	2,05	7,14
Factor de forma unitario (Ru)	2,20	2,29	2,17	6,66
Relieve total (H)	1,4	1,9	1,84	5,2
Relación de Relieve	0,46	0,26	0,55	1,27
Relación de bifurcación (Rb)	4,00	9,07	2,31	15,38
Relación de Long. de corriente (Lc) y bifurcación (Rb)	1,14	0,9	1,54	3,58
Densidad de drenaje (Dd) (m)	0,005	0,031	0,004	0,040
Frecuencia de corriente (F)	9,23	6,28	14,33	29,84
Número de rugosidad (Rn)	6,7	6,0	7,74	20,42
Densidad de corriente relativa	0,43	0,6	0,81	1,88

Fuente: Cordillera S.A., 2006.

4.4. Análisis de pendientes

Una de las principales condiciones para la ocurrencia de deslizamientos y flujos de detritos es la existencia de pendientes pronunciadas lo que explica porque estos dos tipos de amenazas se presentan principalmente en zonas montañosas. Mientras más alto el ángulo de pendiente mayor la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. El mapa de la Figura 4.5 muestra la variación de pendientes para la zona de interés. Puede observarse el carácter montañoso del terreno influenciado por la presencia de los conos volcánicos que afloran al oriente.

Este carácter montañoso controla notablemente el carácter torrencial de los canales fluviales de la mayoría de microcuencas de la región. En varios estudios se ha demostrado que los ángulos mínimos para la presencia de deslizamientos y/o flujos de detritos normalmente se encuentran por encima de 20 a 25 grados. La pendiente mínima de un canal fluvial puede variar en función del área de la cuenca debido a la alta concentración de agua en microcuencas con restricción de flujo ocasionada por cauces angostos.

La variación de pendientes puede apreciarse con mayor precisión en los levantamientos topográficos que se hicieron para los cauces principales de Panabaj Norte y Panabaj Sur los cuales se incluyen en el Anexo II.

La Figura 4.6 muestra la relación que guarda el área de una cuenca y su pendiente en la generación de flujos de detritos. En el diagrama original se han sobrepuesto tres líneas a colores para representar la variación de pendientes en las tres microcuencas analizadas para la zona del proyecto junto con su área y de este modo evaluar su comportamiento hidráulico para la generación de detritos. Puede observarse que en base a estos dos parámetros geomorfológicos que las tres microcuencas tienen un fuerte potencial para el transporte y acumulación de sedimentos.

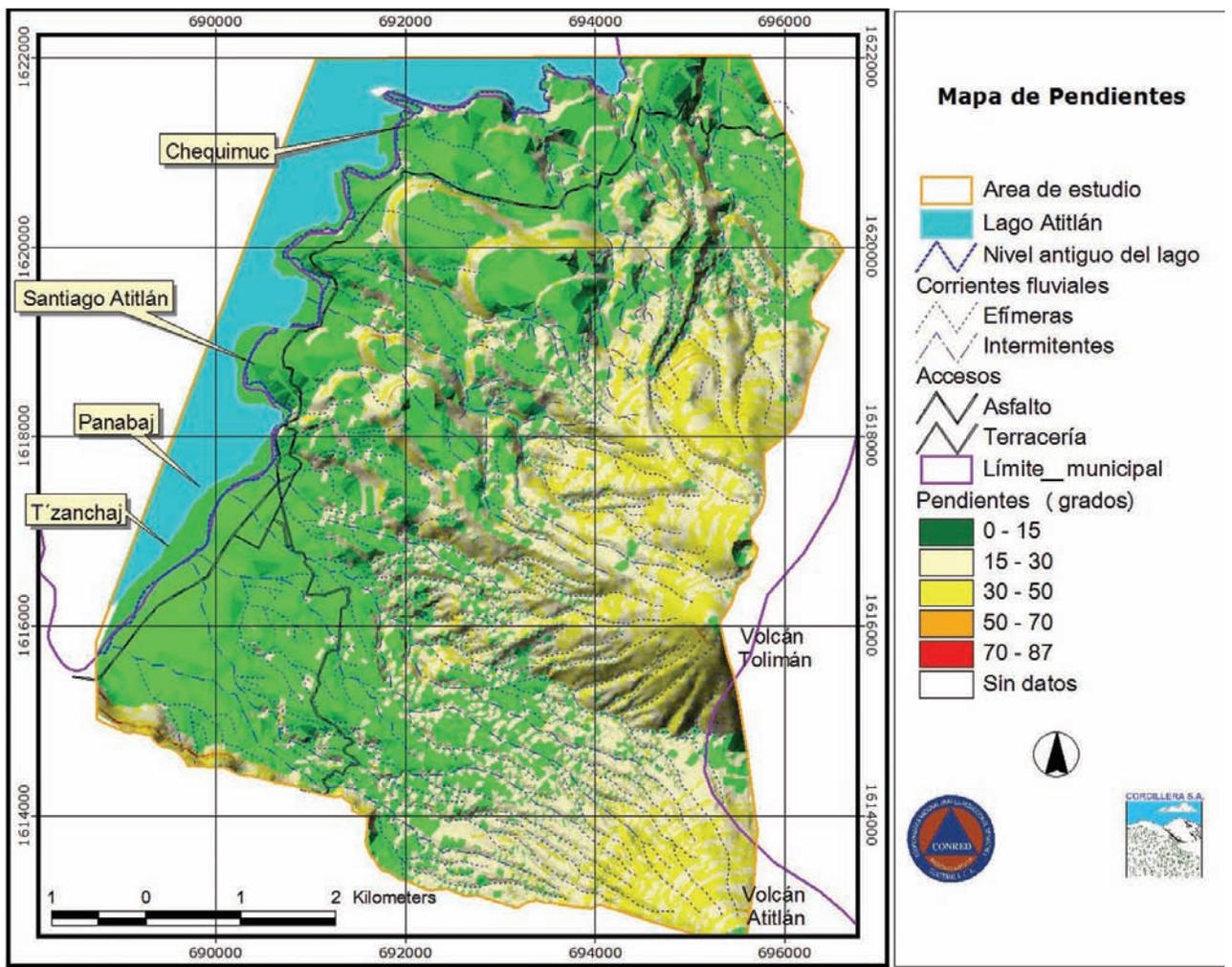


Figura 4.5. Mapa de pendientes para el municipio de Santiago Atitlán.

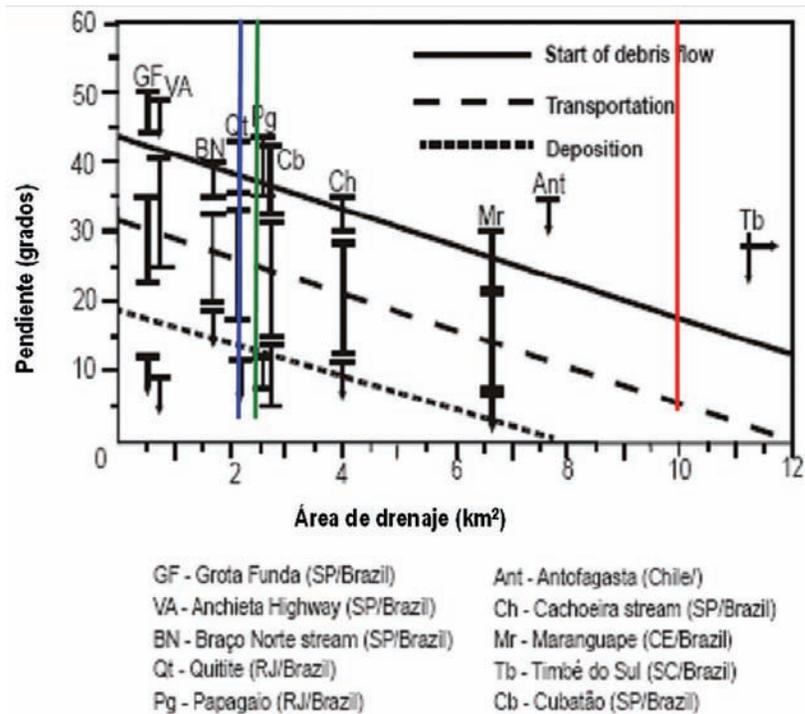


Figura 4.6. Diagrama que muestra líneas diagonales que representan ángulos para el inicio, transporte, y depósito de flujos de detritos (VanDine, 1985). Al diagrama se le han sobrepuesto los datos correspondientes a las microcuencas Panabaj Norte (línea azul), Panabaj Sur (línea roja), y Tzanchaj (línea verde).

4.5. Simulación de caudales a partir de los parámetros morfométricos estimados para las microcuencas

Las microcuencas de Santiago Atitlán carecen de estaciones de aforo y por tanto de series de tiempo de caudales que permitan la posibilidad de determinar cuantitativamente los caudales que se registraron durante el desastre con algún modelo estadístico de valores extremos que pudiera deducirse de los datos de aforo de caudales.

Debido a que el tipo de corrientes presentes varían de efímeras a intermitentes en esta sección del reporte se realizan intentos por estimar los caudales que pueden presentarse en las microcuencas Panabaj Norte, Panabaj Sur, y Tzanchaj. Para ello se integra en esta sección los resultados del análisis geomorfológico con los resultados de los datos hidrometeorológicos que se describieron en el Capítulo III. A continuación se describen los resultados obtenidos mediante la aplicación de modelos matemáticos y estadísticos ampliamente conocidos en la literatura.

4.5.1. Método Racional

El método racional fue propuesto a mediados del siglo XIX y continúa siendo una de las herramientas fundamentales para el diseño de obras de infraestructura. Para la simulación de caudales pico con este método se utilizó la ecuación

$$Q = kCIA \quad [\text{Ec. 16}]$$

en donde,

- Q = es el caudal máximo estimado (m³/s)
- k = es el factor de conversión métrico (0.00278)
- C = es el coeficiente de escorrentía en base a la pendiente del terreno y al uso de la tierra
- A = es el área de cada microcuenca (ha)

Los resultados provenientes al aplicar esta ecuación se muestran en el Cuadro 4.6.

CUADRO 4.6. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE CAUDALES PICO CON EL MÉTODO RACIONAL

Microcuenca	Método Racional		1C	I		Q _{max} (m ³ /s) 1400 _{mm}	Q _{max} (m ³ /s) 1580 _{mm}
	Área			mm/hr	mm/hr		
	km ²	ha					
Panabaj Norte	2,06	205,90	0,45	400	580	103,03	149,40
Panabaj Sur	10,03	1002,80	0,45	400	580	501,80	727,61
Tzanchaj	2,37	237,30	0,45	400	580	118,74	172,18
Total	14,46	1446,00					
1C = coeficiente de escorrentía para un terreno de alta pendiente y uso agrícola							
I = Intensidad de lluvia, datos del INSIVUMEH							

Fuente: CORDILLERA S.A. 2006

Los datos del Cuadro 4.6 muestran los caudales que pudieron haberse registrado durante el evento pico del Huracán Stan en la zona. En varios proyectos de infraestructura el método racional aporta una primera aproximación para el diseño de las obras por lo que los caudales máximos obtenidos en este caso estarían representando el peor escenario de diseño bajo este criterio.

4.6. Estimación del tiempo de concentración en base a la geomorfología de las microcuencas

El tiempo de concentración (t_c) es el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente toma en llegar a una sección determinada de dicho canal. Normalmente se constituye en un

parámetro crítico en la gestión preventiva de riesgos por inundación, particularmente para la formulación de un Sistema de Alerta Temprana. Puede medirse en minutos u horas y para ello existen diferentes ecuaciones por lo que de manera indicativa se utilizan las siguientes en esta consultoría.

4.6.1. Formula de Kirpich

$$t_c = \left(11.9 \frac{L^3}{h} \right)^{0.385}$$

en donde,

t_c = tiempo de concentración (horas)

L = longitud del cauce (millas)

h = diferencia de elevación (pies) entre los límites superior e inferior del área de drenaje

4.6.2. Formula Kerby-Hathaway

$$t_c = 0.01377L_f^{0.47} n^{0.47} S_f^{-0.235}$$

en donde,

t_c = tiempo de concentración (horas)

L_f = longitud del canal (pies)

n = Coeficiente de Manning

S_f = pendiente media del canal

4.6.3. Formula de George Rivero

$$t_c = \frac{16L}{(1.05 - 0.2p)(100S)^{0.04}}$$

en donde,

t_c = tiempo de concentración (min)

p = relación entre el área cubierta de vegetación y el área total de la cuenca

S = pendiente media del canal principal

L = longitud del canal principal (km)

Los escenarios considerados en este caso fue la estimación del t_c para cada microcuenca de interés considerando el punto más alto y el área del desastre. Los resultados del procesamiento de datos disponibles para las microcuencas de la zona se muestra en el Cuadro 4.7.

CUADRO 4.7. RESULTADOS DE ESTIMACIONES DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Microcuenca	Kirpich (1940)				Kerby-Hathaway			Rivero			
	L	h	t_c (horas)	n	L	S	t_c (horas)	L	p	S	t_c (min)
Panabaj Norte	2,86	4592,00	0,34	0,04	15088,00	0,29	0,35	4,60	1,00	0,29	75,68
Panabaj Sur	5,10	6232,00	0,59	0,04	26896,00	0,26	0,47	8,20	1,00	0,26	135,49
Tzanchaj	2,24	6035,20	0,23	0,04	11808,00	0,58	0,27	3,60	1,00	0,58	57,61

Los resultados muestran bastante consistencia entre los dos primeros modelos corridos. El de Rivero estima cifras en una proporción mayor a los dos primeros. De cualquier manera, al comparar los resultados de los t_c estimados con los datos de lluvia horaria del Huracán Stan pudiera sugerirse que la implementación de un Sistema de Alerta Temprana puede ser una de las mejores estrategias preventivas para la gestión de riesgos de Santiago Atitlán. Sin embargo, el contexto geomorfológico condiciona un comportamiento torrencial en los canales fluviales lo cual tiende a dificultar notablemente la eficaz y eficiente implementación del Sistema de Alerta Temprana.

4.7. Consideraciones geomorfológicas adicionales relacionadas con la gestión de riesgos en Santiago Atitlán

El entorno geomorfológico del sur de Santiago Atitlán condiciona la formación de abanicos aluviales particularmente por el contexto montañoso y el fuerte cambio de pendiente que se registra en la parte baja de las microcuencas. Los diagramas de la Figura 4.7 son altamente esquemáticos e ilustran la formación de abanicos aluviales en un contexto geomorfológico muy parecido al de Santiago.

Como ya se comentó con anterioridad las comunidades de Panabaj y Tzanchaj han sido emplazadas en la planicie volcánica lacustre que está constituida básicamente por sedimentos típicos de abanicos aluviales. Dicho contexto geomorfológico condiciona que ambas comunidades, particularmente Panabaj, sean receptoras de flujos de lodo.

También debe de tomarse en cuenta la capacidad de migración que pueden tener los canales fluviales alojados en abanicos aluviales. La dirección de migración de los canales fluviales puede ser bastante imprevisible por el hecho de que el torrente que transporta los sedimentos al llegar a la zona apical del abanico aluvial experimenta un descenso de pendiente. Sin embargo, en el contexto geomorfológico de Panabaj-Tzanchaj existe claramente una barrera topográfica al norte de la comunidad de Panabaj lo que limita la migración septentrional del canal principal de la microcuenca de Panabaj Norte. Sin embargo, queda claramente abierto el potencial para la migración de los canales principales en las microcuencas Panabaj Sur, Tzanchaj, y La Providencia en casi cualquier dirección.

Debido a que la migración de los canales, dentro del abanico aluvial donde están emplazadas las comunidades, puede producirse en casi cualquier dirección puede concluirse fácilmente que todo el abanico aluvial es susceptible de ser afectado por inundaciones y/o flujos de detritos futuros. El contexto geomorfológico también condiciona un comportamiento torrencial en los canales fluviales lo cual tiende a dificultar notablemente la implementación de planes de emergencia, particularmente la evacuación de la población expuesta durante un evento extremo futuro de similar o mayor magnitud al ocurrido el 5 de octubre del 2005.

Por lo tanto, se concluye que la vocación del territorio donde predominan abanicos aluviales, y están emplazadas las comunidades de Panabaj y Tzanchaj, no es urbanizable y que en términos de ordenamiento territorial se considera apto para la implementación de un parque ecológico y de protección ambiental, uso más afín con el sector turístico que predomina en Santiago Atitlán.

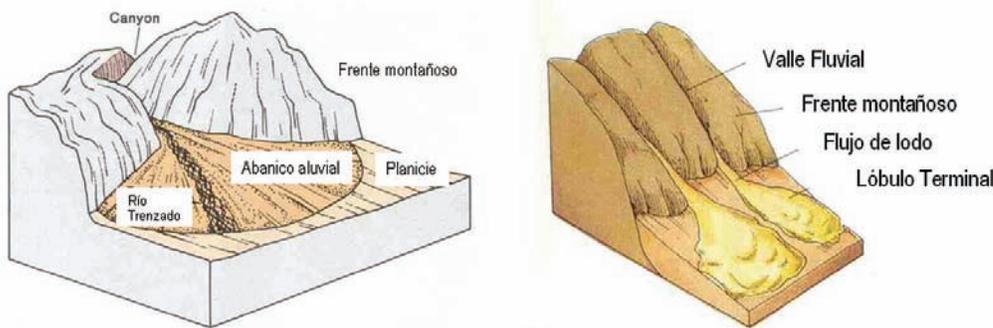


Figura 4.7. Diagramas que muestran el contexto geomorfológico típico para la generación de abanicos aluviales. El diagrama izquierdo² muestra la distribución de sedimentos al pie de montañas y la formación de canales fluviales trenzados. El diagrama derecho³ ilustra particularmente la acumulación de flujos de lodo en forma de abanicos aluviales.

Este contexto geomorfológico particular relacionado con el comportamiento hidráulico de las corrientes fluviales dentro de los abanicos aluviales en que están emplazadas las comunidades complica notablemente la eficacia y eficiencia de cualquier intervención estructural que pudiera proponerse como medida de protección para las comunidades de Panabaj y Tzanchaj.

Es importante resaltar que la prevención de otro desastre en la zona debe de tomar en cuenta no solo intervenciones estructurales en los canales fluviales sino la gestión integral territorial de por lo menos las microcuencas Panabaj Norte, Panabaj Sur, Tzanchaj, Quelbaljuyú, La Providencia, y El Mirador.

Es altamente prioritaria la formulación de un Plan de Ordenamiento Territorial para el sur de Santiago Atitlán y que abarcaría por lo menos inicialmente las microcuencas mencionadas en el párrafo anterior.

² Plumier, C., and McGeary, D., 1991, Physical Geology. Wm. C. Brown Publishers. 543 p.

³ Coch, N., and Ludman, A., 1991, Physical Geology. Macmillan Publishing Company. 677 p.

5. CAPITULO V

Zonificación de amenazas por deslizamientos y flujo de detritos

Para efectos de la presente consultoría se considera apropiado distinguir conceptualmente los siguientes términos:

Lahar¹: sedimento volcánico normalmente de grano fino a medio originado durante una erupción volcánica.

Flujo de detritos^{2 3}: material sedimentario y/o volcánico frío, pobremente clasificado, agitado y saturado con agua, que fluye ladera abajo en respuesta a la atracción gravitacional.

Por las características del desastre ocurrido en Santiago Atitlán, y asociado al Huracán Stan, lo que la zona afectada realmente demanda es un modelo de amenaza por deslizamientos y subsecuente transformación del material deslizado en flujo de detritos. La construcción de un modelo de lahares estaría relacionada más con la movilización de material volcánico producido durante una erupción volcánica lo que en un sentido estricto no corresponde a lo ocurrido en Panabaj.

En todo caso, el problema central en este caso lo constituye la removilización de lahares y piroclásticos previamente depositados por volcanismo, mediante la generación de deslizamientos desencadenados por tormentas intensas.

Para la zonificación de las amenazas se evaluaron los factores condicionantes y desencadenantes que son comunes tanto a deslizamientos como a flujo de detritos. Se considera que la ocurrencia de deslizamientos es un fenómeno precursor al de flujo de detritos. Los factores condicionantes analizados fueron geomorfología, geología, uso del suelo y cobertura vegetal, elevación, pendiente y orientación de laderas o aspecto; mientras que el factor desencadenante analizado, fue la lluvia. Los modelos finales para la zonificación de la amenaza fueron generados en el sistema de información geográfica (SIG, ArcGis®).

La metodología global para la zonificación de amenazas y su integración con vulnerabilidades para su posterior zonificación de riesgos se indica en la Figura 5.1.

El análisis y evaluación de las variables para la zonificación de la amenaza por movimientos de ladera ha conducido al desarrollo de varios métodos. Entre ellos y el adoptado en el presente estudio, es el método de cartografía directa⁴ el cual se fundamenta en el inventario de movimientos de ladera y en análisis de los factores condicionantes y desencadenantes. Para el análisis de estas variables, se adoptó el método semicuantitativo (heurístico), el cual es de tipo subjetivo y se fundamenta en el conocimiento del terreno, la compilación y evaluación de información secundaria y levantamientos del terreno. Este método es muy útil para la evaluación y zonificación de amenazas, cuando es necesaria la toma de decisiones rápidas en zonas de inminente desastre.

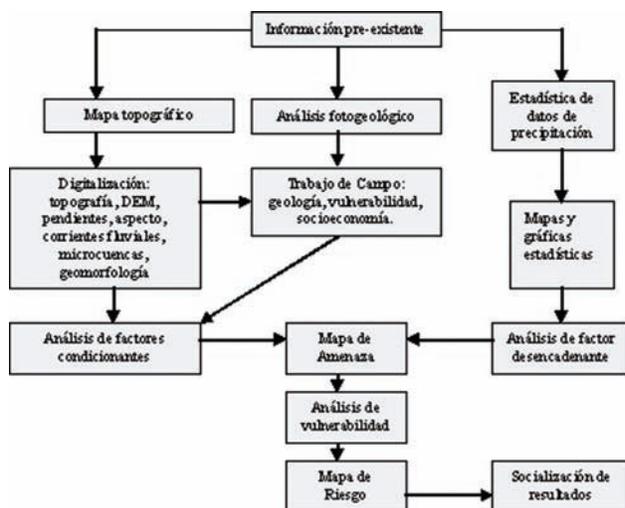


Figura 5.1. Secuencia metodológica para la determinación de riesgo.

¹ Smith, G., & Fritz, W., 1989, Volcanic Influences on Terrestrial Sedimentation: Geology, v. 17, p. 375-376.

² Iverson, R., 1997, The Physics of Debris Flow: Reviews of Geophysics, v.35, p. 245-296.

³ Coussot, P., 2003, Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Davos, Switzerland.

⁴ Hansen, A. 1984. "Landslide hazard analysis". In Brunsden, D and Prior, D.B (eds.) Slope instability. Chichester: John Wiley and Sons. 523-602.

A continuación se realiza una descripción breve de cada uno de los factores condicionantes de las amenazas, algunos de los cuales ya fueron examinados en las secciones previas de geomorfología e hidrometeorología.

5.1. Entorno hidrológico

Debido a que la generación y desarrollo de flujo de detritos tiene un fuerte control hidrológico se elaboró un mapa de corrientes fluviales, efímeras e intermitentes, el cual sirvió de base para la delimitación de las microcuencas de la zona y la delimitación espacial parcial de la amenaza. Ambos mapas se mostraron en la sección de geomorfología.

Los mapeos geológicos realizados y que se describen más abajo revelan que los flujos de lodo se desarrollaron principalmente a lo largo de cinco microcuencas que son de norte a sur: a) El Cementerio, b) Panabaj Norte, c) Panabaj Sur, d) Tzanchaj, y e) La Providencia. La extensión areal y naturaleza de estos flujos de detritos se describe más adelante en la sección de geología.

Los flujos de lodo que descendieron por la microcuenca El Cementerio afectaron a los cantones Pachichaj, Panul, y Chuul que se localizan en el extremo norte de la cabecera municipal de Santiago Atitlán. El análisis del entorno hidrológico reveló que la comunidad de Panabaj se encuentra emplazada en un sector donde confluyen dos sistemas de corrientes fluviales (microcuencas Panabaj Norte y Panabaj Sur) a lo largo de los cuales se generaron flujos de lodo con un volumen total aproximado de 1km^3 de sedimentos. Los flujos de lodo que se han generado recientemente en la microcuenca La Providencia no han causado mayores daños pero siguen representando una amenaza significativa para los residentes y la infraestructura de este sector.

La región no cuenta con ninguna estación de monitoreo de caudales y/o transporte de sedimentos que permita cuantificar los flujos. Sin embargo, la simulación de caudales en base a la morfometría de las microcuencas que se realizó en la sección de geomorfología muestra que en eventos extremos de precipitación fluvial pueden generarse caudales que rebasan notablemente la capacidad de transporte de los canales fluviales que puede inferirse en base a los levantamientos topográficos que se hicieron.

5.2. Geomorfología fluvial

La evaluación de las características regionales del paisaje se describieron en la sección de geomorfología. Las elevadas pendientes de la zona condicionan un comportamiento torrencial en los canales fluviales cuyos flujos al llegar a la parte baja de las microcuencas, bajan repentinamente su velocidad ocasionando una depositación de la carga sedimentaria que culmina con la generación de abanicos aluviales. Es de hacer notar que para la formación de abanicos aluviales, son las menores pendientes (0-15 grados) las más propensas a ser receptoras de los flujos de detritos, y de ahí su elevado grado de peligrosidad. Caso contrario sucede con los demás movimientos de ladera, los cuales son propiciados por las pendientes elevadas.

Los resultados del mapeo geológico que se indican más abajo, y los estudios geológicos previos realizados por investigadores de USA, sugieren que gran parte de la zona sur de Santiago Atitlán ha sido receptora de millones de m^3 de lodo lo que ha ocasionado la formación de la planicie volcánico lacustre, una de las principales unidades de paisaje, compuesta por abanicos aluviales. En relación con esta unidad de paisaje es importante destacar la capacidad de migración que pueden tener los canales fluviales alojados en abanicos aluviales como el presente en la parte baja de las microcuencas Panabaj Norte, Panabaj Sur, y Tzanchaj, tornándose en una amenaza por futuras inundaciones después de la ocurrencia de flujos de escombros, pues muchos de los canales principales se rellenan o cambian de cauce.

Tal y como se describió en la sección socioeconómica, la recurrencia de los flujos de detritos ha sido tal que derivó en asignar el nombre de Panabaj (flujo de lodo en Tzutujil) a una de las comunidades emplazadas en la planicie. De acuerdo a los ancianos de Santiago Atitlán, hace unos 45 años se registró un flujo de lodo voluminoso en la planicie pero para esa época prácticamente la zona no estaba poblada. La evidencia geológica que se describe a continuación muestra que la intensidad de los flujos de lodo ha sido de carácter catastrófico.

5.3. Elevación topográfica

Se realizó un modelo de elevación digital (DEM, Figura 5.2) a partir de un arreglo irregular triangulado (TIN) que se derivó de contornos digitalizados (intervalos de 20 metros) provenientes del mapa topográfico, a escala 1:50 000. En la zona se puede observar que la elevación topográfica varía desde 1,560 en el Lago de Atitlán hasta 3,537 metros sobre el nivel del mar en la parte más alta del volcán Atitlán.

La elevación topográfica es uno de los factores condicionantes más importantes a evaluar, pues en los modelos de movimientos en masa y específicamente en los flujos de escombros, los sitios más bajos y planos son los lugares más adecuados para la depositación de los sedimentos, paradójicamente también, son los sitios más cotizados para el desarrollo urbano.

Los mapeos geológicos realizados que se describen más abajo muestran que existe una fuerte relación entre el origen de los movimientos de ladera y la elevación topográfica ya que los flujos de escombros se han originado a los 1721, 1860, 2447, y 3150 metros sobre el nivel del mar (msnm). Sin embargo, son las cotas más bajas los sitios más adecuados para la depositación de la carga sedimentaria y el desarrollo de abanicos aluviales. Las comunidades que han sido afectadas por los flujos de detritos se localizan entre 1,560 y 1,600 msnm.

Tal y como se muestra con los levantamientos topográficos realizados por CORDILLERA y que se incluyen en el Anexo II, el nivel del lago ha bajado considerablemente en las últimas décadas con la línea del lago actual ubicada a unos 150m de donde se encontraba hace 46 años.

5.4 Pendientes

La inclinación de las laderas o el ángulo de los taludes es un componente esencial para la estabilidad de los taludes. A partir del modelo de elevación digital, se generó el mapa de distribución de pendientes que se muestra en la Figura 5.3.

La máxima ocurrencia del origen de los flujos de escombros sucede cuando el ángulo del talud varía entre $30^\circ - 50^\circ$. También existe una zona situada al sureste, asociada a la caldera del Lago de Atitlán, que con pendientes entre 50 y 87° genera caída de bloques.

Finalmente, la zona que se considera más crítica, se refiere al sitio de formación de abanicos aluviales o de depositación de la carga sedimentaria de los flujos de escombros, que es cuando las pendientes tienen menos de 15° de inclinación, y es donde se sitúa la mayoría de comunidades, especialmente T'zanchaj, Panabaj, Santiago Atitlán y Pachichaj.

Es de hacer notar que hacia el Sur, en la ladera Occidental del Volcán Atitlán, las pendientes de $0-15^\circ$ son las más frecuentes, y una pequeña zona comprendida entre $30-50^\circ$ se restringe al aparato volcánico, sugiriendo el avanzado grado de erosión que ha sufrido este volcán. Estos procesos erosivos están asociados a la generación de abanicos aluviales, en condiciones de flujos de escombros.

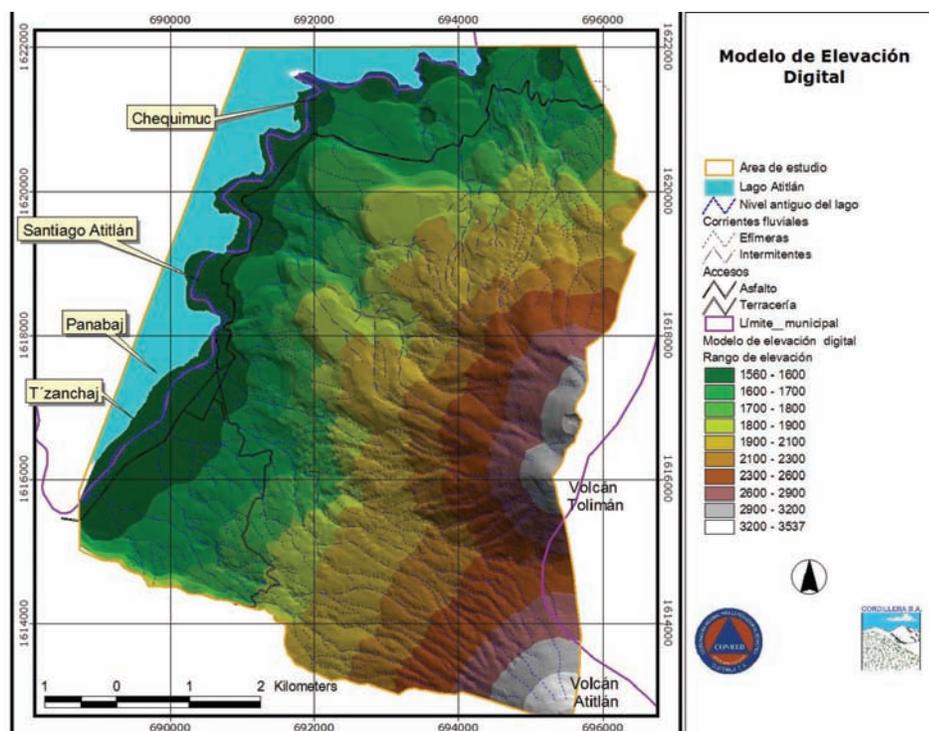


Figura 5.2. Modelo de elevación digital de la zona estudiada (CORDILLERA S.A. 2006).