

ESTUDIO PRELIMINAR DE AMENAZAS NATURALES EN LA CUENCA DEL RIO TURRIALBA, CANTON TURRIALBA, COSTA RICA

CAPACITY BUILDING FOR NATURAL DISASTER REDUCTION (CBNDR)
REGIONAL ACTION PROGRAM FOR CENTRAL AMERICA (RAPCA)



Turrialba, Julio 2000

Para mayor información contactar:

Dr. Cees van Westen
International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)
P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands
E-mail: westen@itc.nl

Información sobre los resultados del proyecto RAPCA pueden ser obtenidos en la página de internet referenciada a continuación:

<http://bb.itc.nl>

Username: UNESCO

Password: RAPCA

Seleccione: Organizations in which you are participating: UNESCO RAPCA

INDICE

	PREFACIO	1
	LISTADO DE PARTICIPANTES	2
1.	INTRODUCCION	3
2.	OBJETIVOS	
2.1	GENERALES	4
2.2	ESPECIFICOS	4
3.	CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	
3.1	UBICACIÓN Y CENTROS POBLADOS	5
3.2	CARACTERISTICAS BIOFISICAS	6
3.2.1	Geomorfología y Suelo	7
4.	GEODINAMICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO TURRIALABA	
4.1	REGIMEN HIDROMETEOROLOGICO	10
4.1.1	Precipitación	10
4.2	REGIMEN SISIMICO	11
4.2.1	Fallas importantes	12
4.2.2	Historia Sísmica	13
4.2.3	Implicaciones Sísmicas en la Ciudad de Turrialba	14
4.3	ACTIVIDAD VOLCANICA	16
4.3.1	Información General del Volcán Turrialba	16
4.4	MOVIMIENTOS DE MASA	18
4.4.1	Situación Actual	18
5.	ANALISIS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO	
5.1	CONCEPTOS	19
5.2	AMENAZA HIDROLOGICA	19
5.2.1	Metodología para el Análisis de la Amenaza por Inundaciones	19
5.2.2	Resultados Obtenidos	21
5.2.3	Cálculo de Caudales	22
5.2.4	Canales de Drenaje	23
5.2.5	Análisis de Vulnerabilidad	24
5.3	AMENAZA SISMICA	29
5.3.1	Daños Reportados por el Sismo del 10 de Julio de 1993	29
5.4	AMENAZA VOLCANICA	32
5.4.1	Principales Amenazas Volcánicas	32
5.5	AMENAZA POR FLUJOS PIROCLASTICOS	33
5.5.1	Conceptos	33
5.5.2	Metodología	33
5.5.3	Resultados Obtenidos	34
5.5.3.1	Fotointerpretación y Observaciones de Campo	34
5.5.3.2	Análisis Digital	35
5.5.3.3	Zonas de Peligro	37
5.6	AMENAZA POR LAHARES	37
5.6.1	Concepto	37
5.6.2	Metodología	38
5.6.2.1	Fotointerpretación y Análisis de Curvas de Nivel	38
5.6.2.2	Observaciones de Campo	39
5.6.2.3	Análisis digital	40
5.6.3	Resultados Obtenidos	41
5.6.3.1	Fotointerpretación y Observaciones de Campo	41
5.6.3.2	Análisis Digital	47
5.6.3.3	Zonas de Alto Peligro	48
5.7	AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA	48
5.7.1	Concepto	48
5.7.2	Metodología	49
5.7.2.1	Método Indirecto	50

5.7.2.2	Método Determinístico	51
5.7.3	Descripción del Modelo	52
5.7.4	Trabajo de Campo	54
5.7.5	Resultados	55
5.7.5.1	Definición de los Distintos Tipos de Movimientos de Masas en el área	55
5.8	ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN LA CIUDAD DE TURRIALBA	
5.8.1	Recolección de Información	57
5.8.2	Boleta de Trabajo de Campo	58
5.8.3	Elaboración de Mapas	58
5.8.4	Vulnerabilidad Volcánica	60
5.8.5	Vulnerabilidad por deslizamientos	61
5.8.6	Vulnerabilidad por Inundación	61
6.	MANEJO DE DESASTRES EN LA CIUDAD DE TURRIALBA	
6.1	GENERALIDADES	65
6.2	Información, Planes de Prevención, Respuesta y Gestión del riesgo	67
7	CONCLUSIONES	73
8	RECOMENDACIONES	77
9	BIBLIOGRAFIA	85
10	ANEXOS	87

• **PREFACIO.**

En enero de 1,999 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Cultura y la Ciencia (UNESCO, por sus siglas en inglés) estableció un convenio de soporte financiero de 4 años de duración y como parte del Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (DIRDN) con el propósito de fortalecer las capacidades de los países de Centro América en materia de zonificación de amenazas y riesgos. Esta iniciativa de cooperación fue denominada Programa de Acción Regional para Centro América (PARCA).

Para garantizar la participación de los países centroamericanos la UNESCO decidió involucrar al Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), la cual es la instancia regional oficial encargada de la coordinación de actividades relacionadas con la reducción de los Desastres Naturales, así también se designó al Instituto Internacional de Levantamientos Aerospaciales y Ciencias Terrestres (ITC, por sus siglas en inglés) y a las Universidades de Utrech y Delft de Holanda para cumplir las funciones de Secretaría General del Programa.

El propósito del Plan de Acción Regional es fortalecer la capacidad de toma de decisiones de los países centroamericanos en materia de reducción de desastres naturales, utilizando información técnica y científica para el desarrollo de metodologías participativas. Esto se lograría a través del entrenamiento de expertos en el campo de las amenazas naturales como actividad sísmica, actividad volcánica, deslizamientos e inundaciones, así como en el uso de metodologías de zonificación de amenazas y riesgos basadas en Sistemas de Información Geográfica.

La primera actividad del Programa consiste en la conformación y entrenamiento de un equipo de 19 expertos de Centro América y República Dominicana quienes realizarían un estudio integral preliminar de las amenazas naturales que afectan la región de Turrialba, así como un análisis de vulnerabilidad y manejo de emergencias en la zona urbana, cuya metodología y resultados se presentan en el presente Informe, y posteriormente serán probados y validados en el resto de países con el propósito de desarrollar una metodología de zonificación de amenazas y riesgos aplicable en Centro América y el Caribe.

GRUPO DE ZONIFICACION DE AMENAZAS LISTADO DE PARTICIPANTES

Expertos de Centro América y El Caribe			
Nombre	Institución	País	E-mail
Malikah Cardona	Ministerio de Recursos Naturales, Ambiente e Industria	Belice	lincenbze@btl.net
María Calzadilla	Dirección General de Minería	Rep. Dominicana	direc.mineria@codetel.net.do
Patria Sánchez	Secretaría de Agricultura	Rep. Dominicana	patria63_99@yahoo.com
Manolo Barillas	Coord. Nac. para la Reducción de Desastres	Guatemala	enlaceyproyectos@infovia.com.gt
Estuardo Lira	CATIE-ESPRED-DE-MAGA	Guatemala	malira@quetzal.net
Mario Rodríguez	Coord. Nac. para la Reducción de Desastres	Guatemala	mcrc@intelnet.net.gt
Giovanni Molina	Dirección Gral. de Recursos Naturales Renovables	El Salvador	gmolina@telemovil.net
José Deras	Instituto Geográfico Nacional	El Salvador	ja_deras@yahoo.com
Javier Rivera	Centro de Investigaciones Geotécnicas	El Salvador	jariv@vianet.com.sv
Gonzalo Fúnes	Comisión Permanente de Contingencias	Honduras	gfunes_siercke@hotmail.com
Jorge Fúnez	Fondo Hondureño de Inversión Social	Honduras	mcparker@latinmail.com
Edwin Cruz	Secretaría Técnica y de Cooperación Internacional	Honduras	edwinacm@hotmail.com
Isidro Jarquín	Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales	Nicaragua	ijarquin@consultant.com
Chester Pérez	Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales	Nicaragua	perezchester@yahoo.com
Douglas Salgado	Com. Nac. de Prevención de Riesgos y Atención de Emerg	Costa Rica	dsalgado@cne.go.cr
Sergio Barrantes	Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo	Costa Rica	computo@sol.racsa.co.cr
Alvaro Clíment	Instituto Costarricense de Electricidad	Costa Rica	acliment@icelec.ice.go.cr
Moisés Ortega	Sistema Nacional de Protección Civil	Panamá	mortegag@hotmail.com
Leonidas Rivera	Universidad Tecnológica	Panamá	leonidas@geologist.com
Coordinadores y Staff Académico			
Nombre	Institución	País	E-mail
Dr. Niek Rengers	ITC (Director Programa)	Holanda	cbndr.unesco@itc.nl
Ir. Mark Noort	ITC (Admon. Programa)	Holanda	m.noort@itc.nl
Janneke Kalf	ITC (Secretaria Programa)	Holanda	kalf@itc.nl
Dr. Theo Van Asch	Universidad de Utrecht (Desliz.)	Holanda	t.vanasch@frw.ruu.nl
Dr. Luc Boerboom	ITC	Holanda	boerboom@itc.nl
Dra. Nanette Kingma	ITC (Deslizamientos)	Holanda	kingma@itc.nl
Prof. Jan Nieuwenhuis	Universidad de Delft (Hidrología)	Holanda	j.d.nieuwenhuis@osw.tudelft.nl
Ir. Siefko Slob	ITC-Delft (Vulcanología)	Holanda	slob@itc.nl
Ivo Thonon	Universidad de Utrecht	Holanda	lvothonon@yahoo.com
Dr. Koert Sijmons	ITC (Cartografía)	Holanda	sijmons@itc.nl
Ir. Rob Soeters	ITC-Delft (SIG)	Holanda	soeters@itc.nl
Dr. Cees van Westen	ITC (ILWIS)	Holanda	westen@itc.nl
Ir. Leon Wijnker	IWACO BV (Hidrología)	Holanda	L.Wijnker@dbo.iwaco.nl
Dr. Rutger Wahlström	Instituto GFZ Potsdam (Sísmica)	Alemania	rutger@gfz-potsdam.de

1. INTRODUCCION.

La región centroamericana es una zona de alta incidencia de fenómenos naturales que normalmente provocan desastres de gran magnitud con la consiguiente pérdida de vidas humanas, valores materiales, interrupción del crecimiento económico y deterioro de entornos ambientales.

Estadísticamente, los fenómenos que muestran el mayor grado de recurrencia en la región son los de tipo hidrometeorológico (inundaciones, tormentas tropicales y huracanes), deslizamientos de masa, actividad volcánica y actividad sísmica por lo que en los últimos años se han invertido una gran cantidad de recursos en medidas de mitigación y reducción de los daños que causan.

Una de las herramientas más importantes para el diseño y formulación de políticas y estrategias que permitan la reducción de la vulnerabilidad y el nivel de riesgo de la población es la zonificación de las amenazas mediante la elaboración de mapas regionales y locales, los cuales pueden ser utilizados por los planificadores urbanísticos, gobiernos y autoridades locales para la regulación del uso del suelo y la elaboración de Planes de Desarrollo.

El presente Informe contiene los resultados obtenidos luego del estudio integral de las amenazas naturales que afectan la región de Turrialba el cual se realizó con la colaboración del Grupo de Zonificación de Amenazas del Programa de Acción Regional para Centro América (UNESCO-CEPREDENAC-ITC) a través de trabajo de campo en la zona y la recopilación y análisis de información utilizando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica, específicamente el programa ILWIS y PC Raster desarrollados por instituciones de investigación de Holanda.

2. OBJETIVOS.

2.1 GENERALES.

- Evaluar las principales amenazas naturales de la cuenca del río Turrialba mediante la recopilación y análisis digital de información existente, reconocimiento de campo y zonificación espacial de amenazas utilizando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Desarrollar una metodología de evaluación y zonificación de amenazas naturales aplicable en los países de Centro América y El Caribe y que pueda ser utilizada por las Comisiones e Instituciones Nacionales de Emergencia y de Gestión de Riesgo para la formulación de políticas y estrategias de reducción de Desastres Naturales.
- Elaborar los mapas de amenaza por inundación, movimientos de masa, actividad volcánica y actividad sísmica en la cuenca del río Turrialba y el mapa de vulnerabilidad ante inundaciones de la ciudad de Turrialba.

2.2 ESPECIFICOS.

- Determinar y zonificar las áreas susceptibles a inundaciones de la ciudad de Turrialba y posibles estrategias de corrección del problema.
- Determinar y zonificar la amenaza por flujos piroclásticos y lahares en la cuenca del río Turrialba debido a la actividad del volcán Turrialba.
- Determinar y zonificar la amenaza por deslizamientos en las áreas aledañas a la ciudad de Turrialba.
- Determinar el grado de amenaza sísmica en la ciudad de Turrialba y recomendar acciones que permitan reducir la vulnerabilidad de la población.

3. CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.

3.1 UBICACIÓN Y CENTROS POBLADOS.

La cuenca del río Turrialba está ubicada en la provincia de Cartago, abarcando parte de los cantones de Jiménez, Alvarado y Turrialba, entre los paralelos 10° 00'00" – 9° 52'54" de latitud norte y los meridianos 83° 40'00" – 80° 49'00" de longitud oeste (Fig. 3.1) y comprendida en las hojas Tucurrique e Istarú, escala 1:50,000 del Instituto Geográfico Nacional.

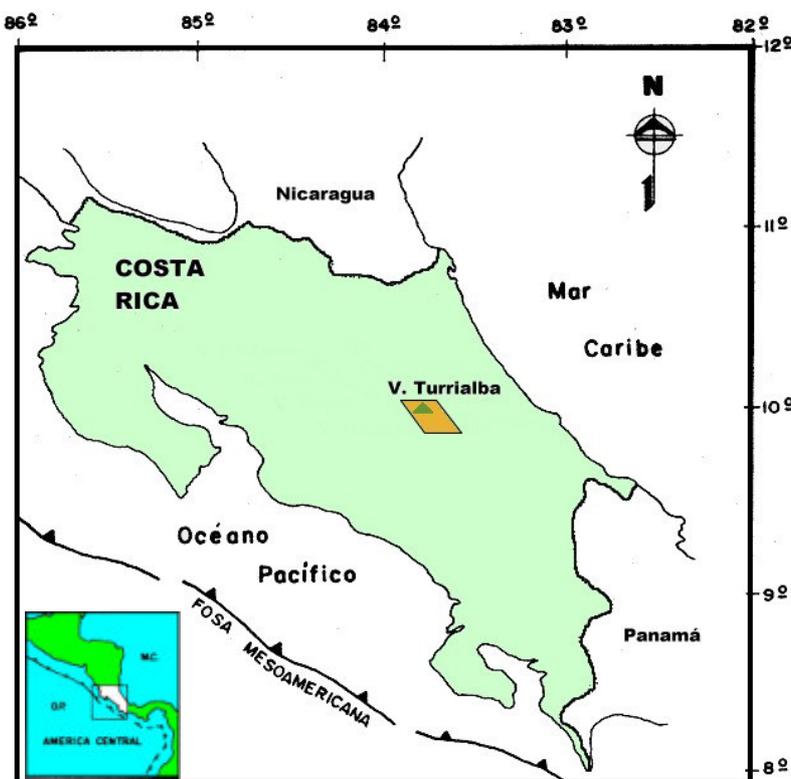


Figura No. 3.1 Ubicación de la cuenca del río Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica.

La cuenca del Turrialba abarca una superficie de 115.35 km², incluye las subcuencas del río AQUIARES, AZÚL, BLANCO y COLORADO, y a su vez es parte de la gran cuenca hidrográfica Reventazón-Parismina que comprende una superficie de 2,945.28 km², que equivale al 5.19% del territorio nacional.

Dentro de la cuenca están incluidos los poblados de Turrialba, San Rafael, Pueblo Nuevo, Recreo, Noche Buena, San Juan Norte, Alto Victoria,

Esmeralda, Santa Rosa, Verbena Sur, Río Claro, Aquiares, San Rafael, Carmen, Santa Cruz y Pastora, los cuales están interconectados por carreteras asfaltadas de carriles sencillos y caminos de terracería.

3.2 CARACTERISTICAS BIOFISICAS.

El clima de la cuenca está básicamente gobernado por la temperatura, humedad relativa y la precipitación pluvial. Según García (1990) la temperatura entre 1,968 a 1,986 en la estación CATIE (9°53'00"-83°38'00") presentó un valor promedio de 26.44° C con valores mínimos de 25.07° C durante el mes de enero y máximos de 27.63° C en el mes de mayo, con variaciones mensuales no mayores de 2° C (régimen isotermal) y diarias de 8° C en promedio. La humedad relativa promedio alcanzó el 87.60% con valores mínimos mensuales de 85% en marzo y máximos de 89.50% en noviembre.

El régimen pluviométrico es muy variable año con año, sin una estación seca bien definida sino solamente una disminución de las lluvias en los meses de febrero, marzo y abril pero con excesos de humedad ocasionalmente considerables durante el resto del año. Los máximos niveles de precipitación se dan durante los meses de junio y diciembre, aunque las máximas extremas registradas corresponden a abril y diciembre de 1,970 con 618 mm y 1,249.90 mm, respectivamente.

La cueca alta presenta una estructura productiva basada en la producción de leche por lo que el uso de suelo predominante es de pastizales, mezclado con algunos estratos de bosque medio y en menor escala para pequeñas áreas de cultivo de hortalizas. En la parte media predominan los pastos, café (sin sombra), plantaciones forestales, bosques, caña y aparecen las áreas habitacionales. Finalmente, en la parte baja predomina el café, caña, pastos y la zona urbana de la ciudad de Turrialba y poblados vecinos (Fig. 3.2).

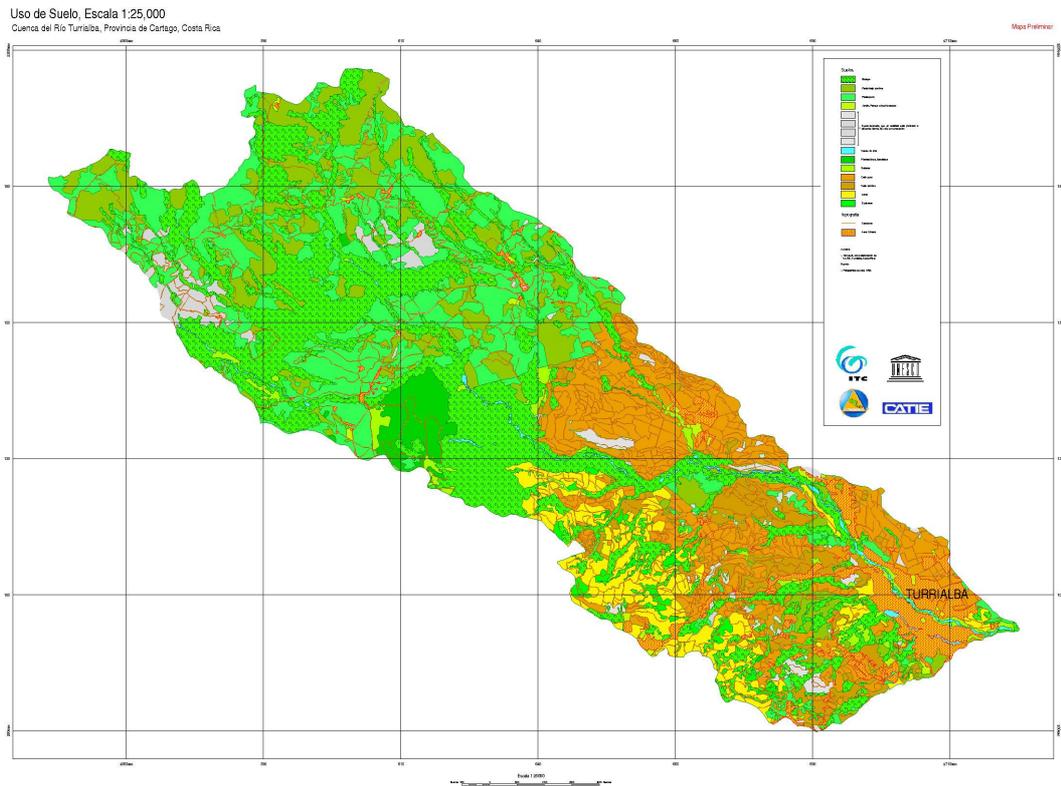


Figura 3.2 Mapa de uso del suelo de la cuenca del río Turrialba (Proporcionado por CATIE).

3.2.1 Geomorfología y Suelo.

A continuación se describen las unidades geomorfológicas definidas por Mora-Chinchilla (comunicación personal) para la cuenca del río Turrialba:

a) Formas/Unidades de Origen Volcánico.

Cono actual del volcán Turrialba (VVT): Laderas del cono activo del volcán Turrialba, compuestas de intercalaciones de coladas de lava y depósitos piroclásticos.

Cono piroclástico (VCO): Antiguos puntos de emisión de materiales piroclásticos.

Campos de piroclastos (VCP): Sectores cubiertos por emisiones de piroclastos, principalmente cenizas.

Escarpe de cráter antiguo (VEC): Escarpe interno de un relicto volcánico, compuesto principalmente de coladas de lavas fracturadas.

Fondo de cráter antiguo (VFC): Sección interna de un cráter volcánico antiguo.

Coladas de lava (VCL): Coladas de lava, algunas meteorizadas, con sectores cubiertos por depósitos piroclásticos.

Depósitos de lahares (VDL): Topografía relativamente plana, compuesta por depósitos de lahares generados durante el estado de desarrollo inicial del edificio volcánico del volcán Turrialba.

Depósitos de avalancha volcánica (VAV): Depósitos caóticos de bloques, inmersos en una matriz arenosa de media a gruesa y que son el producto del colapso de la ladera sur-este del cráter antiguo.

b) Formas/Unidades de Origen Denudacional.

Escarpes rocosos (DER): Escarpes subverticales a verticales, principalmente asociados a procesos denudacionales, como deslizamientos y caídas de rocas.

Áreas severamente afectadas por movimientos en masa (DSA): Sectores sujetos a fenómenos de inestabilidad de laderas, principalmente deslizamientos translacionales y flujos de detritos:

Depósitos coluviales (DDC): Sectores cubiertos por depósitos producto de fenómenos de inestabilidad de laderas, localizados al pie de sectores con pendientes fuertes (piedemonte).

Montañas y colinas denudacionales (DMC): Topografía de colinas a montañas, fuertemente disectadas y con la presencia de algunos sectores que muestran fenómenos de inestabilidad.

c) Formas/Unidades de Origen Fluvial.

Terrazas aluviales (FTA): Depósitos aluviales, causes antiguos del río Turrialba, compuestos de bloques de lavas de redondeados a subredondeados.

Cañón de río (FCR): Sectores de pendientes muy fuertes, asociados a la profundización de causes y que presentan problemas de inestabilidad constantemente.

Según el modelo de elevación digital (DEM), se tiene los siguientes rangos de pendiente y sus áreas promedios: entre 0 a 20% (con 60% del área), seguido del 20 al 50% (con 20 % del área) y por ultimo mayores del 50% (con 20 % del área).

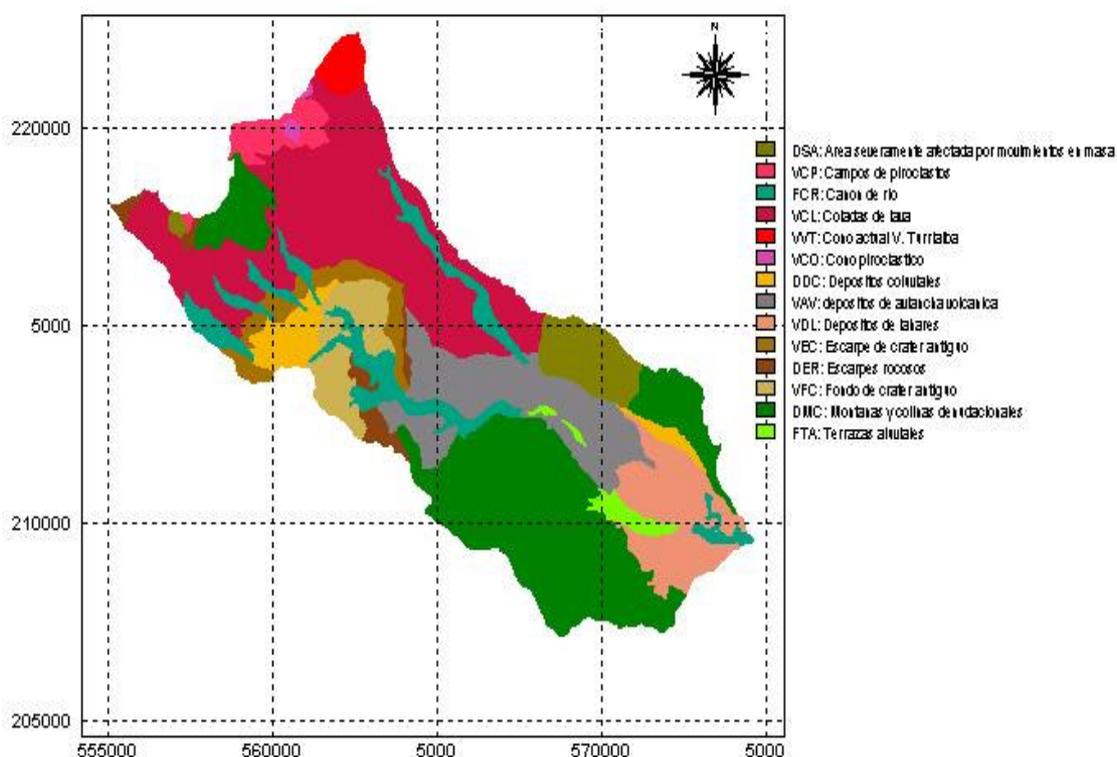


Figura 3.3 Mapa geomorfológico de la cuenca del río Turrialba (Elaborado por Rolando Mora-Chinchilla, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica).

4. GEODINAMICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO TURRIALBA.

4.1 REGIMEN HIDROMETEOROLOGICO.

La cuenca del Turrialba está conformada por 5 subcuencas, cuya información de superficie, elevaciones y longitud se muestran en la Tabla No. 4.1.

Tabla No. 4.1 Información general de la cuenca del río Turrialba.

No.	Nombre	Area Total (km ²)	Area de Descarga			
			Area Km ²	Elevación (m)		Longitud Cauce (m)
				Máxima	Mínima	
1	Turrialba	64.37	63.65	2,500	640	17,200
2	Colorado	11.14	10.38	1,220	645	6,700
3	Gamboa	9.45	1.67	960	620	2,500
4	Aquiaries	24.30	22.93	2,500 *	635	11,300
5	Azul	6.07	4.76	1,040	600	3,800

4.1.1. Precipitación.

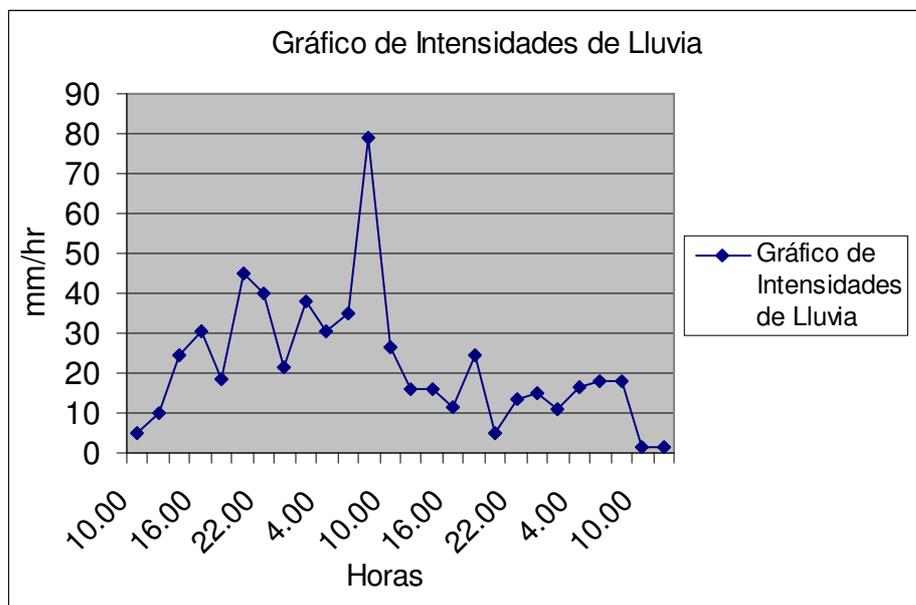
Para analizar el régimen pluviométrico de la cuenca se utilizaron los datos de las estaciones Pacaya (a 1,735 m sobre el nivel del mar) y CATIE (a 605 m), con un periodo de registros de 16 años. Un resumen de los datos se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla No.4.2 Intensidades de lluvia, para la estación Pacaya.

Fecha	INTENSIDADES DE LLUVIA POR TIEMPOS							
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	2 hr	6 hr	12 hr
Sep-83	67.2	54.0	54.0	43.6	31.4	21.3	9.9	5.0
Dic-87	57.6	57.0	52.0	39.2	22.6	15.85	11.58	10.22
Ago-91	98.4	79.8	69.6	49.2	30.7	21.7	13.11	7.0
Feb-96	57.6	40.2	36.0	25.4	16.5	10.3	8.03	7.18
Ago-97	115.2	115.2	103.6	70.4	68.8	44.8	17.8	9.16
Sep-98	98.4	96.6	81.6	66.0	42.1	31.95	15.61	7.97

Para la estación CATIE se obtuvieron datos del 12 al 14 de febrero del año 1996 con las cantidades de lluvia que se muestran en la Gráfica No. 4.1.

Gráfica No. 4.1 CANTIDADES DE PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN CATIE.



4.2 REGIMEN SISMICO.

La sismicidad en Costa Rica esta regida principalmente por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa Caribe. Este proceso además de generar los sismos de magnitud mayor (hasta 7,8) es el causante de la aparición de fallas locales en el interior del país. Este último tipo de fuente sísmica debido a su foco superficial y su cercanía a centros poblados ha sido la principal fuente de sismos destructivos en Costa Rica.

Históricamente los grandes sismos ($M > 7,0$) asociados a la subducción no han causados daños importantes en Turrialba debido principalmente a la lejanía de esta ciudad con respecto a dicha zona. Dado lo anterior este informe se concentra en discutir en forma breve el fallamiento local o superficial que ha sido identificado en las cercanías y alrededores de la ciudad en estudio como fuente principal de amenaza en la región.

4.2.1 Fallas Importantes

Con base a un reconocimiento neotectónico realizado en los alrededores de Turrialba Alvarado y colaboradores (1998) encontraron diferentes alineamientos fotogeológicos con claras evidencias de actividad cuaternaria,

varios de ellos particularmente activos durante el cuaternario superior (últimos 200,000 años) en donde las fallas presentan orientaciones predominantes nor-oeste y nor-este. Los principales alineamientos que coinciden con fallas han sido estudiados por medio de geología superficial, sismicidad histórica y en algunos casos, como la falla Pacuare, por medio de mediciones geofísicas.

Alvarado *et al.* (1988) hizo una descripción detallada de las fallas y alineamientos más relevantes (longitud > 5 km) en la región, algunas de las cuales, en función de su longitud, se han considerado como de mayor amenaza para Turrialba. Esta descripción se presenta a continuación (ver mapa de Fallas):

- *Falla Atirro*: consiste en una falla regional que se asocia con otros alineamientos dentro de la cuenca alta del río Pacuare. Esta falla se extiende alrededor de 12 km desde el cerro Atirro hasta el cerro Mirador.
- *Falla Pejibaye*: a lo largo del río Pejibaye se ha propuesto un alineamiento con una longitud mínima de 5 km pudiéndose extender hasta 11 km, el cual aparenta ser una falla normal con el bloque sur-este hundido, aunque no se ha encontrado evidencia neotectónica que soporte la idea de que se trate de una falla activa.
- *Falla Pacuare*: en las imágenes radar se observan claramente facetas triangulares en la margen derecha del río Pacuare las cuales se complementan con evidencias de campo. La solución de mecanismos focales para esta falla muestran una posible falla inversa con componente de rumbo dextral y una longitud superior a los 10 km, habiéndose presentado actividad sísmica posiblemente asociada a esa falla en 1979, 1980 y 1991.
- *Falla Chirripó*: se ha definido un alineamiento muy conspicuo a lo largo del río Chirripó, tanto en las imágenes satélite como en los mapas topográficos, pero cuya geología ha sido poco estudiada.

- *Falla Mollejones*: la falla afecta a brechas y conglomerados volcánicos de la formación Doan a lo largo de por lo menos 9 km.
- *Falla Bonilla*: se han encontrado eventos sísmicos pequeños que coinciden con esta posible falla.

4.2.2 Historia Sísmica.

Históricamente, dentro de un radio de 50 km del centro en Turrialba hay registros de 9 eventos sísmicos importantes con magnitudes entre 5,0 y 7,5 con profundidades generalmente superficiales (menos de 15 km) que han generado intensidades I(MM) de hasta grado VII en la ciudad (ver Apéndice 1: Escala de Mercalli modificada). Esta intensidad fue reportada principalmente durante el sismo de Limón del 22 de abril 1991, y que tuvo una magnitud de 7,6 (Barquero y Rojas, 1994). Dentro de un radio de 25 km no hay registro de grandes terremotos ($M > 5,5$) teniendo como único caso el sismo de Pejibaye de 1993 ($M=5,3$ y profundidad de 13 km). En el Mapa de Fallas se presenta la sismicidad reportada y registrada en el siglo XX con magnitud superior a los 3,5 grados.

Las fallas locales cercanas a la ciudad han generado intensidades máximas de grado VI (I(MM)) y el evento mayor relacionado a ellas ha tenido una magnitud local de 5,3 (10 de julio de 1993) y su epicentro se localizó en las cercanías de las fallas Atirro y Pejibaye, aproximadamente 10 km al sur de Turrialba. Este evento causó variedad de daños en la infraestructura de la ciudad de Turrialba incluyendo daños estructurales en vigas, columnas y paredes especialmente en viviendas.

Con relación a la fuente sísmica de subducción, se ha determinado con base en la sismicidad de los últimos 50 años (Boschini, 1989) que el temblor del 19 de noviembre de 1948 es el evento más importante con epicentro localizado en los alrededores de la ciudad de Turrialba. Este presentó una magnitud de grado 7 con una profundidad del foco de 70 km y una intensidad de grado V (MM) en la región de Turrialba. La actividad reciente (1984-1996) se

caracteriza por una mayor cantidad de eventos de magnitud moderada ($4 < M < 5$) y foco superficial en relación con los de foco profundo la cual ha podido ser registrada a partir de la instalación de instrumentación sísmica en el país.

Volviendo a la actividad sísmica mostrada en el Mapa de Fallas se puede notar cierta dispersión que no permite determinar con precisión posibles fallas activas, sin embargo, es importante anotar que algunos periodos de actividad más importantes coinciden con algunas fallas como las de Atirro y Pacuare (Climent, 1989). También se logró determinar que luego de los terremotos de Cóbano en marzo de 1990 (M 7,0) y de Limón de 1991 (M 7,6) la actividad sísmica de carácter superficial en la región de Turrialba se incrementó ya que tres eventos sísmicos importantes (magnitudes entre 4,1 y 4,4) se registraron entre octubre y noviembre de 1990 y se localizaron 15 km al sur de la población de Pejibaye y a 23 km al sur de Turrialba (Barquero y Rojas, 1992).

4.2.3 Implicaciones sísmicas en la ciudad de Turrialba

De acuerdo a algunos estudios realizados (Climent, 1989; Barquero y Peraldo, 1993; Barquero y Rojas, 1997; Alvarado *et. al*, 1998) se ha determinado que históricamente los sismos de subducción no han causado intensidades importantes en la ciudad de Turrialba y más bien son las fuentes más cercanas, como la que produjo el sismo de Limón y las fallas locales localizadas al sur y este de la ciudad de Turrialba, las que han producidos las intensidades mayores (VII y VI). Estos grados de intensidad producen daños en la infraestructura que se pueden considerar como moderadas dentro de la escala Mercalli Modificada que tiene como máximo el grado XII.

Con base en lo anterior se puede considerar que la amenaza sísmica en la ciudad de Turrialba esta regida principalmente por la ocurrencia de eventos de magnitud moderada ($< 6,5$) originados en las fallas locales cercanas, considerando que un evento en la misma fuente del sismo de Limón tendría un efecto similar o menor a un evento de magnitud 6,5 ocurriendo en la falla Atirro o Pacuare si se discute solamente desde el punto de vista de intensidad máxima.

Se ha encontrado sismicidad histórica y reciente relacionada principalmente a las fallas Atirro y Pacuare y con base en su longitud se pueden catalogar como dos de las más importantes fallas relacionadas con la amenaza de la ciudad de Turrialba. Alvarado *et al.* (1998) ha estimado algunas características sismotectónicas para estas fallas, incluyendo el sismo máximo posible (MCE) las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.3. Características sismotectónicas estimadas.

Falla	Long. (km)	Tipo	Rumbo	M (máx. posible)	M (max. prob.)
Atirro	9-23	Dextral	N35°-40°W	6,5	5,3
Pacuare	14	Inversa/dextral	N45°W	6,5	5,5

Con base en las estimaciones mostradas en la Tabla 4.3 se puede esperar que en las fallas cercanas a la ciudad de Turrialba se generen sismos de hasta magnitud 6,5 a distancias epicentrales entre los 10 y 15 km de la ciudad y se podría esperar intensidades hasta de VIII (Climent y Barquero, en preparación).

Del manejo y análisis estadístico de la ocurrencia de eventos sísmicos para el período 1980-1996 Climent y Barquero (en preparación) han determinado la tasa media de ocurrencia sísmica para diferentes regiones del país. Al considerar el valor para la región sur y este de la ciudad de Turrialba ($\log(N) = 2,69 - 0,70 * M$) y de extrapolar los resultados se puede estimar que un sismo de magnitud 5,5 puede ocurrir cada 15 años y uno de magnitud 6,5 cada 70 años.

4.3 ACTIVIDAD VOLCANICA.

4.3.1 Información General Del Volcán Turrialba.

El Volcán Turrialba pertenece a la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y está ubicado en jurisdicción del cantón Turrialba en la provincia de Cartago. Su cráter principal se localiza en los 10° 02' de latitud Norte y 83° 46' de longitud Oeste.

Su génesis está relacionada a la Zona de Subducción Mesoamericana aunque sus características tectónicas y petrológicas están gobernadas principalmente

por zonas de fracturas tensionales de dirección preferencial NE, perpendiculares a la dirección de la Trinchera Mesoamericana y a la Cordillera Volcánica Central, lo cual le ha ubicado en una posición posterior al eje volcánico principal, 10 Km al noreste (Soto, 1988) (Fig. 4.1).

Este mismo fenómeno provoca que la geomorfología de este edificio volcánico está gobernada por estructuras volcano-tectónicas de dirección NE las cuales, en combinación con las unidades rocosas, muestran un paisaje de escarpes pronunciados, conos adventicios periféricos, graben cuspidal, cráteres alineados de apariencia caldérica, etc. fácilmente reconocibles en fotografías aéreas y en comprobación de campo.

Aparentemente, este arreglo tectónico-estructural es el que ha gobernado la actividad lávica fisural y principalmente, la generación de grandes avalanchas y/o flujos de detritos, que son las unidades geológicas que predominan en el flanco meridional del edificio en donde se ubican los centros poblados más importantes.

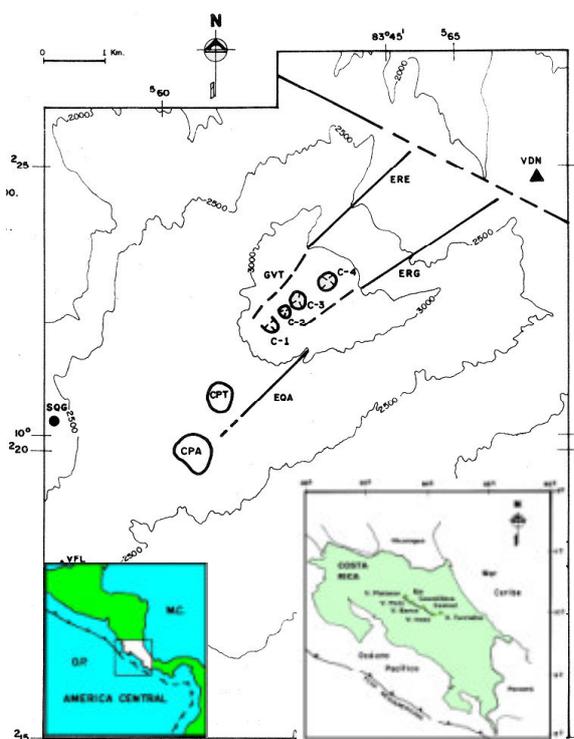


Figura No. 4.1 Ubicación del área de estudio y estructuras volcano-tectónicas en la zona de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica (Soto, 1988).

Históricamente, este volcán es responsable de varios eventos explosivos estrombolianos, freatomagmáticos y de fisura, que han producido depósitos piroclásticos, avalanchas, deslizamientos y coladas lávicas, habiéndose identificado hasta 17 unidades geológicas diferentes compuestas principalmente por andesitas basálticas a andesitas silíceas, tefras andesíticas y flujos piroclásticos andesíticos, estos últimos ubicados predominantemente hacia los flancos oeste y sudoeste del cono (Soto, 1988).

Reagan, Hill and Soto (inédito) agrupan estas sub-unidades en 3 grandes unidades, la más antigua de ellas (Unidad C) compuesta por dacitas, andesitas y basaltos calcoalcalinos; mientras que la unidad media (B), que sobreyace concordantemente a la anterior, está formada por andesita calcoalcalina y sobreyacida por la unidad más joven (A) formada por basaltos y andesitas calcoalcalinas, siendo el contenido de potasio el elemento que facilita la diferenciación entre dichas unidades.

4.4 MOVIMIENTOS DE MASA

La cuenca del Río Turrialba se ha caracterizado por una abundante presencia de deslizamientos, este fenómeno se debe a numerosas causas.

La región se encuentra emplazada en un sistema montañoso cuyos valores de pendiente varían de manera brusca desde la cota 600 metros hasta 2800 metros sobre el nivel del mar en una corta distancia de 12 km. La región es afectada por una alta pluviometría, por lo que sumado a los valores promedios de pendiente que afectan al sistema montañoso (39^o valor relativo al área de estudio tomada) ha propiciado que se genere una cierta degradación de los suelos. También las malas prácticas agropecuarias han contribuido a que se acelere dicho proceso, dando paso a la formación de áreas de inestabilidades de taludes.

La geología del área está caracterizada por tener una amplia cobertura de depósitos de lahars y lavas, compuestos por una matriz arcillosa con grandes bloques de rocas volcánicas incluidas. El tamaño de estos bloques varían en función de la distancia al volcán.

Los usos que predominan en la zona son el cultivo de café Caturra en extensas áreas, así como la ganadería extensiva básicamente, también algunas áreas presentan remanentes de vegetación boscosa.

4.4.1 Situación actual.

La falta de un manejo adecuado de los recursos naturales y de planificación ha creado un impacto negativo en la región y se puede considerar que una gran parte de los deslizamientos son inducidos por la actividad humana, por lo que es de considerar su análisis y evaluación.

5. ANALISIS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO.

5.1 CONCEPTOS.

Para los propósitos de este estudio se utilizaron como base los conceptos básicos presentados por la WWO (1999) en su documento TD No. 955:

- **Amenaza:** “Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino dentro de un período de tiempo y un área dada”.
- **Vulnerabilidad:** “Grado de pérdidas expresado en porcentaje resultante de un fenómeno potencialmente dañino”.
- **Riesgo:** “Pérdidas esperadas de vidas, heridos, daño a la propiedad y daños a la economía debido a una amenaza en particular para un período de referencia y un área dada”.
- **Desastre:** “Fuerte interrupción en el funcionamiento de una sociedad que causa pérdidas humanas, materiales y/o ambientales que exceden la capacidad de respuesta propia de la sociedad afectada. Los desastres pueden ser clasificados de acuerdo a su velocidad de ocurrencia o a su causa (naturales o producidos por el hombre”.

5.2 AMENAZA HIDROLOGICA.

5.2.1 Metodología para el análisis de la amenaza por inundaciones

El estudio de los componentes o factores incidentes en el aumento de los caudales es de fundamental importancia para comprender el comportamiento en los niveles de los caudales, así como de los efectos que se generan al sobrepasar la capacidad de los drenajes en evacuar las aguas.

Esta evaluación nos define cuando la población, así como su infraestructura productiva y de servicio se vuelven vulnerables a las crecidas de los ríos. El procedimiento de estudio de las inundaciones en la ciudad conlleva los siguientes pasos:

- Se delimitó la sub-cuenca del río Turrialba y las diferentes micro-cuencas que pasan por la ciudad usando los cuadrantes topográficos a escala 1:50000 considerando la cuenca hidrográfica como la unidad de estudio y planificación hidrológica y de los recursos naturales.
- Se analizaron las fotografías aéreas de la zona para su foto interpretación así como las curvas de elevación para la elaboración del modelo digital de elevación (DEM) y su posterior chequeo de campo definiendo la Geomorfología, características del suelo y del uso de la tierra.
- Se emplearon datos de intensidad máxima de lluvia de las estaciones meteorológicas de Pacayas y CATIE, con el propósito de estimar cantidades de escorrentía en los drenajes de las diferentes micro-cuencas.
- Se tomaron medidas de algunos puntos de los drenajes para estimar la capacidad hidráulica en la evacuación de las aguas. Las medidas del río Colorado están hechas en base al trabajo desarrollado por Hernán Solís y otros en 1994.

- Se efectuaron además trabajos de campo para ubicar y elaborar mapas de las áreas más susceptibles a inundaciones. Los coeficientes de escorrentía para el cálculo de los caudales fueron tomados de las tablas del Método Racional. (Chow. V, 1988) y se calcularon para la cuenca con el programa ILWIS.
- Con dicha información se efectuaron los cálculos de caudales por micro-cuenca y los mapas de amenaza y vulnerabilidad utilizando el Sistema ILWIS (Sistema Integrado para información de tierra y Agua).

5.2.2 Resultados obtenidos.

Se calcularon los tiempos de concentración para diferentes micro cuencas de estudio (Gráfica 5.1). Para ello se empleó la fórmula de Kirpich.

$$T_c = 0.0078 L^{0.77} S^{-0.385}$$

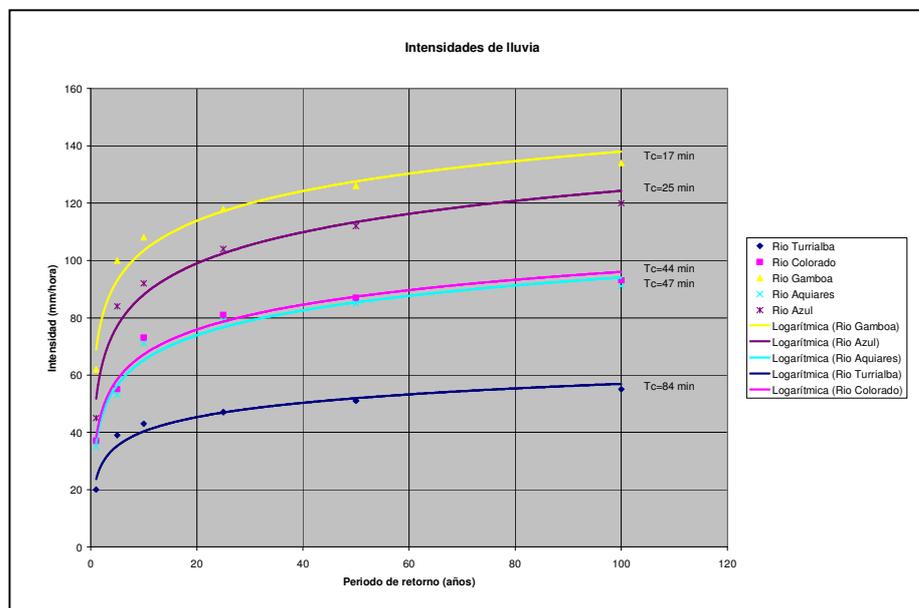
donde :

L = Longitud del canal principal.

S = Pendiente del río entre el punto mas bajo y mas alto del canal principal.

También se empleó la fórmula de *California Culverts Practice* para confirmar los resultados.

Gráfica 5.1 Tiempos de concentración para diferentes ríos de la cuenca.



Como se puede observar los tiempos de concentración varían según la longitud del cauce y de la pendiente.

5.2.3 Cálculo de Caudales.

Se utilizó el Método Racional para las diferentes áreas de drenaje que pasan por la ciudad. Para ello se utilizaron los datos anteriormente estudiados para diferentes periodos de retorno.

$$Q = 0.28 \cdot C \cdot I \cdot A$$

donde:

Q = Metros cúbicos por segundo.

0.28 = Constante.

C = Coeficiente de escorrentia.

I = Intensidad de precipitación (mm/h).

A = Area en kilómetros cuadrados.

Tabla 5.1 Caudales de los ríos de la cuenca Turrialba.

Rational method					
$Q=0,28 \cdot C \cdot i \cdot A$					
	Periodo retorno año	Area (A) km2	Coef. Escorrentía (C)	Intensidad (I) Mm/hora	Descarga (Q) m3/s
Río Turrialba Tc=84 min.	1	63,65	0,4	20	143
	5	63,65	0,4	39	278
	10	63,65	0,413	43	317
	25	63,65	0,452	47	379
	50	63,65	0,484	51	440
	100	63,65	0,5	55	490
Río Colorado Tc=44 min.	1	10,38	0,4	37	43
	5	10,38	0,4	55	64
	10	10,38	0,413	73	88
	25	10,38	0,452	81	106
	50	10,38	0,484	87	122
	100	10,38	0,5	93	135
Río Gamboa Tc=17 min.	1	1,67	0,4	62	12
	5	1,67	0,4	100	19
	10	1,67	0,413	108	21
	25	1,67	0,452	118	25
	50	1,67	0,484	126	29
	100	1,67	0,5	134	31

	Periodo retorno año	Area (A) km2	Coef. Escorrentía (C)	Intensidad (I) Mm/hora	Descarga (Q) m3/s
Río Aquiares Tc=47 min.	1	22,93	0,4	35	90
	5	22,93	0,4	53	136
	10	22,93	0,413	71	188
	25	22,93	0,452	79	229
	50	22,93	0,484	85	264
	100	22,93	0,5	91	292
Río Azul Tc=25 min.	1	4,76	0,4	45	24
	5	4,76	0,4	84	45
	10	4,76	0,413	92	51
	25	4,76	0,452	104	63
	50	4,76	0,484	112	72
	100	4,76	0,5	120	80

5.2.4 Canales de Drenaje.

Los datos que se presentan a continuación corresponden a los perfiles de puntos específicos para los canales de drenaje de los ríos Turrialba, Colorado y Gamboa.

Quebrada Gamboa. Los datos que se presentan de las áreas son datos promedios de los canales o drenajes.

Tabla 5.2 Areas Hidráulicas de los Drenajes de Turrialba, Colorado y Gamboa.

No.	Río o Quebrada	Punto	Area (m ²)
1	Río Turrialba	Puente Alegría	405
2	Río Turrialba	Puente Ferrocarril	668
3	Río Colorado	Puente Independencia	36.50
3	Río Colorado	Puente Ferrocarril	23
4	Qda. Gamboa	Barrio América	0.8

5.2.5 Análisis de Vulnerabilidad.

La comparación de los datos de descarga con los de capacidad hidráulica de los diferentes drenajes nos arrojan los siguientes reportes:

a) Río Turrialba.

La capacidad hidráulica del río es suficiente, por cuanto se tiene en promedio en el puente Alegría un área de 405 m², si el caudal estimado a un periodo de retorno de 100 años es de 500 m³/s y una velocidad promedio de 3 m/s, de lo anterior podemos inferir que en el río Turrialba el punto de intersección de la avenida 6 y calle 3, la altura del borde superior e inferior del cauce del río es bajo, por lo cual en avenidas máximas de lluvia se corre el riesgo de que el

agua ingrese a este sector de la ciudad, así como, por el socavamiento de sus márgenes. A lo anterior se puede añadir que las casas que están en la parte baja de la rivera del río corren el riesgo de ser dañadas o arrastrada.

b) Río Colorado.

El río Colorado es el que históricamente mas problemas ha ocasionado inundaciones a la ciudad. Si observamos la capacidad de drenaje del canal con respecto a las descargas, podemos deducir que este sector de la ciudad cada 5 a 10 años puede tener avenidas drásticas, provocando inundaciones en sus áreas aledañas.

Este problema del río Colorado ha sido provocado por la misma gente al habersele reducido su capacidad de drenaje por las construcciones que se tienen; y por no tenerse un control estricto del ordenamiento urbano, este problema es mas crítico desde la avenida 2 (puente Independencia), donde se tienen una bóveda .

c) Quebrada Gamboa.

El problema para este drenaje comienza desde que la escorrentia ingresa a la ciudad por los sistemas de construcción que se han hecho sobre su cauce, haciéndose mas agudo en la parte plana (sector del barrio Américas).

El área reducida del canal (0.8m^2), contrasta con el caudal que baja de la micro cuenca que es de 12 m^3 , para periodos de retorno de un año, es decir, que en este sector se corre el riesgo de que cada año se tengan las posibilidades de inundación por posibles bloqueos de su cauce cuando el agua arrastra materiales de desecho de la ciudad o de áreas rurales.

d)Ríos Aquiares Y Azul.

Debido a la expansión de la ciudad en áreas aluviales, las zonas de inundación se incrementan; como es el caso del río Aquiares en el sector conocido como, El Mora en su área lindando con el río, de igual forma la parte baja, del sector conocido como Repasto. Igual situación se puede presentar en la rivera del río Azul si se llegan a edificar construcciones en sus márgenes.

En los mapas anexos se detallan las áreas de amenaza (zonas aluviales) de la cuenca que pueden ser susceptibles a inundaciones así como las áreas urbanas mas vulnerables a riesgo de inundación recurrente. Además, se incluyen algunas fotografías de inundaciones ocurridas en 1996 en la ciudad de Turrialba (proporcionadas por Manuel Mora, Fotoestudio Mora, Turrialba).



Fotografía 5.1 Vivienda inundada por el río Colorado en el centro de Turrialba.



Fotografía 5.3 Otra vista de los escombros en el puente del Colorado.



Fotografía 5.4 Inundación en la calle de Estudio Mora, a un lado del área recreativa.



Fotografía 5.5 Estrangulamiento del cauce del río Colorado en el centro de la ciudad



Fotografía 5.6 Punto en el cual las aguas del río Colorado sobrepasan el nivel del canal e inundan la ciudad



Fotografía 5.7 Morfología y grado de erosión causado por el río Turrialba.

5.3 AMENAZA SISMICA.

5.3.1 DAÑOS REPORTADOS POR EL SISMO DEL 10 DE JULIO DE 1993.

Las mayores intensidades en la ciudad de Turrialba han sido reportadas durante los sismos de Limón 1991 y Pejibaye (Turrialba) 1993. Considerando lo anterior se decidió realizar un inventario detallado de los daños para cada uno de ellos y luego reproducir un mapa de los mismos. Estos mapas permitirán conocer el tipo de daño a esperar en el futuro para eventos similares y las zonas donde se presentaran los mismos. Para el primero de ellos (del año 1991) no fue posible encontrar suficiente información para realizar el objetivo deseado. En el caso del segundo evento se obtuvo la cooperación del Instituto Nacional de Seguros (INS) y se tuvo acceso a aproximadamente 396 expedientes de reclamo de daños (ver Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Tipos de daño reportados y asignación de código

Código	Tipo de daño
A	Daño no estructural en paredes (paredes agrietadas)
B	Pisos agrietados
C	Reventadura de paredes (repellos)
D	Daño en vigas o columnas
E	Vidrios quebrados
F	Objetos caídos
I	Daño estructural en paredes
J	Daños en cielorazo y techos
K	Daños en tuberías

Una vez obtenido el inventario de daños y sus códigos se clasificaron en Daño Severo, Daño Moderado y Daño Leve. Para esta nueva clasificación se utilizó un criterio de daño desde el punto de vista ingenieril en el cual aquellas viviendas o locales que reportaron daño estructural en paredes, vigas o columnas se clasificaron como de daño severo. Cuando no hay reporte de daño estructural, pero si daños en pisos, paredes y repellos se considero como daño Moderado y cuando se reportó algún daño en forma aislada (menos el daño estructural) se considero como daño Leve.

En la Figura 5.1 se presenta el número total de veces que cada tipo de daño fue reportado. De las 396 casas o locales que presentaron su reporte el tipo de daño que más veces es nombrado de un 100 por ciento son los siguientes: reventadura en repello (24.4 %), seguido por pisos agrietados (18.5 %), daños no estructurales en paredes (15,9 %), daño en vigas y columnas (13,4 %) y daños estructurales en paredes (11 %) y son respectivamente nombrados en 297, 225, 194, 163 y 134 veces.

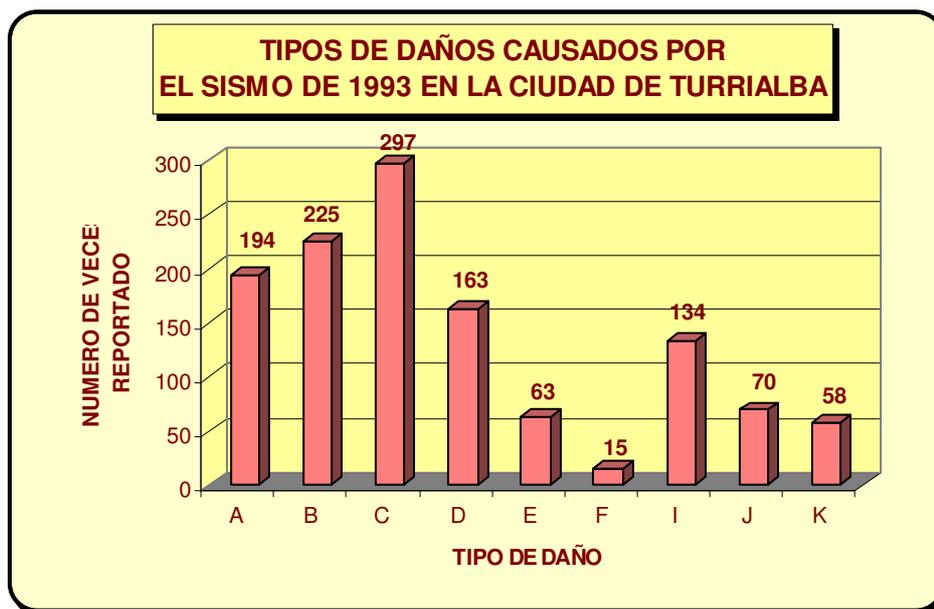


Figura 5.1 Número de veces que un tipo de daño fue reportado.

En el Mapa que se anexa se muestra la distribución de los daños en la ciudad de Turrialba (reportados al INS) para cada lote en el cual se puede observar que no hay una tendencia en la localización de los daños sino que aparecen en forma dispersa en toda el área de estudio. Considerando lo anterior y a la homogeneidad geológica sobre la cual se asienta la ciudad de Turrialba (abanico aluvial) no fue posible realizar una microzonificación basada en las variaciones de las condiciones geológicas.

Se considera que en buena medida los daños reportados durante el evento sísmico de 1993 están relacionados a malas prácticas de diseño y construcción, así como a incumplimiento en las normas de calidad de los materiales utilizados. Se puede también anotar que en algunos casos adicionales hay viviendas ubicadas en sitios con problemas de estabilidad de laderas, como por ejemplo Pueblo Nuevo y Noche Buena, etc.

5.4 AMENAZA VOLCANICA.

5.4.1 Principales amenazas volcánicas.

La historia de las pasadas erupciones de los volcanes de la Cordillera Central indica que el volcán Turrialba muestra al menos una erupción moderada (con Índice de Explosividad Volcánica de 2) entre el período de 1864 y 1966, la cual pudo caracterizarse por caída de ceniza, fuertes emisiones de gases y vapor de agua, tefra de tamaño mediano y actividad sísmica local moderada (Paniagua y Soto, 1988).

Esta historia ha sido construida con el estudio de los depósitos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas volcánicas, lahares y flujos de lodo que se encuentran en los alrededores del volcán, estos últimos ubicados principalmente en la parte norte y noreste del mismo (Paniagua y Soto, 1988; Soto, 1988; Reagan, Hill and Soto, inédito). El evento explosivo de 1864-1866 ha sido suficientemente documentado por Reagan, Hill and Soto (inédito) caracterizando los diferentes depósitos y el cambio drástico de la morfología de los cráteres, incluso registrando el alcance de las cenizas hasta lugares tan lejanos como Atenas, Grecia y de algunos pequeños lahares que afectaron principalmente el río Aquiares.

Debido al estudio de dichos ciclos eruptivos se infiere que lo más probable en el futuro es que se mantenga este comportamiento eruptivo explosivo moderado (estromboliano o freatomagmático), aunque no se descarta la ocurrencia de algún evento más violento de tipo pliniano (Paniagua y Soto, 1988) lo cual ya ha sido propuesto previamente luego de las observaciones de Walker (1982) y Melson *et al.* (1982) quienes interpretan que los extensos flujos de lava e ignimbritas en el Valle Central representan un largo período de vulcanismo explosivo fuerte y por lo sugerido por Reagan, Hill y Soto (inédito) quienes afirman que el grado de peligrosidad del evento estará directamente relacionado al contenido silícico de las lavas, ya que los eventos relacionados a andesita silícica parecen ser más peligrosos ya que producirían grandes nubes de cenizas, oleadas de flujos piroclásticos y lahares potencialmente destructivos.

Considerando entonces la potencia y extensión de las unidades lávicas y piroclásticas, así como las evidencias tefroestratigráficas del Valle Central, Paniagua y Soto (1988) consideran que los eventos que representan una potencial amenaza volcánica en el futuro son: 1) caída de depósitos piroclásticos; 2) explosiones dirigidas con emisión de piroclastos; 3) oleadas piroclásticas y explosiones freáticas asociadas; 4) avalanchas volcánicas; 5) flujos de lodo; 6) emisión de coladas de lava; 7) apertura de nuevos conos y/o efusión de lava fisural, y 8) dispersión de gases volcánicos y lluvia ácida.

5.5 Amenaza por Flujos Piroclásticos

5.5.1 Concepto

Estos depósitos incluyen las oleadas de flujos piroclásticos (nubes ardientes o *surges*) ocasionados por el colapso de una columna eruptiva producto de una explosión volcánica, por lo que se utilizarán los conceptos mencionados por Soto (1988) acerca de la zona de máximo riesgo de 7 km de diámetro ya delimitada alrededor del cono del volcán Turrialba que se vería afectada por erupciones plinianas y bloques de erupciones freáticas con un diámetro mayor de 30 cm, la de 10 km definida por Reagan, Hill y Soto (inédito) y las distancias a la que fueron identificados los depósitos de oleadas piroclásticas en la cima y adyacentes a los cráteres (otros autores) y en las faldas hasta distancias radiales de 4.5 km que fue lo definido en el presente estudio.

5.5.2 Metodología

Se utilizó el modelo de la “Línea de Energía” para delinear las zonas que podrían verse afectadas en el caso de una erupción explosiva del volcán Turrialba con alturas de columna colapsable de 100 a 300 m asumiendo que el flujo piroclástico generado se movería por el flanco bajo la influencia de su energía potencial (Wadge *et al.*, 1988 en RAPCA-GIS and hazard workshop, 2000) y lo cual puede ser calculado utilizando los siguientes parámetros de campo:

- Localización exacta del cráter eruptivo (latitud, longitud y altitud),

- Angulo de la Línea de Energía (μ), determinado por la altura de la columna eruptiva y la máxima distancia a la que llegarían los depósitos,
- Información topográfica, proporcionada por el Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés),
- Mapa de distancias del cráter hacia las diferentes zonas que se están evaluando, y
- Altura de la columna eruptiva, el cual puede ser variado con el propósito de crear y evaluar diferentes escenarios de amenaza.

El análisis de estos parámetros utilizando ILWIS (*The Integrated Land and Water Information System*) permiten determinar las zonas más apropiadas para la depositación de los piroclastos a diferentes intensidades de erupción.

5.5.3 Resultados obtenidos.

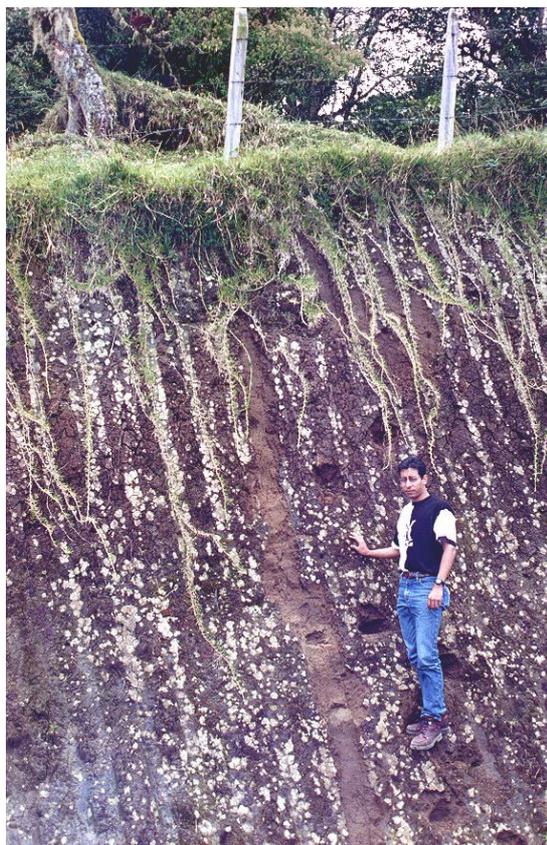
5.5.3.1 Fotointerpretación y Observaciones de campo.

Fotogeológicamente se identificaron al menos dos zonas con presencia de depósitos piroclásticos ubicadas al suroeste del cráter que son los cerros Tiendilla y El Armado, los cuales ya han sido reportados y estudiados con anterioridad (Salazar, 1996; Soto, 1988; Reagan, Hill and Soto, inédito).

Durante el recorrido de campo se identificaron depósitos de ceniza de caída libre, sin clastos o fragmentos de lapilli, de hasta 6 m de espesor (Foto 5.8) sobre coladas andesíticas en los alrededores del cráter y hasta una altitud aproximada de 1,800 m sobre el nivel del mar, es decir, que se identificaron estos depósitos hasta una distancia de al menos 4.5 km principalmente en los cortes de la carretera Pastora-Volcán Turrialba y en los cauces de los ríos Jesús María, Quebrada Lola y Guayabo. Estos depósitos son diferentes a los encontrados en el flanco norte del volcán, en donde consisten de lapillis fragmentados y depósitos de oleadas piroclásticas (*surges*) según lo reportado por Salazar (1996) y Reagan, Hill y Soto (inédito).

Sur-oeste

Nor-este



Fotografía 5.8 Depósitos de ceniza en las partes altas del volcán sin fragmentos o clastos de tamaño considerable. (Altura de la persona: 1.72 m).

5.5.3.2 Análisis digital.

Se obtuvo un Mapa de Amenaza por Flujos Piroclásticos (Anexo X), el cual muestra las zonas que se verían afectadas ante la ocurrencia de un evento explosivo con una columna eruptiva de 100, 200 o 300 m de altura, la cual al colapsar y viajar a través del flanco del volcán provocaría daños en el ecosistema, líneas vitales y centros poblados y además, rellenaría las zonas de baja topografía, principalmente los cauces de los ríos que podrían generar amenazas secundarias como lahares, flujos de lodo, etc.

El mapa obtenido muestra una zona de Amenaza Baja la cual se extiende desde la sub-cuenca intervolcánica Turrialba-Irazú (Río Toro Amarillo) en el oeste hasta la subcuenca del río Bonilla en el este, y hacia el sur abarca hasta

el poblado de Aquiares el cual sería el centro poblado más afectado por la parte distal del flujo piroclástico. Hacia la parte interna se ubica la zona de Amenaza Media, en la cual se encuentran incluidos los poblados de Santa Cruz y Pastora así como muchos pequeños caseríos y fincas. Y finalmente, hacia la parte más alta del volcán se ubica la zona de Amenaza Alta, la cual incluye el caserío Buenos Aires y un gran número de fincas y lecherías de tamaño pequeño (Hacienda La Fuente, Lechería Rodeo, Raicero, etc.). Así también, se vería afectada la infraestructura de comunicaciones terrestres en la zona (carreteras, caminos y veredas). La superficie de terreno comprendida en cada categoría de amenaza, superficie amenazada en las cuencas principales (Aquiares y Turrialba) y el correspondiente porcentaje se observan en la Tabla No. 4.1

TABLA No. 5.4
AREAS AMENAZADAS POR FLUJOS PIROCLASTICOS

Area	Superficie (km ²)	%	%Acum.
Amenaza Alta	5.78	5.01	5.01
Amenaza Media	8.26	7.16	12.17
Amenaza Baja	16.40	14.22	26.39
Sin Amenaza	84.91	73.61	100.00
Total	115.35*	100.00	-----
Subcuenca Aquiares ¹	11.98	10.39	10.39
Subcuenca Turrialba ¹	18.46	16.00	26.39
Resto de la cuenca (sin amenaza)	84.91	73.61	100.00
Total	115.35*	100.00	-----

* Superficie total cuenca del Río Turrialba.

¹ Superficie amenazada.

En general, los resultados de este análisis coinciden en gran medida con aquellos obtenidos por la Comisión Nacional de Emergencia de Costa Rica en su *Preliminary Hazard Map for Turrialba Volcano* (1990), ya que la forma de la cobertura amenazada es similar y está orientada hacia la parte sur-este del cráter.

5.5.3.3 Zonas de peligro.

Tomando como base los criterios del *Preliminary Hazard Map for Turrialba Volcano* (1990) corroborados y las observaciones de campo se infiere que el

poblado de **Aquiáres y caseríos vecinos** presentarían una pequeña amenaza por oleadas piroclásticas excepto las oleadas de nube de ceniza, baja amenaza de flujos piroclásticos durante erupciones basálticas (explosivas estrombolianas) y moderada en el caso de erupciones de andesita silícica (explosivas plinianas).

Para el caso de **Santa Cruz, Pastora y caseríos vecinos** se determinó una moderada probabilidad de ocurrencia de oleadas piroclásticas en cualquier tipo de erupción, moderada probabilidad de flujos piroclásticos durante una erupción basáltica y alta amenaza durante una erupción de andesita silícica.

Finalmente, **Buenos Aires, caseríos, lecherías y fincas vecinas** presentan una alta probabilidad de ocurrencia de oleadas piroclásticas durante cualquier tipo de erupción, moderada probabilidad de flujos piroclásticos durante una erupción basáltica y alta probabilidad durante una erupción de andesita silícica.

Se determinó igualmente que ninguna actividad piroclástica del volcán Turrialba afectaría a la mancha urbana de la ciudad de Turrialba ya que únicamente tendría efectos hacia las partes altas del poblado de Aquíáres.

5.6 Amenaza por lahares.

5.6.1 Concepto

Para los propósitos de este análisis se entiende como **lahar** al “flujo de lodo de alta densidad con abundantes materiales gruesos tales como rocas, troncos de árboles, etc. que ocurre sobre el flanco de un volcán ” (WMO, 1999), por lo que se incluyen las correntadas fluviovolcánicas, avalanchas volcánicas y flujos de detritos.

Este tipo de depósitos han sido ampliamente definidos en el flanco norte del volcán Turrialba debido al colapso del flanco nordeste del cráter, como la avalancha descrita por Soto (1988) sobreyacida por lavas y otros depósitos del Turrialba y Dos Novillos. Igualmente, a pesar de que los depósitos piroclásticos no han sido diseminados hacia dicha región, el mismo autor reconoce que los altos índices de precipitación pluvial y fuertes pendientes

favorecen una escorrentía y erosión muy intensas por lo que se consideran de alto riesgo los cauces de los ríos Bonilla, Destierro, Dos Novillos, Guácimo, Elia y Mercedes.

Sin embargo, el presente análisis se enfocó principalmente hacia el flanco sur y sudeste del volcán Turrialba tomando en cuenta que es la región en donde se ubican los centros poblados más importantes del cantón: Turrialba, Juan Viñas, Santa Cruz y Aquiares entre otras, las cuales pueden ser afectadas por los eventos fluviovolcánicos y laháricos de los ríos Turrialba y Aquiares y sus principales tributarios.

5.6.2 Metodología

5.6.2.1 Fotointerpretación y análisis de curvas de nivel: Se utilizaron las fotografías aéreas de la línea de vuelo No. 5, fotografías 13,144 a la13,148 de fecha 01 de marzo de 1,978, escala 1:35,000 y las hojas topográficas Tucurrique, Bonilla, Carrillo e Istarú del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (escala 1:50,000) para realizar un análisis preliminar de las geformas de la zona del Volcán Turrialba poniendo énfasis en el patrón de drenaje, fotolineamientos, estructuras fluviales, escarpes abruptos y posibles zonas de aporte de material no consolidado.

El producto de la fotointerpretación y análisis de la topografía sirvió como base para establecer los lugares de chequeo de las observaciones de campo, con el propósito de corroborar el aporte de material de algunas unidades geomorgológicas, así como ubicar las evidencias de ocurrencias previas de lahares.

5.6.2.2 Observaciones de Campo: Se realizaron 2 recorridos principales en el área de interés: a lo largo de la carretera de la Pastora hacia el cráter del volcán y de Santa Cruz hacia el caserío de Buenos Aires, complementado con el trayecto a lo largo de la carretera Santa Cruz-Turrialba, en los alrededores del poblado de Aquiares y en la zona de confluencia del río Aquiares con el río Turrialba. Durante este reconocimiento se realizaron más de 14 puntos de observación (Fig. 5.2) aprovechando los cortes de las carreteras y caminos así como los cauces de los ríos en donde se registraron los siguientes datos:

- Coordenadas geográficas (latitud y longitud).
- Croquis del perfil estratigráfico observado.
- Descripción de los materiales presentes y su distribución en el perfil.
- Fotografías de los principales puntos observados.

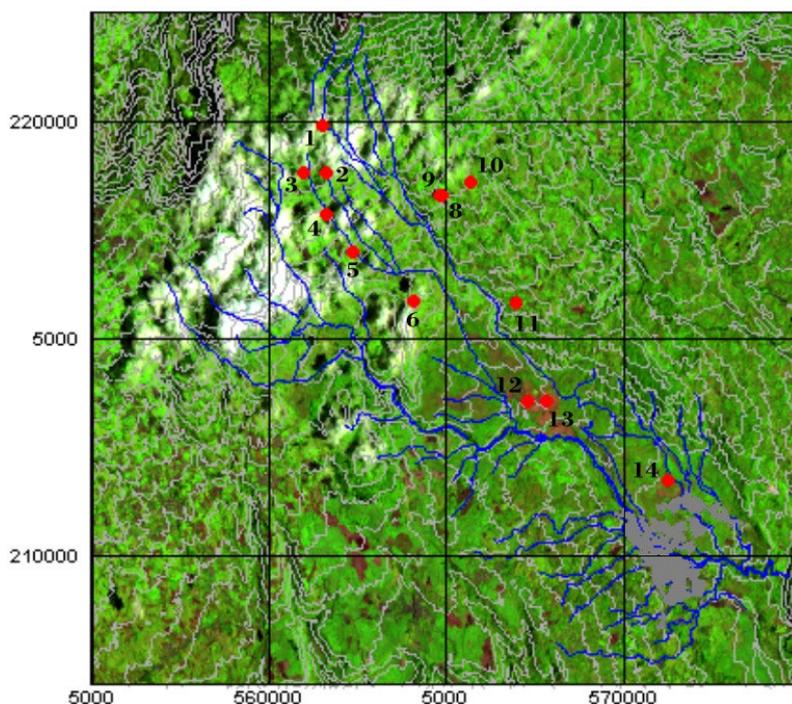


Figura 5.2 Mapa de puntos visitados durante el reconocimiento de campo. Los detalles de cada punto pueden observarse en la Tabla 5.5.

5.6.2.3 **Análisis digital:** Se consideraron 3 factores para definir áreas con probabilidad de ocurrencia de lahares asumiendo que sucederían luego de una erupción con flujos piroclásticos. Por tal razón, se utilizaron de base el mapa de amenaza de flujos piroclásticos y los datos de caudales de los principales ríos de la zona. Dichos factores son:

- **Zonas de aporte de material.** Se evaluó la capacidad de arrastre de los ríos que al atravesar las diferentes zonas de amenaza por flujos piroclásticos podrían aportar materiales para la formación de un evento lahárico.
- **Cuantificación de caudales.** Se ponderaron logarítmicamente las corrientes superficiales de acuerdo a su orden hidrológico distribuyéndoles

proporcionalmente los datos conocidos de caudales. Es decir, que los ríos tributarios (de menor orden hidrológico) originados en la parte alta del volcán aportarán mayor caudal a los ríos principales (de mayor orden hidrológico) y estos ríos tendrán una mayor carga hidráulica. La sobreposición de este factor con el anterior permitió definir la capacidad de arrastre de materiales acumulada en toda la red hidrográfica de la cuenca. Este análisis se realizó con el software PC Raster (Versión 2.0, Universidad de Utrecht, Holanda, 1998) obteniéndose el mapa de ríos laháricos.

- **Zonas de descarga final.** Según las observaciones de campo se determinó que las zonas con evidencias de depósitos laháricos son aquellas con pendientes menores de 8% y altitud menor de 1100 m sobre el nivel del mar. Por lo tanto, se consideró que tales zonas de planicie serían en donde los lahares provocarían los mayores daños.

Al mapa de ríos laháricos se le colocó un “*buffer*” representativo de su peso como aportador de materiales. Sin embargo, este *buffer* no es cuantitativo, sino solo representativo de la relación de importancia de los ríos de acuerdo a su capacidad de aportes de materiales.

5.6.3 Resultados obtenidos.

5.6.3.1 Fotointerpretación y Observaciones de campo.

Del análisis de las fotografías aéreas se definieron 4 zonas en los alrededores del cráter (Fig. 5.3) que podrían aportar grandes cantidades de material volcánico a la red de drenaje hídrico y formar lahares de diferentes intensidades:

- Un escarpe linear de dirección norte-noreste, de al menos 3.5 km de largo, ubicado en la zona intervolcánica Turrialba-Irazú y que eventualmente aportaría materiales hacia el cauce del río Pilas y de ahí hacia la subcuenca del río Toro Amarillo;
- la quebrada Paredes que baja a través del flanco oeste del cráter y que aportaría materiales hacia el cauce del río Toro Amarillo;

- un escarpe semi-cóncavo ubicado en el flanco este del cráter y que aportaría materiales hacia los ríos del flanco norte del volcán Turrialba; y
- eventualmente, el escarpe lineal de la quebrada Ariete de dirección noreste, de 2 km de largo, ubicado hacia el flanco sur del cráter y que aportaría materiales hacia el río Aquiares y de ahí hacia el río Turrialba.

De estas zonas, únicamente la del escarpe Ariete constituye una amenaza para el área de estudio ya que las otras tres tienen influencia hacia el flanco norte del volcán y por ende para la zona de Guapiles y Guácimo.

Al realizar el reconocimiento de campo se observó que en las partes altas del volcán, arriba de los 1,800 m sobre el nivel del mar, la litología predominante está constituida por alternancias de capas de ceniza fina pobremente consolidadas, paleosuelos y coladas de lava andesítica basales (Fig. 5.2, puntos 1 al 5, 7, 9 y 10; Carretera Pastora-Volcán, río Jesús María, río Guayabo y quebrada Lola; Fotografías 5.8, 5.9 y 5.10). Estos depósitos podrían convertirse en fuente de materiales para la generación de lahares, principalmente aquellos bancos que se encuentran ubicados al borde de los cauces de los ríos.

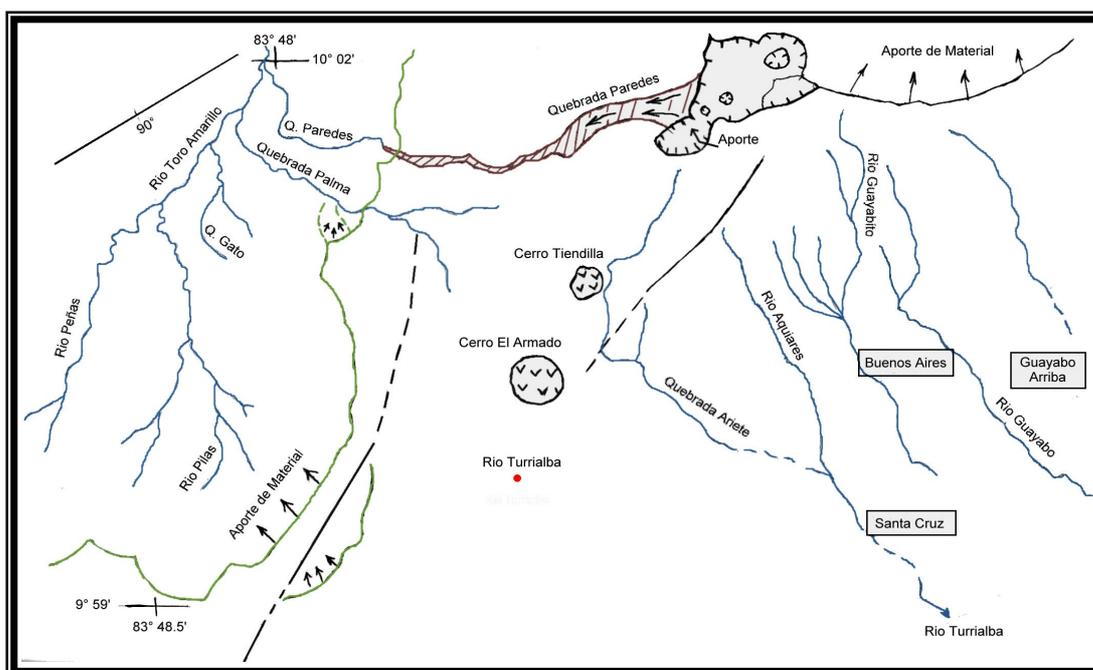
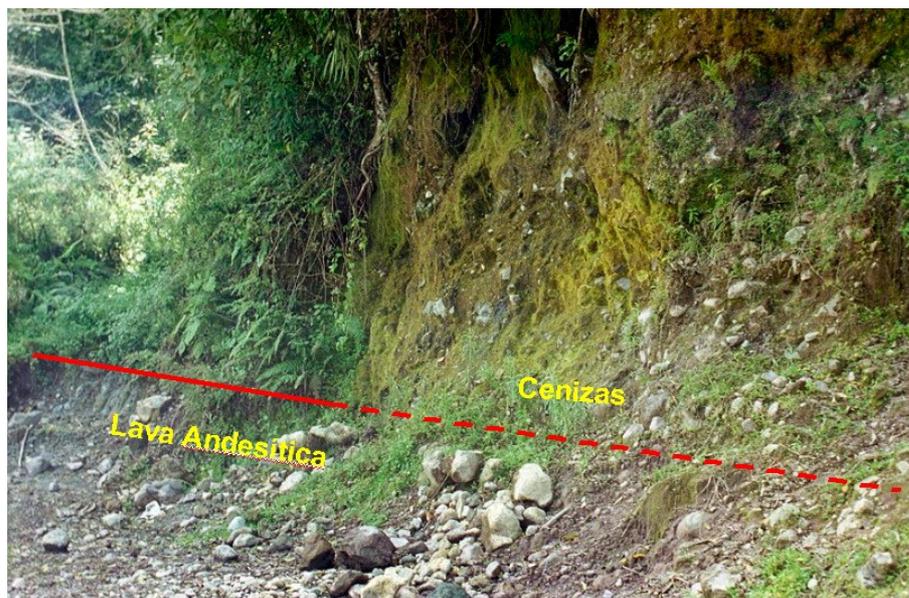


Figura 5.3 Estructuras y geoformas definidas en la fotointerpretación del área de estudio.

Sur-oeste

Nor-este



Fotografía 5.9 Afloramiento de cenizas volcánicas sobre lavas andesíticas y en primer plano parte de una avalancha brechoide a un lado del río Jesús María, 400 m al noreste de Pastora.

Sur-oeste

Nor-este



Fotografía 5.10 Afloramiento de cenizas volcánicas brechoides sobre lavas andesíticas fracturadas a un lado del río Guayabo, 1 km al este del poblado de Buenos Aires.

Mientras tanto, hacia las partes medias y bajas del volcán, se observó una litología predominante de avalanchas volcánicas compuestas por fragmentos angulares, mayoritariamente andesíticos, de hasta 1 m, en una matriz de arena media a gruesa, caóticos, las cuales forman los cerros ondulados de poca altura característicos de la zona de Aquiares (Fig. 5.2, punto 12; Fotografía 5.11). Hacia la zona de Pastora y Repasto se observaron las secciones laterales de estas avalanchas caracterizadas por fragmentos más pequeños y una matriz arenosa media a fina (Fig. 5.2, puntos 6 y 14; Fotografía 5.12).



Fotografía 5.11 Cerro de poca altura formado por una avalancha volcánica de fragmentos andesíticos, angulares, de hasta 1 m, en una matriz de arena media a gruesa, a un lado del río Jesús María, 800 m al oeste de Aquiares.

Sur-oeste

Nor-este



Fotografía 5.12 Avalancha volcánica lateral de fragmentos andesíticos, angulares, de 20 a 30 cm, en una matriz de arena media, en la intersección de carreteras Cartago-Volcán-Turrialba. (Altura de la persona: 1.72 m).

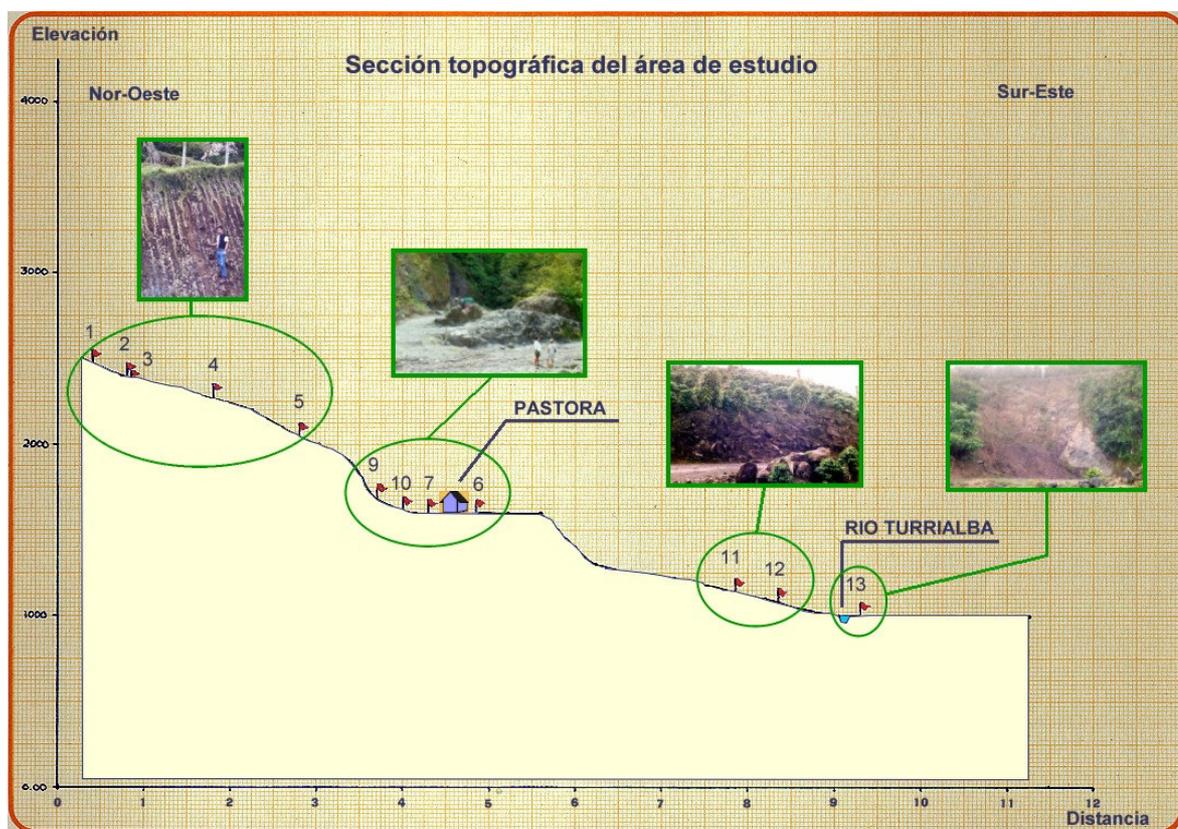


Figura 5.4 Corte topográfico transversal del área de estudio mostrando los cambios de litología en las diferentes secciones verticales. Escala horizontal 1:50,000 y escala vertical 1:25,000.

Estos depósitos y geoformas ya han sido reportados para el flanco norte del volcán por Salazar (1996), específicamente en el cauce del río Guacimo, al sur de Guácimo, y han sido relacionados al colapso del flanco noreste del cráter que originó también oleadas de flujos piroclásticos (*surges*).

Aparentemente, los depósitos de avalanchas volcánicas encontrados en la zona de Aquiares, Pastora y Repasto fueron originados por un evento explosivo lateral del volcán Turrialba cuya expresión geomorfológica de cráter antiguo se observa en el escarpe semicircular cortado por los ríos Sereno, Turrialba, Playas y Coliblanco, entre los poblados de Pastora y Santa Teresa (carretera 230), (Foto 5.13), (Mora, 2000, comunicación personal).

Sur-oeste

Nor-este



Fotografía 5.13 Panorámica del escarpe del río Turrialba, 2 km al oeste de Pastora sobre la carretera 230. Esta geoforma ha sido interpretado por Mora (comunicación personal) como un escarpe de cráter antiguo.

TABLA No. 5.5
PUNTOS VISITADOS DURANTE EL RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Punto	Coordenadas		Ubicación	Descripción
	Lat. N	Long. W		
1	9°59'48"	83°46'22"	Hda. La Fuente, Carr. Pastora-Volcán	Perfil de depósitos de cenizas y paleosuelos.
2	9°59'15"	83°46'33"	900 m al sur del punto anterior	Otro perfil.
3	9°59'15"	83°46'39"	150 m al sur del punto anterior	Depósitos de ceniza de 6 m
4	9°58'42"	83°46'17"	Río Jesús María a 2,300 msnm	4 m de ceniza sobreyaciendo una colada de andesita
5	9°58'14"	83°45'53"	Río Jesús María a 2,080 msnm	Ceniza sobreyaciendo andesita
6	9°57'33"	83°44'57"	Int. Carretera Pastora-Volcán-Turrialba-Cartago	Avalancha volcánica lateral no consolidada
7	-----	-----	Puente río Guayabo, Buenos Aires	Brecha volcánica sobre andesitas fracturadas laminares
8	9°59'03"	83°44'29"	Int. Carr. Raicero-Buenos Aires	-----
9	9°58'55"	83°44'31"	Quebrada Lola, Raicero	Depósitos de ceniza con evidencias de flujos de detritos
10	9°58'59"	83°44'04"	Carr. Raicero-Buenos Aires	Depósitos de ceniza
11	9°57'36"	83°43'22"	Carr. Santa Cruz-Turrialba	Depósitos de cenizas, paleosuelos y lavas alteradas
12	9°56'21"	83°43'12"	Río Jesús María-Quebrada Ceciliana, AQUIARES	Avalancha volcánica con bloques angulares de andesita
13	9°56'22"	83°42'52"	Río AQUIARES, poblado AQUIARES	Avalancha volcánica
14	9°55'22"	83°41'00"	Puente río AQUIARES, poblado de Repasto	Avalancha volcánica (parte distal?)

5.6.3.2 Análisis digital.

Se obtuvo un Mapa de Amenaza por Lahares (Anexo), el cual muestra las zonas que se verían afectadas ante la ocurrencia de un lahar derivado de la presencia de depósitos de flujos piroclásticos en la parte alta del volcán y el acarreo de dichos materiales por los ríos de la cuenca hacia las partes bajas.

El análisis se basó en que para la generación de un lahar se necesita una zona de aporte de materiales deleznales y una excesiva escorrentía hídrica, por lo que se cruzaron los mapas de amenaza por depósitos Piroclásticos y el mapa de ríos laháricos. El primero contiene información sobre la profundidad de las depresiones topográficas que serían rellenadas al ocurrir una erupción explosiva del volcán Turrialba y que servirían de fuente de materiales para la formación de un lahar, mientras que el mapa de ríos laháricos proporciona información sobre la capacidad de carga hidráulica del río, es decir, la capacidad que tendrá en diferentes sectores de la corriente de arrastrar los materiales piroclásticos.

Luego de formado el evento lahárico se asumió que las zonas de descarga y depositación final serían aquellas con una pendiente menor del 8% ubicadas a una altitud menos de los 1,100 m sobre el nivel del mar, por lo que al cruzar los mapas de piroclastos y ríos laháricos con el mapa de pendientes se obtuvo el Mapa de Amenaza.

Los criterios de análisis (pendientes, altitudes, etc.) fueron definidos con base a las observaciones de campo, mientras que los caudales utilizados corresponden a los valores de eventos extremos registrados y calculados según análisis hidrológico de la cuenca.

5.6.3.3 Zonas de alto peligro.

El mapa obtenido muestra que los ríos laháricos más significativos son el Quijales, Jesús María y Turrialba, por lo tanto, las zonas más amenazadas serían el poblado de Quijales y la ciudad de Turrialba. En ambos casos se puede catalogar como una Amenaza Alta ya que Quijales está ubicado en la confluencia Turrialba-Jesús María y en la rivera oeste del Quijales, mientras que la zona urbana de Turrialba está ubicada en la planicie de confluencia del río Turrialba y el Quijales.

Además, podrían incluirse los poblados de Río Claro, Verbena Sur, Santa Rosa e Isabel en una categoría de Amenaza Moderada ya que a pesar que se encuentran en una franja de terreno entre los ríos Quijales y Turrialba tienen una elevación un poco mayor que podría disminuir el efecto destructivo de la corriente lahárica.

Finalmente, por arriba de los 1,100 m sobre el nivel del mar se considera como una zona de transporte, por lo que la amenaza únicamente estaría enfocada a la capacidad de socavamiento de la corriente lo cual podría ocasionar inestabilidad de laderas afectando infraestructura residencial o carreteras cercanas.

5.7 AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA.

5.7.1 Concepto.

Los deslizamientos son definidos como el movimiento de masas de las rocas o flujos de tierra que se desplazan pendiente abajo, cuando el esfuerzo cortante excede a la resistencia al corte del material.

Las causas que generan los deslizamientos son:

- a) Incremento del esfuerzo cortante que es producido por
 - remoción del soporte lateral y de base;
 - incremento de la carga;
 - incremento de la presión lateral;
 - esfuerzos transitorios;
 - movimientos tectónicos regionales.

- b) Disminución de la resistencia al corte
 - disminución de la resistencia del material;
 - cambios en las fuerzas intergranulares
 - cambios en la estructura.

Otros factores que juegan un papel importante en la generación de deslizamientos son:

- tipo de material;
- atributos geomorfológicos (la pendiente!);
- geometría del deslizamiento;
- tipos de movimientos;
- clima;
- agua;
- velocidad del movimiento;
- mecanismo de disparo (sismos, lluvias, actividad humana, etc.).

5.7.2 Metodología.

Para la zonificación de las amenazas a los deslizamientos se aplicaron dos métodos:

- Método Indirecto
- Método Determinístico.

5.7.2.1 Método Indirecto.

Este método consiste en el levantamiento de una gran cantidad de parámetros y el análisis de todos los factores posibles que contribuyen a la ocurrencia del fenómeno de inestabilidad de taludes. De esta manera se determina la relación entre las condiciones del terreno y la ocurrencia de los deslizamientos. Las condiciones bajo las cuales ocurre la falla de un talud se establece basado en los resultados de estos análisis.

Hartlen y Viberg (1988 en GISSIZ, 2000) establecen otra técnica muy útil para la evaluación de la amenaza por inestabilidad de taludes y la denominan amenaza relativa. La técnica de evaluación de la amenaza relativa se diferencia en la manera de ocurrencia del movimiento de masas para diferentes áreas en el mapa sin asignar valores exactos. De acuerdo a la división de Carrara *et al.* (1988 en GISSIZ, 2000), para el análisis del área se utilizó el Modelo de Caja Negra que no está basado en un modelo físico, sino en una clasificación estadística.

Para la elaboración del mapa de amenazas se utilizó el programa ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*, ITC, Enschede, Holanda), versión 2.2 para Windows 3.1x y 9x.

ILWIS es un programa de los Sistemas de Información Geográficos con capacidad para el procesamiento de imágenes, que permite introducir, manejar, analizar y presentar datos geográficos a partir de estos datos se puede generar información sobre patrones espaciales y temporales y de los procesos sobre la superficie terrestre (*ILWIS-User's Guide*, 1997).

El mapa de amenazas a los deslizamientos fue elaborado utilizando como datos bases:

- modelo de elevación digital del terreno (DEM), generado a partir de las curvas de nivel del área seleccionada;
- mapa de drenajes.

A partir de estos datos se generaron los siguientes mapas:

- Mapa de pendientes;
- Mapa de concavidad y convexidad;
- Mapa de distancias entre píxeles y drenaje.

Se procedió a la asignación de peso a cada uno de estos mapas, en los cuales los valores más altos corresponden a la mayor influencia que estos puedan ejercer en la aceleración del mecanismo de disparo del deslizamiento. Estos pesos fueron sumados para obtener el Mapa de Amenaza a los Deslizamientos. Finalmente, este mapa fue reclasificado asignándole los valores cualitativos de Alta (3), Moderada (2) y Baja (1).

5.7.2.2 Método Determinístico

El modelo determinístico está basado en la Amenaza Absoluta, el cual da valores absolutos para la amenaza como por ejemplo el Factor de Seguridad. Para esto se utilizó el Modelo de Caja Gris que se basa parcialmente en un modelo físico y estadístico (Carrara *et al.*, 1988 en GISSIZ, 2000).

Para este modelo aplicamos PCRaster (versión 2, Universidad de Utrecht, Holanda, 1998), el cual es un programa de los Sistemas de Información Geográficos, que consiste de un conjunto de herramientas computacionales

para el almacenamiento, manipulación, análisis y colección de información espacial.

El concepto central del PCRaster es una discretización espacial del medio que resulta en celdas de información. Cada celda se puede considerar como un conjunto de atributos que definen sus propiedades excepto una, la cual puede recibir y transmitir información hacia y desde las celdas vecinas. Este es un modelo raster con el cual es posible ejecutar los modelos de una forma dinámica; lo que significa que los nuevos atributos se calculan como una función de los cambios de atributos en función del tiempo.

Para simular las condiciones de inestabilidad de taludes en el área estudiada se aplicó un modelo combinado Hidrológico-Estabilidad de Taludes (Van Asch, 2000), que considera que los deslizamientos en la mayoría de los casos se inician por un aumento de la presión de poros en el talud, lo que provoca la disminución de la resistencia de los suelos. En consecuencia, la ocurrencia temporal de los deslizamientos está relacionada con períodos de una alta cantidad de lluvias y/o sismos.

5.7.3 Descripción del modelo

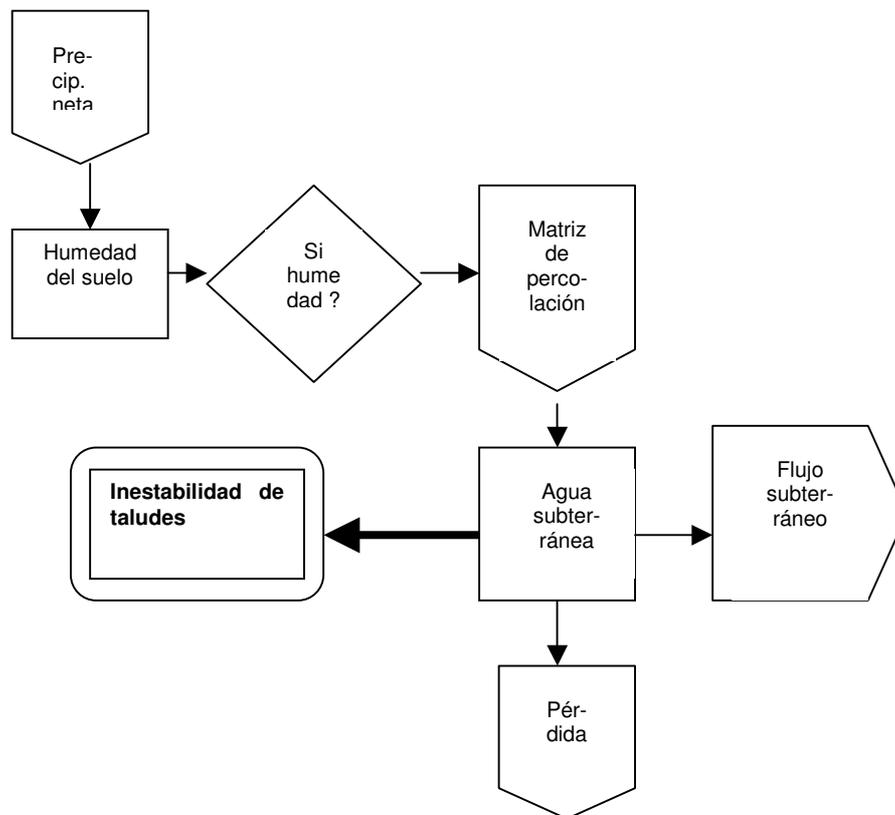
Los datos utilizados para la ejecución del modelo fueron los siguientes:

- precipitación;
- evapotranspiración;
- modelo de elevación digital (DEM);
- pendiente;
- dirección del flujo subterráneo;
- espesor de la capa de suelo;
- porosidad;
- capacidad de campo;
- conductividad hidráulica;
- ángulo de fricción interna del suelo;
- cohesión;
- pérdida de aguas subterráneas en la roca;

- aceleración sísmica (opcional);

1. La precipitación neta es la lluvia caída menos la evapotranspiración;
2. Evapotranspiración, resulta de la evaporación directa de los cuerpos abiertos y la transpiración de las plantas;
3. Cuando el suelo está saturado, parte del agua fluye hacia las capas más profundas y otra parte es almacenada en los poros. Si el suelo no está saturado toda el agua es mantenida en las capas superficiales;
4. Cuando el agua ha percolado a través de los cuatro estratos del perfil (con diferentes conductividades hidráulicas), alcanza el agua subterránea (capa freática);
5. Parte del agua subterránea se pierde al infiltrarse en la roca y otra parte fluye pendiente abajo hacia el río;
6. A mayor cantidad de agua subterránea mayor es la presión de los poros y menor la resistencia del suelo, provocándose una inestabilidad en el mismo;
7. Se calculó el número de días de inestabilidad por píxel para cada año (húmedo, seco y normal). Estos fueron reclasificados para producir los mapas. (*Ver mapas anexos*)
8. Porcentajes de las áreas de inestabilidad para cada día del año;
9. El cambio en la inestabilidad durante un sismo (con períodos de retorno de 10, 50 y 100 años) se calculó y reclasificó, los resultados se muestran en la gráfica 5.4;
10. Porcentaje del área inestable durante un sismo para cada día (y nivel de la capa freática) del año.

Figura 5.5. Diagrama de flujo del modelo



5.7.4 Trabajo de Campo.

El trabajo de campo se dividió en dos fases:

- fotointerpretación de fotografías aéreas pancromáticas a escala 1:20.000 y
- giras de campo a los diferentes objetivos previamente seleccionados con la finalidad de corroborar la existencia o no de deslizamientos actuales e históricos.

Durante el recorrido se ubicaron 44 deslizamientos (ver tabla 5.6) que fueron localizados en el mapa topográfico y en las fotos aéreas. Además, se estableció cuáles de estos son activos, pasivos y/o críticos, se clasificó el tipo de deslizamiento, determinando las causas que los generaron, así como los daños provocados en el área. Los mismos se verificaron con entrevistas a los residentes.

5.7.5 Resultados.

Producto de la evaluación y modelación ejecutadas se obtuvieron los siguientes resultados:

5.7.5.1 Definición de los distintos tipos de movimientos de masas en el área.

Se determinaron que los dos tipos fundamentales de movimientos existentes en el área son:

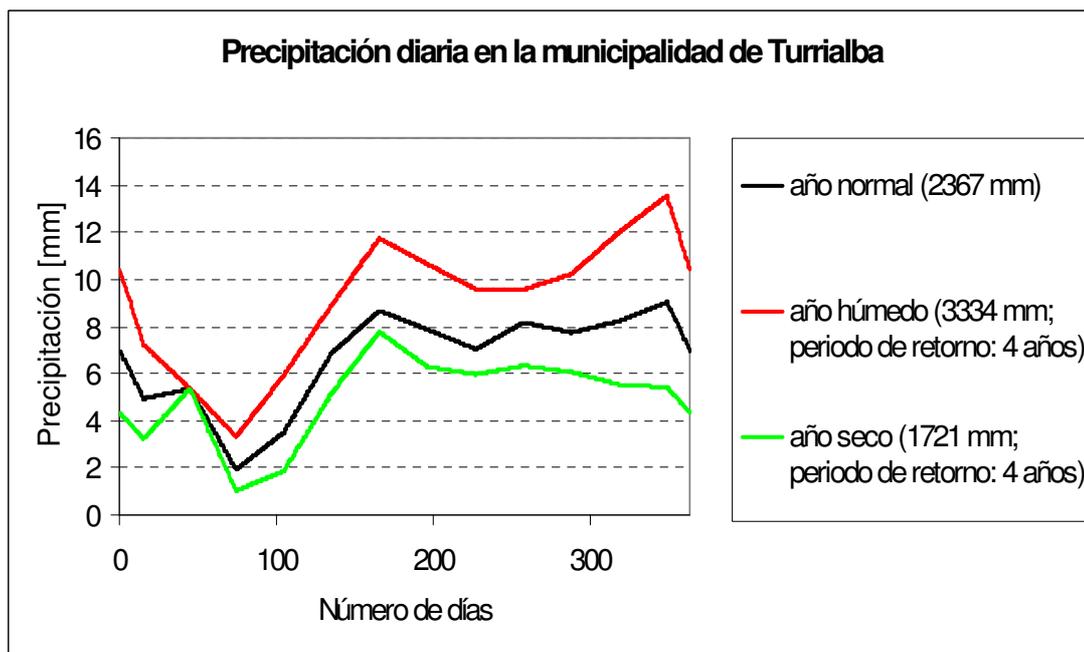
- deslizamientos de tierras rotacionales (*slump*);
- deslizamientos de tierras rotacionales (derrumbes).

Ver Tabla de Caracterización de Deslizamientos en el Anexo.

Con la modelación y la ayuda de la observación de campo se estableció la zonificación del área de estudio.

Esto se realizó basado en la clasificación de las amenazas debido a la inestabilidad de taludes, la cual se define como: El levantamiento de áreas con una probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en un período específico de tiempo (Varnes, 1984 en GISSIZ 2000). Por lo tanto el mapa de amenazas a los deslizamientos muestra las siguientes categorías:

- amenaza alta, referida a las áreas potenciales con alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos por presentar pendiente elevadas y alta convexidad.
- amenaza moderada, referida a las zonas que pueden verse potencialmente afectadas, en caso de alterarse las condiciones actuales de las pendientes por un manejo o uso inadecuado del suelo.
- amenaza baja, referida a las áreas que no presentan ningún peligro.



Gráfica 5.2 Precipitación diaria modelada con PCRaster.

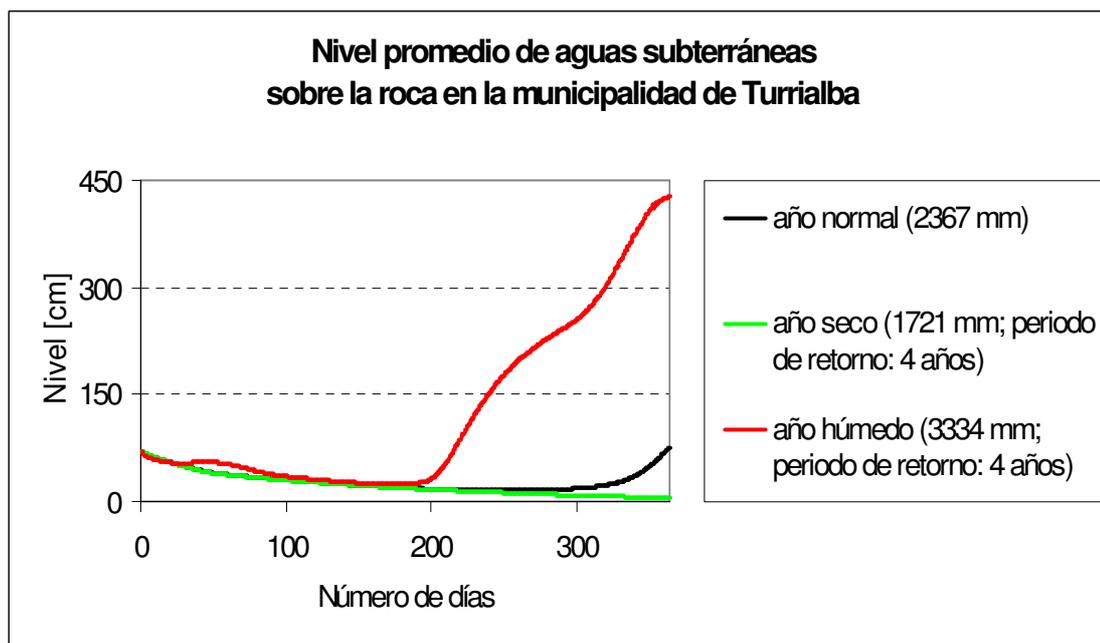


Gráfico 5.3 Nivel de aguas subterráneas para diferentes períodos de lluvia modelado con PCRaster.

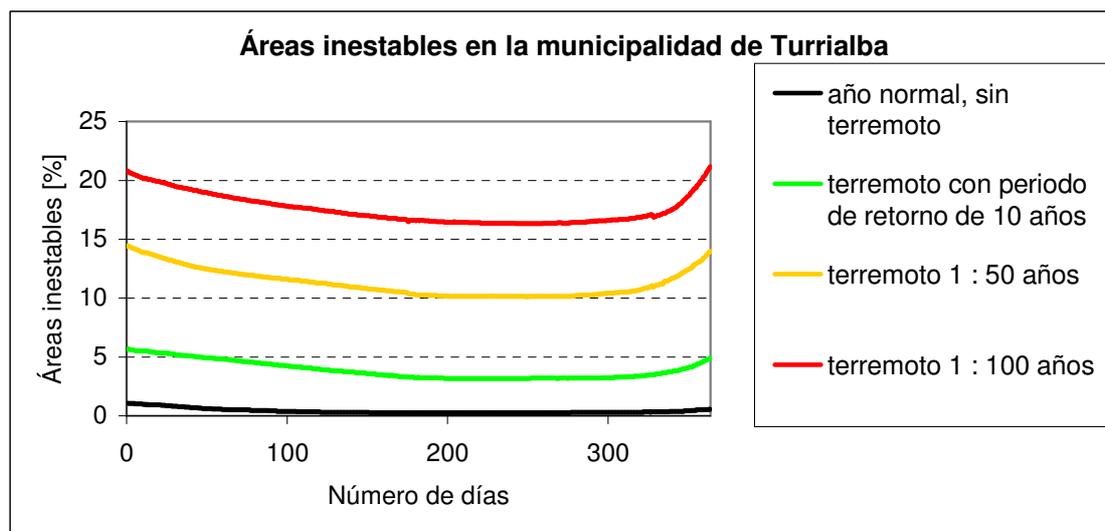


Gráfico 5.4. Áreas inestables para un sismo con diferentes períodos de retorno usando PCRaster.

5.8 ANALISIS DE VULNERABILIDAD EN LA CIUDAD DE TURRIALBA.

5.8.1 Recolección de Información.

El trabajo del grupo inició con la elaboración de una boleta para recolectar información en el campo. En su elaboración participaron varias personas de los diferentes grupos para incluir la información necesaria aunque sin abarcar todos los aspectos requeridos en una encuesta por motivos de tiempo y de número de encuestadores. Dicha boleta está basada más que todo en la observación en el campo y las apreciaciones están sujetas a la entrevista con los propietarios que estaban asequibles en el momento de pasar el encuestador y a las apreciaciones del encuestador de acuerdo a su experiencia. No se cuenta con el Valor del uso del suelo ni de la población.

5.8.2 Boleta de trabajo de campo.

La boleta de trabajo incluye los usos de los lotes en la ciudad de Turrialba con un Área Urbana de 3,588.65 ha (Tabla 1). Se incluyeron en los usos del suelo

las siguientes categorías: Condición Habitacional, Servicios Públicos, Comercial, Recreacional, Industrial, datos de la condición de los edificio como: Material, edad de la construcción, Numero de Pisos, Daños por inundación, Daños por Sismos, Daños por deslizamientos y Vulnerabilidad. Una vez terminado el trabajo de campo se unificó el trabajo en un solo mapa el cual fue distribuido a los diferentes grupos.

Tabla 5.6 Uso del suelo por hectareas.

Area Urbana	3588.65
Bosque	1956.49
Cana	5212.64
Hortalizas	1567.40
Jardines	419.83
Pastos	6021.16
Café	15057.93
Plantaciones Forestales	1735.72

5.8.3 Elaboración de Mapas.

Se utilizó el Programa ILWIS para la obtención de los siguientes mapas. El primer mapa corresponde al de EDAD de la Construcción. (MP1). En la información requerida se presenta por una asignación de Pesos por año. Así se tiene que entre mayor es el valor asignado al año mayor es su vulnerabilidad. Para 1950 = 6, 1960 = 5, 1970 = 4, 1980 = 3, 1990 = 2, 2000 = 1. Posteriormente se rasterizó (MP1).

El segundo mapa de MATERIALES (MT). Se dividieron las categorías de materiales en dos grupos para facilitar su uso, al grupo que incluía Madera, Concreto Madera, Madera sobre Pilotes, Laminas de Fibrolit, y Mixto Madera Concreto Fibrolit , con el valor 2, y Bloques de Concreto , Concreto Prefabricado, Metal con el valor 1. De esta manera se elaboro el mapa por peso de Materiales el cual se rasterizó con el mismo nombre MT.

Gracias a esto dos mapas se efectuó la operación CROSS para integrar en un solo mapa los valores de peso para 1ª dígito de columna = Edad , 2ª dígito de columna = Materiales en el mapa llamado MFIS. Este mapa fue asignado al grupo de sismología. Este mapa recoge la información física del estado de la construcción por edad y condición con el fin de integrarla a valores de riesgo.

Gracias a estos dos mapas se generó un mapa llamado CALIDAD en la cual se clasifica la construcción en tres pesos de calidad: Buena, Moderada, Deficiente. Estos valores fueron extraídos de la tabla MFIS.

1*0	2*0				6*0
1*1	2*1	3*1	4*1	5*1	6*1
1*2	2*2	3*2	4*2	5*2	6*2

Considerando la durabilidad de los bloques de concreto y metal contra la madera y otros materiales en una con gran deterioro por humedad. De esta manera se reclasifican por peso en:

Tabla 5.7 Calidad de la construcción.

BUENA	MODERADA	DEFICIENTE
1*0	2*2	5*2
1*1	3*2	6*0
1*2	4*1	6*1
2*0	5*1	6*2
2*1		
3*1		

El mapa de Uso del suelo (MUSOS) se trabajó con dos clasificaciones para separar lo que son Líneas Vitales y los Usos de los lotes por Servicios Públicos. Los pesos fueron asignados de acuerdo a los costos de las edificaciones y los valores de peso asignados van en una escala de 1 a 10, quedando de la siguiente manera: Líneas Vitales son Hospitales, Centros de salud, Electricidad Telecomunicaciones, Tanque de Agua, Tratamiento de Aguas, todos ellos con el valor 10. Servicios Públicos: Escuela Primaria, Colegio/Liceo, Universidad, Iglesia, Bomberos, Policía, Cruz Roja, Municipalidad, todos ellos con el valor 8.

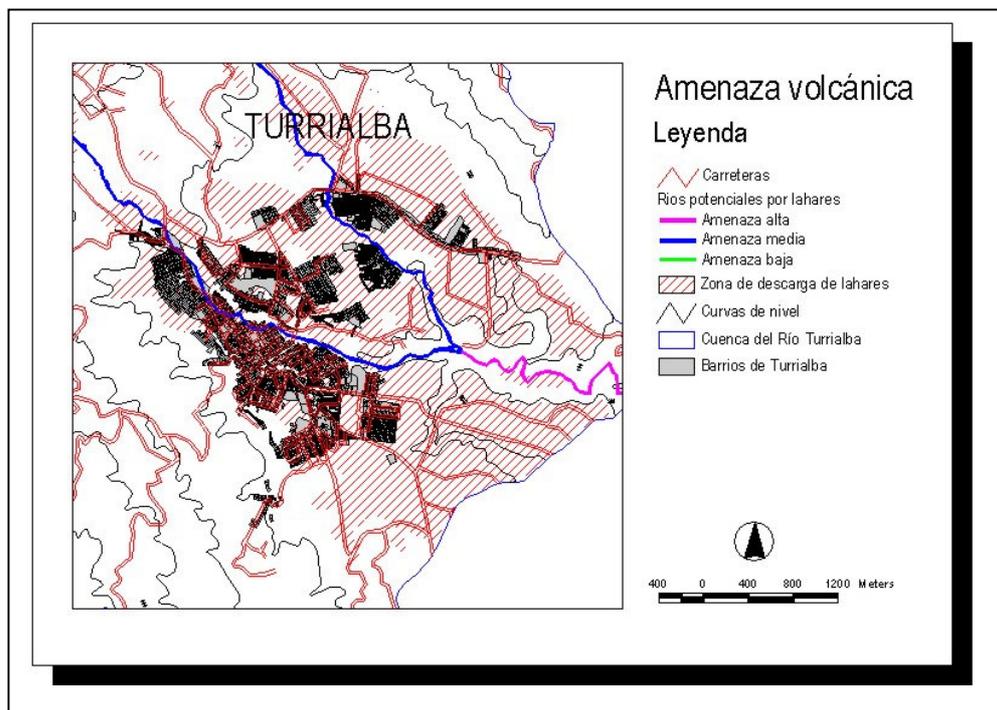
Con este mapa USO se generó un nuevo mapa de costos COSTO mediante el dominio costo en donde se clasificaron los valores dados en el mapa de MUSOS con el siguiente peso a la asignación del valor de la construcción:

Mapa: MUSO	COSTO
10	Estratégico
8	Muy alto
5	alto
4	medio
2	bajo
1	Muy bajo
0	?

Estratégico: se escogió este costo no tanto por el valor económico sino por su función, el cual no siempre representan en dinero la importancia ante las amenazas naturales

5.8.4 Vulnerabilidad Volcánica.

Según datos suministrados por el grupo de amenaza volcánica se concluye que en el peor de los casos para una erupción en la que se produzca flujo de piroclastos, estos no alcanzarían la ciudad de Turrialba por estar en la zona fuera de amenaza; sin embargo en el caso de producirse lahares posterior al evento, la ciudad de Turrialba ubicada a 16 km. Se podría ver afectada debido a que está ubicada en una zona donde confluyen el río Turrialba y el río Quijales, los cuales son ríos con una alta probabilidad de acarrear gran cantidad de materiales, además de estar ubicada la ciudad en la parte de deposición de lahares como se indica en el mapa de Amenaza Volcánica (ver información en reporte de Amenaza Volcánica).



5.8.5 Vulnerabilidad por deslizamiento.

De acuerdo al estudio desarrollado por el grupo de deslizamientos se cita la parte norte de la ciudad como la más estable y para aquellas zonas de alta pendientes como de alta peligrosidad pueden ser activadas por lluvias o sismos, además de que ya presentan antecedentes de ocurrencias en años anteriores. El acceso a la ciudad por la carretera a San José se ve afectado en varias secciones por deslizamientos de tipo moderado, asimismo dentro de la ciudad se presentan áreas vulnerables que ya han ocasionado pérdidas de vidas o de infraestructura, se ubican por ejemplo la zona del Hospital, del cementerio y un área ubicada en Capabarral de prioridad en su atención.

5.8.6 Vulnerabilidad por Inundación.

En el cuadro 1 se presenta un reporte por inundaciones que hace referencia a los barrios que se han visto afectados como son:

Oriente de Turrialba, Santa Teresita, Barrios Aragón y Capabadal Barrios La Margot, La Guaria, San Rafael, La Angostura, El Sauce, Palomo, Barrios El Mora, Azul, Sictaya, Cimarrones, San Joaquín, La Verbena, Pastor, La Dominica, Centro de Turrialba y Santa Rosa, Inmediaciones Balneario Las Américas. Además de esta información se trabajo en el campo con la boleta en la que se recogió información específica para el centro de la ciudad, de esta manera fue elaborado un mapa llamado TIPOVUL manejando las seis variables : Sobre el cause, en la Rivera, En cause abandonado, Area de inundación periódica, Cerca del Río y No se observa.

También se trabajo con el mapa HAZTURRI el cual contiene un análisis general de la cuenca que fue basado en el mapa geomorfológico de la cuenca a escala 1:50000 y fue reclasificado por categorías de peso en : Alta, Moderada, Baja y Nula. Por tratarse de un mapa a esta escala se aprecia en el mapa que la ciudad esta toda en el área de inundación alta.

AMENAZA POR INUNDACION EN LA CUENCA DEL TURRIALBA

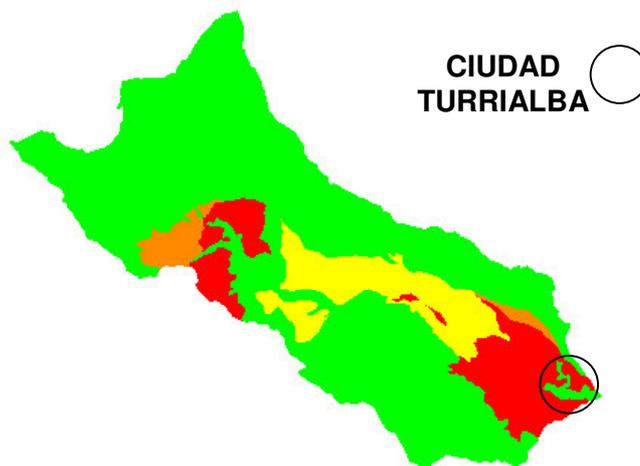


Tabla 5.8 RESUMEN DE DAÑOS POR INUNDACION

Año	Mes	Día	Lugar	No. de Viv. Afect.	Fuente Inf.	No. de Afect.	No. de Reub.
1,981	8	27	Oriente de Turrialba	0	La Nación (fecha de publicación)	0	
1,982	7	2	Santa Teresita.	1	La Nación	0	0
1,982	7	2	No especificado	0	La Nación	0	
1,983	9	1	Barrios La Margot, La Guaria.	30	La Nación	0	0
1,984	8	7	No especif.	0	La Nación	0	
1,986	3	22	No especif.	0	La Nación	0	0
1,987	10	6	Barrios Aragón y Campabadal	0	La Nación	0	0
1,987	12	19	No especificado	0	La Nación	0	0
1,99	5	27	Barrios La Margot y La Guaria.	0	La Nación	0	0
1,991	8	11	San Rafael	10	Prensa Libre	0	0
1,991	8	12	La Angostura	0	La República	0	0
1,991	8	12	El Sauce y Palomo	0	La Nación	0	0
1,991	8	12	Barrios El Mora, Azul y SICTAYA	0	La República	0	0
1,991	8	12	Cimarrones	0	La Nación	0	0
1,991	8	12	No especificado	0	La Nación	0	0
1,991	8	12	Centro	0	La Extra	0	0
1,991	8	12	San Joaquín	0	La Extra	0	0
1,991	8	12	No especificado	0	La Extra	0	0
1,991	8	13	La Verbena	0	La Extra	0	0
1,991	8	13	Pastor	0	La Extra	0	0
1,992	8	8	No especificado	5	La Nación	0	0
1,992	8	11	La Margot y La Dominica	0	Prensa Libre	0	0
1,992	12	9	No especificado	0	La República	0	0

Año	Mes	Día	Lugar	No. de Viv. Afect.	Fuente Inf.	No. de Afect.	No. de Reub.
1,994	12	14	Centro de Turrialba y Santa Rosa	11	La República	49	
1,995	5	1	No especificado	10	La Nación	0	0
1,996	2	11	15 poblados afectados	0	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	5 poblados afectados	0	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	2 poblados afectados	0	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	3 poblados afectados	73	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	2 poblados	0	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	3 poblados	0	CNE,La Nación	0	0
1,996	2	11	3 poblados	0	CNE,La Nación	0	0
1,997	8	4	Cerca Baln. Las Américas.	0	Comisión Nacional Emergencia	0	0
1,997	11	25	No especif.	0	CNE	0	0
1,997	11	26	No especif.	0	Al Día	0	14

6. MANEJO DE DESASTRES EN LA CIUDAD DE TURRIALBA.

6.1 GENERALIDADES.

Desde un punto de vista práctico y circunscribiéndose a los alcances del Curso Zonificación de Amenazas Naturales utilizando Tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (*Geohazard Zonation Course*), el tema del manejo de desastres se delimitará en tres ejes básicos, a saber:

- Amenazas naturales actuales, Organización y Planes de Respuesta.
- Información, Planes de Prevención, Respuesta y Gestión del Riesgo.

Partiendo del contexto de eventos ocurridos en la década de los 90's, las consultas realizadas a la población determinan que han sido cuatro los eventos significativos que han superado la capacidad de respuesta local, por tanto la necesidad de recurrir a la asistencia nacional.

Mayores eventos en la década del 90, que la población considera como grandes emergencias.

1. Terremoto de Telire-Limón, 1991
2. Inundaciones de Setiembre-Octubre, 1991
3. Terremoto de Pejbaye-Cartago, 1993
4. Inundaciones y Deslizamientos de Febrero 1996.
5. Inundaciones y Deslizamiento de 1999.

Definiremos por tanto, a la *pérdida de la respuesta comunitaria o de un sector de la población* para sobrellevar o enfrentar ante una situación de crisis dada (sismos, deslizamientos, inundación, etc), con sus propios recursos y organización, configurando el estado o fase de emergencia.

Efectivamente los pobladores de Turrialba, dentro de la ***fase de emergencia*** *identifican tres sub-etapas:*

- Etapa de atención a la emergencia o el desastre: caracterizada por actividades de auxilio, atención de heridos, búsqueda y rescate (incluyendo desaparecidos y muertos). Incluye activación extraordinaria de los organismos de respuesta local (Hospital, clínica, centro de salud, Cruz Roja, Bomberos y el Comité Local de Emergencia).
- Etapa post-emergencia: definida por una extensión del auxilio en términos de sobrevivencia por pérdida de bienes materiales, tales como vivienda, alimentación, entre otros. Esta sub-etapa muy cercana a la sub-etapa de atención de primeros auxilios y médica, es denotada por el período de instalación de alojamientos temporales (albergues), asistencia alimentaria y de suministros básicos.
- Paralela a la reubicación o desplazamiento de la población hacia sitios seguros se encuentra la sub-etapa del registro de daños y no necesariamente su cuantificación, ya que incluiría una desagregación de la infraestructura y bienes perdidos y el costo total de las pérdidas.

La otra fase que esta bien enmarcada en la mentalidad de los pobladores de Turrialba, es la **fase de rehabilitación**, que en términos prácticos se refiere la reposición de los servicios sociales básicos o los relativos a las líneas vitales (energía, agua, combustible, carreteras y puentes, entre los más comunes). No obstante, existe en **la fase rehabilitación** dos separaciones importantes, a saber:

- Rehabilitación de bienes sociales o de uso común: Electricidad, Telefonía, abastecimiento y distribución de Agua Potable, Servicios de Salud y Comerciales.
- Rehabilitación de Bienes Particulares: Entendido este como una reposición inmediata de los bienes perdidos producto de la crisis o el desastre. Sin duda alguna, el mayor rubro comprende la necesidad de reponer la vivienda destruída total o parcialmente, o la reubicación de los residentes en

áreas cercanas de peligro, aun y cuando estas no hayan sufrido daño alguno.

Al respecto es notorio que ante la declaratoria oficial de estado de emergencia para la zona, la reubicación y reposición de vivienda por parte de la entidades del Estado correspondientes, se ha hecho para aquellos casos de destrucción total o bajo condición extrema de peligro. Existen sitios que por su cercanía a eventos pasados y sus condiciones topográficas y geológicas requerían de la implementación de una estrategia de reubicación hacia sitios seguros.

6.2 Información, Planes de Prevención, Respuesta y Gestión del Riesgo.

La investigación de campo determino que existe una debilidad en la disponibilidad, uso y manejo de información sobre peligros naturales y riesgos, denotado por los siguientes aspectos:

- La organismos directamente relacionados con el uso del suelo, esencialmente con el otorgamiento de permisos de construcción, como lo es la Municipalidad, que no cuenta con una sistematización idónea de los peligros existentes, difícil por tanto contar con este tipo de información para orientar la toma de decisiones técnica de nuevas construcciones hacia sitios sin riesgos potenciales.
- No existe un registro histórico sistematizado por tipo de eventos que permita diagnosticar la evolución de las principales amenazas o la caracterización de eventos extremos.
- A pesar de existen varias versiones sobre mapas de amenazas naturales de fuentes reconocidas como la CNE, la Universidad de Costa Rica, CATIE, otras, para los encargados en aspectos como la planificación física, emergencias o desastres, es difícil contar con esta información de forma inmediata o en las escalas adecuadas.

- Instituciones claves como el Instituto Nacional de Seguros, el Hospital William Allen, Centro de Salud, Municipalidad, no aprovechan la información sobre peligros existentes en formato de mapas para labores relacionadas con prácticas territoriales.
- El mayor componente en el manejo de desastres, ha sido la organización institucional local, bajo la coordinación y dirección de la Central de Bomberos conformando el Comité Local de Emergencias, donde figuran instituciones como Municipalidad, Centro de Salud, Hospital, Cruz Roja, Instituto Mixto Ayuda Social, Sede Regional Ministerio de Obras Públicas, Seguridad Pública y Transportes y ciudadanos de los medios de comunicación colectiva local..
- Importante destacar en caso de desastre el nivel de convocatoria de las instituciones es considerado como una de las fortalezas.

El coordinador del Comité Local de Turrialba, Sr. Danubio Morales, estima que otra de las fortalezas de la organización para atender desastres ha sido la respuesta rápida, no obstante como complemento del Plan de Emergencia, es necesario el establecimiento *un sistema de alerta temprana* para el Río Turrialba.

En la actualidad, según D. Morales, existe una organización básica para alertas tempranas ante inundaciones, que basa su operación en tres elementos.

- Organización voluntaria o monitores.
- Comunicación telefónica o vía radioaficionados.
- Centro de recepción de información (estación de bomberos).

El funcionamiento se activa durante cambios drásticos del tiempo o lluvias prolongadas y orientada a denotar cambios en el caudal del río Turrialba, bajo un procedimiento sencillo:

- Identificación de algunas comunidades claves, especialmente cercanas al Volcán, Quijales. (comunidades en la parte alta de la cuenca)

- Observación visual de algunas variables meteorológicas (referidas esencialmente a la característica de la lluvia y tiempo de duración).
- Observación del comportamiento del río, esencialmente visualización del crecimiento del caudal o de variaciones anómalas.
- Transmisión de la información vía telefónica.
- Aviso a otros pobladores en las cercanías del río en situaciones críticas o de alerta.
- La Estación de Bomberos actúa como receptor central y disparador de la alerta en caso de reportes que puedan causar peligro a la ciudad de Turrialba.

Lo anterior, deja entrever que Turrialba cuenta con una organización que centraliza sus acciones durante **el evento**, especialmente cuando la manifestación alcanza los niveles de crisis. Efectivamente prácticas de evacuación se han generado en el pasado, utilizando el conocimiento de causa, lluvias prolongadas y excesivas, esta determinación empírica es un indicador para proceder a reubicar temporalmente comunidades del suroeste de la ciudad, tales como Campabadal, Calle Cementerio, o caseríos a lo largo de la Quebrada Gamboa, del Río Colorado y Río Turrialba.

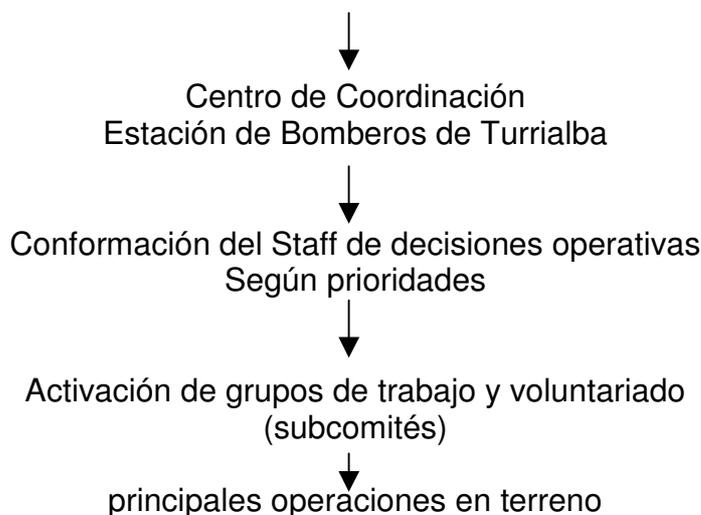
No obstante, es importante reseñar que no existe una identificación o cuantificación a escala detallada de las comunidades con mayor propensión a sufrir daños producto de inundaciones y deslizamientos.

El mayor énfasis del planeamiento ante emergencias se encuentra en la articulación de instituciones de primera respuesta que cuentan con personal capacitado para dar socorro y aliviar a la población mientras se supera el

estado de crisis, utilizando recursos propios y recursos extraordinarios procedentes de otras instituciones del Estado como el Ministerio de Obras Públicas y Transportes o el Instituto Costarricense de Electricidad.

Figura 5.6 Esquema de Operación Básica del Plan de Emergencia de Turrialba

Convocatoria Instituciones Locales Primera Respuesta



Salvamento Busqueda-Rescate Alojamiento Temporales – Logística

Desde el punto de vista de la prevención, no existe un plan integral que considere las 3 amenazas con periodos de recurrencia menor, inundaciones, deslizamientos, sísmica, y menos aun las de mayor periodo de recurrencia como sería la volcánica.

Aunque en el pasado se han ejecutado algunas medidas de mitigación, como el diseño de diques en los ríos de mayor peligro, no se cuenta con un plan que muestre las intenciones de dirigir las nuevas áreas de crecimiento hacia sitios que no presenten recurrencia de inundaciones y deslizamientos, o una planificación física que integre medidas de carácter estructural y no estructural para mitigar desastres futuros.

En este plan desde el punto de manejo de desastres se deben considerar **las instalaciones críticas**, referido a “todas aquellas instalaciones o estructuras

hechas por la sociedad o comunidad que por razón de su función, tamaño, áreas de servicio o singularidad, tienen el potencial de causar daño corporal, extensos daños, o perturbar las actividades socio-económicas vitales si son destruidas, dañadas o si sus servicios son repetidamente interrumpidos”, OEA, 1993.

Para el caso de Turrialba se enumeran algunas de las instalaciones críticas.

Subestaciones Eléctricas.

Plantel de Recope- Peralta.

Tubería del Oleducto.

Central de Telecomunicaciones, ICE.

Gasolineras.

Plantas de Tratamiento de Agua AyA.

Acueducto principal ciudad de Turrialba

Red vial nacional rutas No.10 y Ruta Santa Cruz-Pacayas.

Zona Franca Industrial.

Hospital William Allen.

Centro de Salud

Estación de Bomberos

Estación de Cruz Roja

Centros Educativos.

CEN-CINAI.

El plan debería considerar en primera instancia una zonificación preliminar, con base en la información existente. Por ejemplo, los análisis sobre inestabilidad de laderas muestra una tendencia a deslizamientos en el *sector suroeste de la ciudad (ver mapa de potencial de deslizamientos y actuales)*, que en algunos sitios requiere urgentemente del diseño y aplicación de medidas geotécnicas, no obstante ante la escasez de recursos económicos puede considerarse en el plan medidas de carácter no estructural, tales como la regulación del uso del suelo, mediante congelamiento de las áreas para lotificación o construcción de nuevas viviendas. Este mismo criterio deberá ser aplicado aquellos lugares donde el suelo tiene mala respuesta sísmica,

principalmente asociados a suelos de constitución lahárica, aluvional o formas geomorfológicas predominantemente en terrazas fluviales, bancos de limo-arenosos, o en vértices de taludes, y en última instancia el control sobre las características del tipo y calidad de construcción.

Por otra parte, no se puede pensar en el diseño de un plan de manejo de desastres, que contempla dos fases complejas, prevención y respuesta, sin considerar un proceso de manejo de geoinformación sobre riesgos. Este proceso de información no solo considera la sistematización del inventario periódico de amenazas, sino que incluye los aspectos necesarios para el seguimiento, supervisión y control de la zonificación del territorio de turrialba en términos de la operatividad del plan.

A su vez es importante considerar las debilidades actuales para la implementación de un sistema de información como insumo directo al desarrollo de un plan de manejo o mitigación de desastres (ver árbol del problemas para el caso de turrialba). En este se han considerado los vacíos de información y carencias vinculados a procesos de toma de decisiones, al igual que las carencias en el uso y manejo desde el punto de vista técnico como elementos claves para incrementar las capacidades locales en materia de información como un recurso de gran valor para el diseño de medidas de prevención y mitigación.

7. CONCLUSIONES.

7.1 Las altas precipitaciones, pendientes fuertes, la falta de planificación del uso de la tierra de acuerdo a su capacidad de uso, así como, por un manejo no adecuado de la conservación del suelo; provoca en las áreas bajas aluviales (llanuras de inundación), altos caudales, causando inundaciones en el área urbana de la ciudad de Turrialba.

7.2 La falta de ordenamiento físico planificado en el área urbana, permite el desarrollo desordenado de las construcciones en las llanuras de

inundación, y por ende se genera algún grado de riesgo de inundación en algunas áreas o zonas específicas.

- 7.3 A falta de una legislación adecuada y su aplicación, el ingreso de las construcciones en las áreas de drenajes de los ríos; ha reducido su capacidad de evacuar los altos caudales durante las fuertes precipitaciones, provocando su estrangulamiento; con los consiguientes efectos de los rebalses, causando los daños materiales, de infraestructura y de las personas mismas.
- 7.4 La ciudad de Turrialba se encuentra en una región tectónicamente activa, en la cual la amenaza sísmica esta relacionada principalmente con la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitud moderada ($<6,5$) y foco superficial (< 12 KM), y en menor grado con sismos regionales que ocurren en fallas superficiales más alejadas o debidas al proceso de subducción.
- 7.5 Históricamente se han reportado en Turrialba intensidades máximas (MM) de hasta grado VII, especialmente durante el Terremoto de Limón de 1991. El sismo de magnitud mayor ocurrido en las cercanías de Turrialba ha sido asociado a la falla Atirro con epicentro localizado aproximadamente 10 km al sur de Turrialba. Este tuvo una magnitud de 5,3 y produjo en la zona epicentral (Pejibaye) Intensidades (MM) de grado VII y en la ciudad de Turrialba de grado VI.
- 7.6 De estudios de neotectónica recientes se ha determinado que las fallas locales cercanas a la ciudad de Turrialba podrían generar como máximo sismos de magnitud 6,5 y de acuerdo a la tasa media de ocurrencia sísmica en la región, un evento de esta magnitud puede ocurrir cada 70 años y generar intensidades I(MM) de hasta grado VIII. Sismos de magnitud 5,3 pueden presentarse cada 15 años y generar intensidades de grado VI en la ciudad de Turrialba.
- 7.7 La investigación del patrón de daños de eventos sísmicos recientes ha mostrado que no es posible realizar una microzonificación con base en las

condiciones geológicas, debido a la homogeneidad de estas condiciones en la ciudad de Turrialba.

- 7.8 La actividad histórica registrada del volcán Turrialba data desde el año 1,370 a.C. hasta 1,866 d.C. y se caracteriza por erupciones tipo freatomagmáticas, estrombolianas, vulcanianas y plinianas.
- 7.9 Las principales unidades litológicas observadas en el reconocimiento de campo fueron: depósitos de ceniza fina de más de 6 m de espesor, paleosuelos y coladas de lava andesíticas en las partes altas del volcán (a una altitud mayor de 1,800 m) y depósitos de avalanchas con fragmentos andesíticos angulares de hasta 1 m en las partes bajas y planas del área (Aquiaries, Santa Rosa y Repasto).
- 7.10 La zona de Amenaza Alta por flujos piroclásticos abarca una superficie de 5.78 km² y comprende los poblados de Buenos Aires, caseríos, lecherías y fincas vecinas, la zona de Amenaza Media abarca 8.26 km² y comprende los poblados de Santa Cruz, Pastora y caseríos vecinos y la zona de Amenaza Baja abarca 16.40 km² y comprende los poblados de Aquiaries y caseríos vecinos (*ver mapa de Amenaza Volcánica*).
- 7.11 La zona de Amenaza Moderada a Alta por lahares abarca las planicies de confluencia de los ríos Aquiaries y Turrialba (con menos de 8% de pendiente) y comprende los poblados de Aquiaries y Turrialba, mientras que la zona de Amenaza Moderada comprende los poblados de Río Claro, Verbena Sur, Santa Rosa e Isabel (*ver mapa Amenaza Volcánica*).
- 7.12 Es necesario remarcar también lo determinado por Siebert, 1984 en Reagan, Hill y Soto (inédito) de que existe un alto riesgo de ocurrencia de avalanchas durante futuras erupciones del volcán Turrialba. Los factores que promoverían la falla del edificio volcánico y la formación de dicho fenómeno serían: 1) pendientes fuertes, 2) lavas masivas sobreyaciendo estratos piroclásticos débiles, 3) amplia alteración hidrotermal del núcleo volcánico, 4) migración de cráteres en dirección paralela al eje de la

caldera, y 5) saturación de agua del edificio volcánico. Los factores 1), 2) y 4) han sido ampliamente documentado en los diferentes estudios realizados en la zona, mientras que el factor 5) podría ser derivado de un período de lluvias fuertes lo cual es probable en una zona tan lluviosa como el cantón de Turrialba.

7.13 Las áreas aledañas a la ciudad de Turrialba, las cuales están caracterizadas por fuertes pendientes presentan un índice alto de amenaza a los deslizamientos, ya que son las que están más afectadas por el tipo de uso actual de la tierra.

7.14 Existen numerosos deslizamientos de tipo moderado que pueden afectar las vías de acceso a la ciudad.

7.15 Se localizaron algunas zonas de deslizamientos potencialmente peligrosos para las comunidades que habitan estas áreas y para las actividades que se realizan en las mismas.

7.16 Las viviendas ubicadas en áreas con pendientes muy grandes casi verticales presentan serias amenazas de colapso.

7.17 Para un sismo con una aceleración de 0.165g y un periodo de retorno de 10 años, el 5.8% del área de estudio se vuelve inestable. En el caso de una aceleración de 0.263g y un período de retorno de 50 años, 14.5% del área de estudio se vuelve inestable. Por último, en el caso de una aceleración de 0.314g y un período de retorno de 100 años, 21% del área de estudio se vuelve inestable.

7.18 De acuerdo al análisis de deslizamientos, la parte norte que rodea la ciudad de Turrialba es la más estable.

7.19 Considerando la vulnerabilidad como esa condición que hace débiles a los hábitats humanos como el lugar de su residencia y trabajo, nos hace

reflexionar en que el lugar donde vivimos debería presentar unas condiciones óptimas de estabilidad y seguridad, lo cual se traduce en la reducción de la vulnerabilidad, disminución de pérdidas de vidas, de dinero, terrenos y valores culturales, ya que la reconstrucción y recuperación de una zona afectada algunas veces no se logra y conlleva un alto costo en el desarrollo en la región.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1 Retirar a los habitantes que construyeron sus casas en las riveras de los Ríos Turrialba, Colorado, así como las casas ubicadas en las áreas inundables (zona de Repasto y Mora).
- 8.2 Proteger y corregir el perfil del cauce del Río Turrialba, para aumentar su capacidad de drenaje; para lo cual se necesitan estudios específicos, comenzando por los más urgentes.
- 8.3 Explotar las rocas que el Río Turrialba arrastra para la elaboración de piedrin para la construcción de las viviendas; sugiriendo que esta explotación sea antes de que los drenajes ingresen en el área urbana.
- 8.4 Dar protección a las bases de los puentes a fin de que puedan soportar la velocidad dinámica del agua lluvia durante las crecidas.
- 8.5 Ampliar el canal del Río Colorado para que soporte una mayor descarga ya sea en lo horizontal o vertical, lo cual dependerá de los estudios específicos.
- 8.6 Retirar o reubicar las construcciones que están sobre la rivera de los drenajes del Río Colorado.
- 8.7 Cumplir con la ordenanza o leyes existentes relacionadas al tema para prohibir la construcción de viviendas en las riveras del río del Río Colorado.
- 8.8 Elaborar un plan de ordenamiento urbano.
- 8.9 Limpiar el cauce y evitar continuar botando la basura en el río.
- 8.10 Ampliar el canal de drenaje existente de la Quebrada Gamboa, o realizar estudios para ver la posibilidad de desviar el curso del canal.

- 8.11 Realizar obras de ingeniería de corrección de flujos y protección de taludes a fin de evitar socavamientos y ampliar la capacidad hidráulica de los ríos Azul y Aquiares.
- 8.12 Retirar las construcciones que están en las áreas inundables (zona de Repasto y Mora).
- 8.13 Realizar estudios hidrológicos e hidráulicos para conocer el comportamiento de los ríos Azul y Aquiares.
- 8.14 Los eventos sísmicos son fenómenos naturales sobre los cuales el hombre no tiene control de ocurrencia, pero si puede intervenir en la reducción de la vulnerabilidad ante la ocurrencia de un evento de esta naturaleza. Por lo tanto es en esta dirección donde debe orientar sus esfuerzos para mitigar y reducir el efecto de los mismos.
- 8.14 Aunque la ciudad de Turrialba a sufrido algunos daños severos durante la ocurrencia de eventos sísmicos, se considera que muchos de ellos se deben a la mala práctica de la construcción, utilización de materiales que no cumplen con especificaciones de diseño, falta de supervisión y control durante la construcción, selección de sitios con problemas naturales existentes (laderas inestables), etcétera. En este sentido y para reducir la vulnerabilidad física de toda la infraestructura existente en la ciudad de Turrialba, se recomienda que cada propietario o administrador de viviendas o edificios realice reforzamiento estructural en aquellos casos que sea necesario. En el caso de las nuevas construcciones seguir la normativa y especificaciones requeridas por el Código Sísmico de Costa Rica y el Código de Cimentaciones. Por parte de la Municipalidad del Cantón ejercer un control estricto de toda nueva construcción y velar por que la misma se construya de acuerdo a planos.
- 8.15 Que los Gobiernos, Autoridades Locales e Instituciones de Prevención del Riesgo formulen una política de Ordenamiento Territorial con el propósito

de restringir legalmente la construcción de facilidades e infraestructura en las zonas de Amenaza por Flujos Piroclásticos y Lahares.

- 8.16 Promover la Organización y Capacitación de los Comités Locales de Prevención del Riesgo y comunidades con el propósito de definir las estrategias de prevención y respuesta ante las amenazas volcánicas.
- 8.17 Diseñar y poner en funcionamiento sistemas locales de monitoreo volcánico e hidrometeorológico con el fin de detectar con el mayor tiempo de antelación la ocurrencia de fenómenos que pudieran desencadenar desastres y poder dar la alarma y alerta a los Comités Locales.
- 8.18 Identificar y señalizar las rutas de evacuación en caso de emergencia y las posibles vías alternas en caso de colapso de vías primarias.
- 8.19 Realizar estudios de detalle en aquellos deslizamientos que constituyan peligro para las actividades humanas y económicas.
- 8.20 Realizar cambios en los usos de la tierra en las zonas de amenaza alta por deslizamientos.
- 8.21 Evitar los cambios de usos de la tierra en las áreas de amenaza moderada.
- 8.22 Estabilizar algunas de las zonas en donde haya amenaza alta por deslizamiento para la población y sus actividades.
- 8.23 Reubicación de las comunidades que actualmente viven en las áreas potenciales de ocurrencia a los deslizamientos.
- 8.24 No construir casas en las formas cóncavas del relieve ya que el agua subterránea se mueve en esa dirección y se acumula creando inestabilidad en las laderas.

8.25 Construir viviendas en la zona norte que rodea la ciudad por ser la más estable.

8.26 Utilizar buenos sistemas de drenaje superficial tanto en las áreas dedicadas a las actividades agropecuarias, así como en las de viviendas.

8.27 Considerar la elaboración de una Estrategia Básica orientada a la Reducción de Riesgos. Esta estrategia debe integrar dos etapas claves en el manejo de desastres:

- Preparación-Respuesta.
- Prevención de Riesgos.

8.28 En los aspectos de preparación y respuesta, deben tomarse en cuenta los siguientes criterios:

- Distribución Geográfica de la recurrencia de eventos, esencialmente aquellos de menor periodo de recurrencia como inundaciones y deslizamientos.
- Integrar la cartografía a detalle (1:10.000 o 1:5000) para una zonificación preliminar de barrios o sitios con mayores problemas según tipo de evento.
- Distribuir la información a las instituciones y organizaciones involucradas en los procesos de emergencia o intervención en situaciones de crisis. De manera que propicie un mayor conocimiento exhaustivo de las áreas y sitios peligro.
- Promover la actualización de un censo actualizado sobre aquellos sitios que periódicamente han sufrido el impacto de eventos por inundaciones y deslizamientos, especialmente con variables de carácter socio-económico (número de personas, tipo de empleo, ingreso, composición étnica, entre otras importantes). El conocimiento de estas variables permitirá desarrollar

un proceso de asistencia y logística más rápido, planificado y consecuente con las necesidades de las comunidades afectadas periódicamente.

- Propiciar el fortalecimiento de un sistema de alerta temprana que integre las cuencas del Río Turrialba y Río Colorado. Un sistema de alerta temprana (SAT) deberá poner énfasis en el registro de cantidad de lluvia en puntos clave de ambas cuencas hidrográficas. La cantidad de lluvia comprende una variable importante para estimar la probabilidad de la extensión del área de inundación, y en cierta medida la frecuencia de deslizamientos.
- Como complemento al sistema de alerta temprana se pueden establecer mapas para diferentes cantidades de lluvias, según tiempo o intervalo de duración,. Estos mapas mostrarán las áreas que serán afectadas según la considerando la cantidad de lluvia, consistiendo en un insumo importante para los tomadores de decisiones en manejo de emergencias.
- El sistema de alerta temprana para inundaciones deberá contar con una red básica de comunicaciones con un receptor central, recomendable la central de Bomberos de Turrialba. Esta red es necesaria para recolectar y transmitir las medidas de lluvias en los puntos seleccionados a lo largo de la cuenca.
- Es imprescindible que en la formulación del SAT se establezcan los procedimientos básicos y sencillos para alertar a la población cuando se aproxima a la curva de tiempo crítico. Especialmente para el Río Colorado donde con lluvias extremas (superiores a 400mm) el tiempo de inundación entre 30-40 minutos, a diferencia del Río Turrialba donde el tiempo oscila entre 1-2 horas.
- El otro aspecto fundamental, es la organización comunitaria, si bien existen el potencial para el desarrollo instrumental del SAT de los Ríos Colorado y Turrialba, existe la necesidad de integrar a las comunidades en alto riesgo. Esto a través del fortalecimiento de equipos de trabajo comunitario involucrados directamente con el SAT, de manera tal que ellos perciban y estén sensibilizados de la utilidad y el valor del sistema, del contrario se corre el riesgo de que el sistema sea solamente un sistema de registro de

lluvias críticas antes que un disparador de alertas y consecuentemente evacuación preventiva.

- Contar con un manual de procedimientos básico y sencillo de amplia divulgación y al menos puesto en práctica 1 vez al año, en la que participan los tomadores de decisión en el manejo de emergencias y las organizaciones comunitarias en comunidades de amenazas recurrentes.
- Identificar las instituciones y organizaciones claves en procesos de emergencia, a su vez asignar un rol y responsabilidades específicas, estos deberán ser descritos y ampliamente divulgados a la población. Inclusive, es importante que se conozcan las atribuciones y los roles de las organizaciones comunitarias en situaciones de crisis.
- Debido a las características de multiamenaza de la ciudad de Turrialba se hace imprescindible en un corto plazo destinar los recursos humanos, físicos y financieros para el desarrollo en corto de un sistema de alerta temprana en inundaciones y deslizamientos.

8.29 En los aspectos de prevención de riesgos, deben considerarse:

- La incorporación de la variable amenaza a aspectos de ordenamiento del territorio.
- Determinar el impacto de usos del suelo especialmente en los sector de la cuenca alta y media del Río Turrialba y Río Colorado.
- Propiciar la aplicación de medidas no estructurales tales como la limitación de nuevas construcciones en áreas propensas a inestabilidad de laderas, especialmente hacia el sector oeste y suroeste del ciudad de Turrialba, sectores de Campabadal y Calle Cementerio.
- Propiciar que las instituciones aseguradoras y los bancos que otorguen crédito de vivienda utilicen la información sobre amenazas existente en la

ciudad de Turrialba como una medida precautoria y de orientar la inversión constructiva hacia sitios seguros o de menor riesgo.

- Con la competencia de las autoridades y organismos correspondientes proceder a una valoración exhaustiva y de aquellos casos que requieren soluciones inmediatas, especialmente de aquellos sitios bajo la categoría de riesgo inminente.
- Promover la creación de una unidad técnica para el seguimiento, diagnóstico y evaluación del riesgo del cantón de Turrialba, recomendable su ubicación en la municipalidad y con una participación directa e irrestricta del comité local de emergencia.

8.30 Concientizar a los habitantes de la ciudad de Turrialba de las amenazas que les rodean, para que tomen una actitud más agresiva en la reducción de la vulnerabilidad.

8.31 Identificar áreas de riesgo. Una educación encaminada a este fin llevara a los ciudadanos a hacerse consciente de ser participantes activos y conocer la responsabilidad individual y comunitaria y no solo de las Instituciones o de la Municipalidad que son directamente encargadas de velar por hacer menos vulnerable los asentamientos humanos.

8.32 Las conclusiones y recomendaciones dadas en este proyecto llevan como objetivo el análisis y puesta en marcha de una nueva visión ante las amenazas en la población de Turrialba, la cual debe reconocer de que se trata de su ciudad y no es ignorando el peligro como se solucionan los problemas, mas bien se llama a la organización y vinculación a los comités de trabajo comunitario y de emergencias proponiendo ideas y conociendo del lugar que se habita.

9. BIBLIOGRAFIA

- Alvarado, G., Barquero, R. y Climent, A., 1998. Informe sismológico y neotectónico actualizado para la etapa de factibilidad del P.H. Pacuare. Informe interno. ICE. 47 pp. + figs.
- APARICIO, M., 1999. Dinámica de Inundaciones del Río Colorado e Impacto en Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE).
- Apolo, W., 1980, Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un pastizal con arboles aislados en la Suiza, Turrialba, Costa Rica; Tesis de Maestría, CATIE, Turrialba.
- Barquero, R. y Peraldo (editores), G., 1993. El temblor de Pejibaye de Turrialba del 10 de julio de 1993: Aspectos sismológicos, neotectónicos y geotécnicos. RSN(ICE-UCR). 33 pp+figs.+Cuadros y Anexos.
- Barquero, R. y Rojas W., 1997. Sismicidad inducida por el terremoto de Limón del 22 de abril de 1991. Rev. Geol. de Amer. Central. Vol. Esp. 111-120.
- Barquero, R. y Rojas, W., 1994. Catálogo de mapa de isosistas de temblores y terremotos importantes de Costa Rica. Informe Interno ICE. OSV.94.03, ICE. 62 pp.
- Boschini, I., 1989. Incidencia de las fuentes sísmicas en la región Caribe de Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 97 pp.
- CHOW, V., MAIDMENT, D., MAYS, L., 1988. Hydrology. McGraw-Hill Book Company. USA.
- Climent, A. y Barquero, R., en preparación. P.H. Pacuare. Estudio de Amenaza Sísmica. Informe Interno ICE.
- Climent, A., 1989. Recopilación sismológica en la zona de Turrialba y alrededores. Interpretación preliminar. Informe Interno ICE. 9 pp.
- Climent, A., Barquero, R. & Alvarado, G. ,1999, P.H. Pacuare, Estudio de amenaza sísmica; Sector Energía, Instituto Costarricense Electricidad, 23 pp.
- Comisión Nacional de Emergencia y otros, 1990, Preliminary Hazard Map for Turrialba Volcano, No publicado, Costa Rica.

- GARCIA, J. D., 1990. El Análisis de las Cuencas Hidrográficas Aplicado al Problema de las Inundaciones. El caso de la ciudad de Turrialba (Costa Rica), Universidad de Costa Rica.
- Gracia, J.D., 1990, El análisis de cuencas hidrográficas aplicado al problema de inundaciones. El caso de la ciudad de Turrialba (Costa Rica); Licenciado Tesis, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica, San José, 183 pp.
- I.G.N., 1981. Hoja 34451. Tucurrique. Proyección Lambert, esferoide de Clark de 1986. Datum Ocotepeque. Escala 1:50,000. 2da. Edición. Costa Rica.
- ITC ,1997, ILWIS User´s Guide. Enschede, Holanda.
- ITC ,1999, GISSIZ. Landslide Lectures, versión 2. Enschede, Holanda (CD-ROM).
- MORA, M., 1996. Fotografías de inundaciones de la ciudad de Turrialba; Foto Estudio Mora, Turrialba, Costa Rica.
- Mora, R. ,1998, Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica; Revista Geológica de América Central 19, 81-98.
- MORA, R., 2000. Geomorfología de la cuenca del Río Turrialba. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica (Inédita).
- Paniagua, S. y Soto, G., 1988, Peligros volcánicos en el Valle Central de Costa Rica, Revista Ciencia y Tecnología, No. 12, San José, Costa Rica, 12 pp.
- Reagan, M., Hill, J. And Soto, G., An outline of the recent eruptive history of Turrialba volcano, Costa Rica, Departamento de Geología, Universidad de Iowa, Iowa City y Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Reporte Inédito.
- Salazar, G., 1996, Análisis geológico y geomorfológico aplicado al “Plan Regulador de parte del cantón de Guácimo, Costa Rica”, Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Costa Rica, 202 pp.
- SOLIS, H., BEAULIEU, N., CHACON, J., 1994. Análisis del Problema de Inundaciones del Río Colorado, Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- SOLOS, B., OREAMUNDO, R., MURILLO, W., CHACON, J., 1993. Modelación Hidrológica e Hidráulica para Control de Inundaciones

en Centroamérica. (Casos Río Purires y Turrialba). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

- Soto, G.J., 1988, Estructuras volcano-tectónicas del volcán Turrialba, Costa Rica, América Central, Simposio sobre Magmatismo Andino en V Congreso Geológico Chileno, Santiago de Chile.
- Utrecht University, 1998, PC Raster Software, Holanda.
- Utrecht University, 1998, PCRaster versión 2 Manual. Universidad de Utrecht, Los Países Bajos, 368 pp.
- Van Asch, T. W.J , 2000, A Combined Hydrological-Slope Stability Model. Universidad de Utrecht, Los Países Bajos, 9 pp.
- World Meteorological Organization, 1999, Comprehensive risk assessment for natural hazards, Technical Paper WWO/TD No. 955, Geneva, Switzerland.