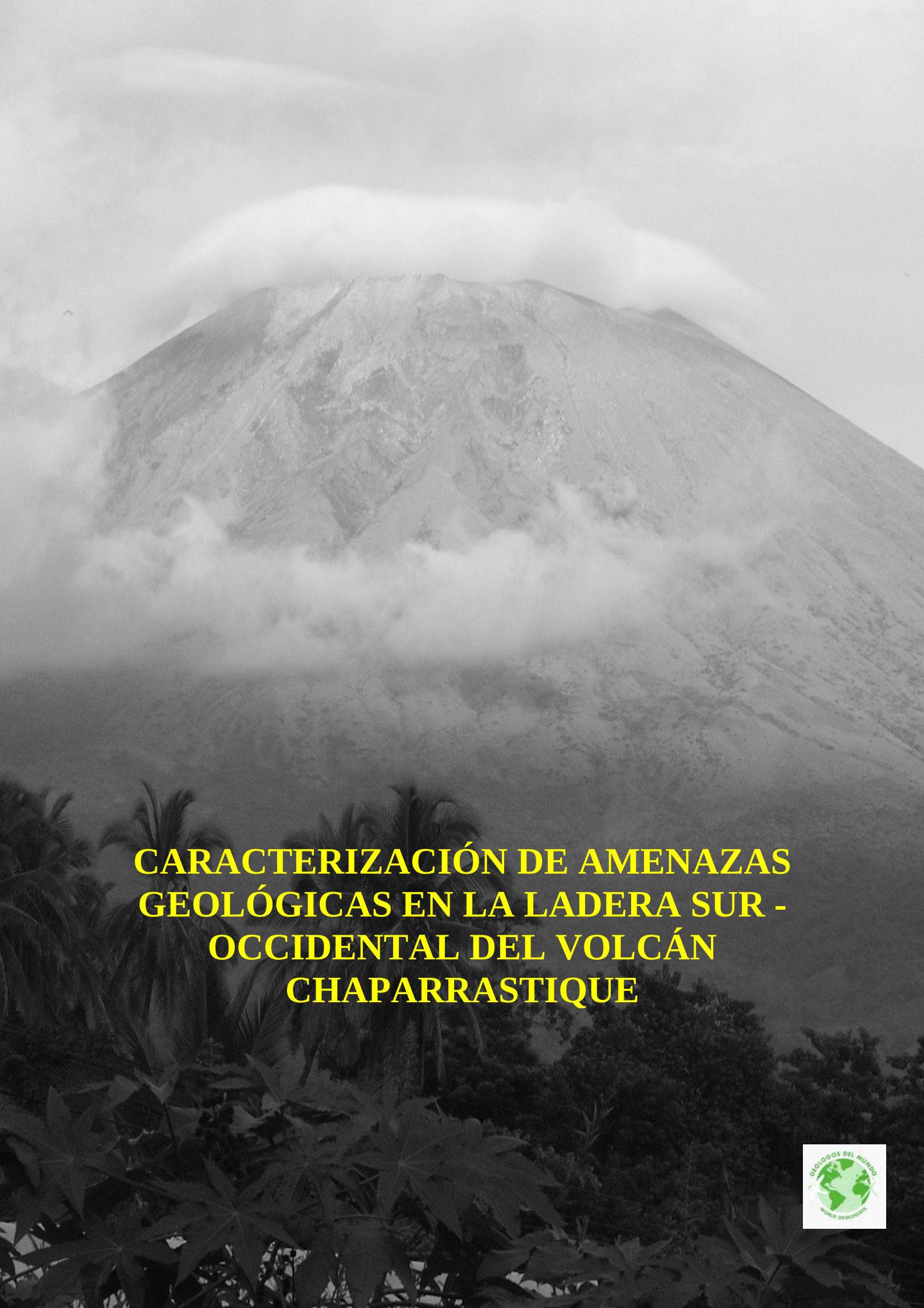


CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA LADERA SUR - OCCIDENTAL DEL VOLCÁN CHAPARRASTIQUE

CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA LADERA SUR - OCCIDENTAL DEL VOLCÁN CHAPARRASTIQUE

EJECUTOR

Geólogos del Mundo

Coordinación del proyecto – **Jose Antonio de San Antonio (Geólogo)**
Apoyo hidrología y SIG – **Carlos Fernández Lavado (Geólogo)**
Apoyo colaboración – **Soledad Fernández (Geóloga)**

BENEFICIARIOS:
MUNICIPALIDADES PERTENECIENTES A LA SUBCUENCA DE EL TRANSITO

CONTRAPARTES:
OIKOS SOIDARIDAD
SOLIDARIDAD INTERNACIONAL

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN..... 3
1.1. Antecedentes..... 6
1.2. Objetivos..... 6
1.3. Componentes del estudio..... 7
2. METODOLOGÍA..... 9
2.1. Preparación de proyecto..... 9
2.2. Trabajo de campo..... 10
2.3. Procesamiento de datos..... 11.
2.3.1. Caracterización de las amenazas..... 11
2.3.2. Susceptibilidad a las inestabilidades de ladera..... 11
2.3.3. Peligrosidad por inestabilidades de ladera..... 12
2.3.4. Peligrosidad por avenidas e inundaciones..... 12
3. MARCO GEOGRÁFICO..... 13
3.1. Contexto geográfico..... 13
3.2. Situación político-administrativa..... 13
4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO.....15
4.1. Climatología..... 15
4.1.1. El clima en El Salvador..... 15
4.1.2. El clima en la vertiente sur del volcán de San Miguel..... 16
5. GEOLOGÍA..... 17
5.1. Marco geológico regional..... 17
5.1.1. Elementos estratigráficos..... 19
5.1.2. Historia geológica del Terciario-Cuaternario..... 20
5.2. Marco geológico local..... 20
5.3. Tectónica..... 25
5.3.1. Tectónica regional..... 25
5.3.2. Tectónica local..... 27
5.4. Geomorfología y relieve..... 27
5.4.1. Contexto regional..... 28
5.4.2. Contexto local..... 29
5.4.2.1. Unidades geomorfológicas 30
6. HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL..... 34
6.1. Delimitación de la subcuenca hidrográfica..... 34
6.2. Morfología de la red de drenaje. Caracteres cualitativos de la red de drenaje..... 35
6.3. Morfometría de la red de drenaje. Caracteres cuantitativos de la red de drenaje..... 38
6.4. Interpretación..... 46
7. ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS..... 48
7.1. Análisis de inundaciones..... 48
7.1.1. Caracterización de la amenaza..... 48

7.1.2. Análisis de la peligrosidad..... 50
7.1.2.1. Análisis de precipitaciones..... 50
7.1.2.2. Estudio hidrometeorológico..... 60
7.2. Análisis de inestabilidades de ladera..... 73
7.2.1. Caracterización de la amenaza..... 73
7.2.1.1 Deslizamientos..... 75
7.2.1.2 Desprendimientos..... 76
7.2.1.4. Flujos..... 77
7.2.2. Caracterización de la susceptibilidad..... 77
7.2.3. Mapa de susceptibilidad..... 83
8. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) 84
8.1. Magnitud y alcance de la amenaza..... 84
8.2. Factores desencadenantes de la amenaza..... 87
8.3. Evolución temporal del fenómeno..... 90
8.4. Propuesta se sistema de alerta temprana..... 92
9. CONCLUSIONES..... 95
10. RECOMENDACIONES..... 98
MAPAS ANEXOS..... 100
BIBLIOGRAFIA 112

1. INTRODUCCIÓN

Todo el territorio de la República de El Salvador se caracteriza, desde el punto de vista natural, por presentar una fuerte actividad volcánica y sísmica, como corresponde a un país formado por rocas y materiales muy jóvenes que provienen del interior de la corteza terrestre, en un lugar donde una placa tectónica (Cocos) subduce debajo de otra (Caribe).

La actividad sísmica intensa hace que los terremotos ocurran con una periodicidad muy baja, lo que representa un riesgo muy importante para toda la población, tanto por las pérdidas materiales, como por las pérdidas de vidas humanas que da lugar a un retroceso en el desarrollo social y económico del mismo, y hacen que el país tenga que reconstruir parte de sus infraestructuras básicas cada cierto tiempo.

Por su parte, la actividad volcánica da lugar a la aparición de edificios volcánicos o volcanes, producto de la acumulación de materiales procedentes del interior de la tierra en un punto. En este caso, los efectos producidos por los mismos se suelen restringir a una zona muy pequeña alrededor del volcán. No obstante, también pueden ser focos de sismos relacionados con la ascensión del magma desde el interior de la corteza, o de, de modo excepcional, explosiones que puedan afectar a una gran superficie, pudiéndose sentir sus efectos en todo el planeta durante un período de tiempo que puede llegar a ser importante.

Además de los procesos internos descritos con anterioridad, en la superficie terrestre actúan otros procesos relacionados con la actividad existente en la atmósfera y que se denominan externos. Los procesos de este tipo más importantes que se registran en el país, son las lluvias estacionales, que debido a su carácter torrencial, pueden dar lugar a situaciones de riesgos. Este hecho combinado con que la mayoría de los terrenos existentes en el país son de origen volcánico, con un grado de compactación muy bajo, hace que sean muy susceptibles a ser arrastrados desde las zonas altas a las más bajas.

En la zona donde se desarrolla el presente estudio se dan todos los fenómenos anteriormente descritos, la sismicidad, la presencia de edificios volcánicos y el lavado de los materiales volcánicos por las lluvias.

No obstante, el estudio se centra en las amenazas procedentes de las “correntadas” que puedan venir de las partes altas del área estudiada y que arrastran material situado en esas zonas.

El área de trabajo está situada en la ladera sur-occidental del volcán de San Miguel o Chaparrastique. Es un volcán activo, con presencia de fumarolas en su cráter, retumbos y la existencia de actividad microsísmica característica de los edificios volcánicos.

Las laderas del volcán se encuentran surcadas por quebradas, que son las encargadas de drenar, en época lluvias, el agua que no es capaz de infiltrarse en el terreno, arrastrando a su paso el material susceptible a ser removido que encuentra.

De todas las quebradas existentes en la zona sur-occidental del volcán, se ha escogido como la más representativa la de El Tránsito, por ser la que tiene una mayor superficie de cuenca, la que arrastra una mayor cantidad de material y porque afecta a un mayor número de habitantes de la zona, ya que discurre a través de los pueblos de San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito.

Esta quebrada no sólo está enraizada en el volcán Chaparrastique (Foto 1.1), sino también en el volcán Laguna Seca del Pacayal, también considerado activo por la presencia de zonas calientes en sus laderas, que son utilizadas por los habitantes de la zona para cocinar algunos alimentos.

Entre estos dos volcanes se sitúa una estructura circular poco marcada, correspondiente a un cono de escorias de lapilli que está siendo desmantelado por la acción de la lluvia en la época húmeda.

Foto 1.1: Volcan Chaparrastique

En general, en la parte alta de la cuenca existen cultivos de café, por lo que se encuentra bastante protegida del impacto directo de la lluvia y de la acción de la escorrentía superficial. No obstante, la zona correspondiente al volcán Chaparrastique y la zona intermedia – baja de la cuenca, se encuentra más desprotegida por los usos agrícolas que se está haciendo de ella. Como nota positiva hay que resaltar el cambio que se está dando en algunas zonas a la hora de cultivar los granos básicos, ya que se están poniendo en las laderas barreras vivas de zacate y madrecacao que retienen el terreno, además de hacer zanjas a modo de resumideros que permiten que haya una mayor infiltración en el terreno y que disminuya el agua de escorrentía superficial.

En el presente estudio se realiza una descripción general del medio físico y de la geología y un análisis de las amenazas por inestabilidad de ladera e inundaciones. Dicho análisis incluye una caracterización de las amenazas, así como una determinación de la susceptibilidad. La elaboración de este estudio se ha basado en observaciones de campo, fotointerpretación, análisis de datos disponibles de precipitaciones y eventos ocurridos en la zona.

Como parte final del proyecto se ha diseñado un sistema de alerta temprana (SAT) para lahares y avenidas torrenciales. Este sistema esta compuesto por una estación meteorológica completa y un sistema receptor situado en el municipio de San Jorge.

Este municipio es el encargado de avisar a la misma población y a la de los municipios situados en los márgenes de la Quebrada de El Tránsito. La alarma será dada cuando la intensidad de lluvia medida en la estación por el pluviógrafo allí instalado supere un valor predeterminado.

A continuación se han realizado unas tablas en las cuales se recogen los diferentes eventos naturales históricos acaecidos en la zona:

ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN DE SAN MIGUEL	
Fecha	**Descripción**
1586	Emanación de gases (después de 107 días de actividad.
1693	Temblor y fuertes retumbos. Manifestación de gases.
1699	Primera erupción histórica. Colada de lava hacia el SSE. Boca eruptiva a mitad de ladera SE. Precedida de retumbos y terremotos.
1717	Terremoto en la ciudad de S. Miguel (04/10) asociado a la actividad del volcán. No exisitió manifestación eruptiva.
1762	Colada basáltica hacia el NE. Erupción por grieta lateral en dirección a San Miguel
1769	Actividad explosiva, con emanación de gases y ceniza
21-23 sep. 1787	Erupción fisural a media altura de la ladera SSE del volcán. Atravesó la carretera a Usulután. Hoy se encuentra cubierta por las coladas de 1819 y 1855.
8 feb. 1793	Actividad sísmica en la zona con emanación moderada de gases.
Enero 1798	Temblor en el área de San Miguel. Pluma de gases constante a 100m de altura.
1811	Explosiones intermitentes moderadas.
18 jul. 1819	Colada basáltica por grieta lateral hacia SSE. Quedó intransitable la carretera a Usulután. Emanaciones de gases desde el cráter.
1835	Explosiones en el cráter central.
25 jul. 1844	Dos días de retumbos. Colada basáltica eruptada por bocas alineadas rumbo N15ºW 8¿14 bocas?) a 1120 m. Cambio de rumbo de N a NE. Erupción de lava hasta el mes de octubre.
1844-1848	Periódicos lanzamientos de ceniza.
1848	Pequeña colada de lava desde el cráter central hacia el NW.
1854	Actividad explosiva moderada.
1-15 dic. 1855	Erupción fisural a media altura en dirección SSE. Enjambre sísmico local.
6-10 nov. 1857	Expulsión de bloques y ceniza. Actividad sísmica.
Enero 1862	Constante pluma de gases a 400 m de altura aproximadamente..
14 dic. 1867	Fuerte erupción de lava y cenizas hacia el SW. Fuertes retumbos. Quema de vegetación.
16 feb. 1868	Pluma de gases.
Dic. 1882	Erupción moderada de ceniza.

25 ene. 1884	Erupción de cenizas. Varios días de duración. Extrusión de lava dentro del cráter. Formación de cómo de escorias.
19 dic. 1919-ene. 1920	Actividad explosiva. Expulsión de cenizas y gases de color negro.
Abril 1920	Erupción de ceniza.
1920-14 ago. 1924	Explosiones periódicas con lanzamiento de ceniza.
Ago. 1929	Tres cráteres activos lanzan rocas hasta 250 m de altura.
Finales ene. 1930	Explosión con lanzamiento de escorias incandescentes.
2 jun. 1931	Erupción de cenizas que alcanzan la ciudad de San Miguel. A finales de mes la actividad decreció.
Mar.-jun. 1931	Lanzamiento de escorias rojizas desde el cráter central.
21 oct. 1954	Columna de gases entre 300 y 400 m de altura. Consecuencia de un temblor originado en el mismo día con epicentro a 160 Km al WSW de San Salvador
23 oct. 1964	Explosiones continuas por la noche y lanzamiento de cenizas hacia el W.
22 feb. 1966	1'5 m de espesor de ceniza en el cráter.
Jul. 1966	Erupción moderada de ceniza.
5 ene. 1967	Erupción de ceniza hacia el W y SW.
30 mar.-5 abr- 1970	Erupción de cenizas. Hacia el NW alcanzan 10 Km. Volumen equivalente a 75.000 m^3.
2 dic. 1976	Flujo de lava que rebasa el cráter y sus alrededores.
1985	Emanaciones moderadas de gases y cenizas. Nuevo período de actividad.
Dic. 1988	Personas del Cantón El Volcán reportan escuchar retumbos, con lanzamiento moderado de ceniza. Pequeña pluma de gases.
Dic. 1986-dic 1989	Emanaciones de gases azufrados desde la chimenea central y fumarola adyacentes de moderada actividad.
Dic. 1989-abr. 1992	Actividad fumarólica continua. Olor a azufre.

DATOS HISTÓRICOS RELACIONADOS CON INUNDACIONES	
Fecha	**Descripción**
29 – 5 – 1915	Inundaciones en el oriente del país
24 – 10 – 1918	Gigantesca marea en el pacífico mesoamericano
4 – 6 – 1921	Cuarenta casas arrasadas en El Tránsito por correntada.
26 – 10 – 1921	Temblores y correntadas en Usulután. Toda la zona costera inundada.
22 – 9 – 1926	Inundaciones en Concepción Batres.
12 – 9 – 1928	Vendaval causa estragos en La Unión.
5 – 6 – 1929	Correntada en volcán de San Miguel inunda propiedades.
16 – 9 – 1929	Temporal causa destrozos en todo el país
7 – 10 – 1931	Inundación en El Tránsito

1.1. Antecedentes

Este trabajo no es una actuación aislada dentro de la zona. Viene a complementar un trabajo realizado con anterioridad, durante los años 2001 – 2002, desarrollado dentro del programa DIPECHO II y llevado acabo por las organizaciones Geólogos del Mundo y Ceprode. Tenía un ámbito de actuación mucho más amplio, siendo la caracterización de amenazas y vulnerabilidades una parte del mismo.

En él se realizó una caracterización geológico-ambiental de la zona, una modelización de los escenarios de riesgos y la elaboración de una serie de mapas temáticos y de riesgo. Todo esto se vio completado con el diseño de un sistema de alerta temprana basado en la intensidad de lluvia.

Para realizar todo este trabajo se llevó a cabo una campaña de campo donde se recogieron los datos necesarios para el mismo. Además existió un trabajo de estudio donde se analizaron fotografías aéreas, trabajos anteriormente publicados y datos meteorológicos e históricos relacionados con las actividades sísmica y volcánica de la zona. Para definir el sistema de alerta temprana por lluvia se calculó un rango de umbrales teniendo en cuenta los datos meteorológicos y los datos proporcionados por los habitantes de la zona y las observaciones realizadas en el campo donde se identificaron los procesos laháricos que quedaron registrados en los sedimentos existentes en la zona.

1.2. Objetivos

El proyecto pretende profundizar en los conocimientos geológicos, técnicos y científicos con el fin de comprender la dinámica de los procesos que han afectado al área de estudio, las inestabilidades de ladera, la formación de flujos torrenciales y los desbordamientos de éstos. Mediante la diagnosis e inventario de las zonas más afectadas se han realizado cartografías de susceptibilidad a los movimientos de ladera y de áreas inundables, que sirven como herramienta para la ubicación de las zonas de alta peligrosidad, prevención de desastres y evaluación de recomendaciones para la mitigación de las amenazas.

Los objetivos del presente estudio, así como los principales ejes en torno a los que ha girado el trabajo para lograrlos, son los que siguientes:

Objetivo general

Contribuir al conocimiento de las amenazas geológicas a través de su caracterización en la vertiente sur-occidental del volcán de San Miguel, reduciendo de esta manera la vulnerabilidad frente a estos procesos naturales.

Objetivos específicos

- Estudiar, desde el punto de vista geológico, los procesos activos que puedan dar lugar a inestabilidades gravitatorias, principalmente lahares, en el volcán de San Miguel.
- Establecer la peligrosidad de los procesos geológicos y realizar una valoración del riesgo.
- Diseñar un sistema de alerta temprana en función de la caracterización de las amenazas.
- Proponer medidas correctoras y preventivas para minimizar los efectos de los riesgos geológicos existentes en la zona de estudio.

1.3. Componentes del estudio

La consecución de los objetivos planteados se ha desarrollado a partir de seis grandes ejes:

Inventario de inestabilidades con el fin de caracterizar la tipología de los movimientos de ladera y conocer con exactitud la dinámica de los mismos, la relación con otros factores y su ubicación.

Elaboración de cartografía temáticas (mapa litológico, geomorfológico, orientaciones, vegetación, procesos activos, pendientes, inventario de movimientos de ladera) para la identificación de los factores físicos con incidencia en la susceptibilidad de procesos de inestabilidad gravitacional.

Análisis y cartografía de las susceptibilidad a las inestabilidades de ladera a partir de algunos de los mapas temáticos

Estudio hidrometeorológico, con el fin de estimar los caudales asociados a las precipitaciones máximas.

Cartografía de áreas inundables, a partir de los caudales estimados para distintos períodos de retorno.

Diseño de un sistema de alerta temprana para lahares y avenidas basado en los estudios realizados con anterioridad.

2. METODOLOGÍA

Para la ejecución del presente estudio se han determinado tres fases de trabajo centradas en la preparación del proyecto, el trabajo de campo y el trabajo de gabinete. Para ello, se han realizado las siguientes actividades:

1. Recopilación bibliográfica.
2. Estudio de fotografía aérea.
3. Generación de fichas.
4. Realización de un inventario de inestabilidades.
5. Análisis del estado de los cauces, medidas de secciones y estimación de material.
6. Levantamientos litológico de campo.
7. Recopilación de información acerca de eventos anteriores proporcionada por la población.
8. Realización de una base de datos de inestabilidades.
9. Análisis de la morfografía de las redes de drenaje.
10. Análisis de las amenazas presentes.
11. Realización de cartografías temáticas.
12. Realización del mapa de susceptibilidad por inestabilidades de ladera.
13. Análisis de precipitaciones.
14. Estudio hidrometeorológico.
15. Modelización de las avenidas mediante HEC-Ras.
16. Realización de un mapa de áreas inundables.
17. Diseño de un sistema de alerta temprana
18. Obtención de conclusiones y recomendaciones.
19. Redacción y difusión del informe.

2.1. Preparación del proyecto

Durante este tiempo se realizaron diversas actividades de puesta en contacto con diversos organismos, recopilación de información y elaboración de una metodología de trabajo.

Para la preparación del proyecto también han intervenido la UCA (Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”), la ONG local OIKOS Solidaridad y Solidaridad Internacional, facilitando y gestionando la obtención de recursos materiales y humanos, así como proporcionando numerosa documentación. Así mismo, se firmó

un convenio con el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales), mediante el cual se logra un intercambio de información que beneficia a ambas partes.

En cuanto a la recopilación de información, se tuvo como objetivo la obtención de bibliografías temáticas (sobre aspectos referentes al proyecto, así como otro tipo de información socio-económica del área de estudio), datos de precipitaciones, fotografías aéreas y mapas topográficos.

Paralelamente, se elaboró una metodología de trabajo definida, tanto para la toma de datos, como para el trabajo de campo, y el procesamiento de dichos datos. Se establecieron así, unos modelos para la recogida de datos de inestabilidades gravitatorias, afloramientos litológicos, y se definió toda la información que iba a ser necesario recopilar o desarrollar para llegar a la caracterización de los riesgos geológicos.

2.2. Trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se han recogido los datos necesarios para elaborar algunas cartografías temáticas, como son el mapa litológico, geomorfológico, y de procesos activos. Igualmente, se han tomado los datos necesarios para caracterizar las formaciones litológicas, tanto desde el punto de vista de su identificación como de su comportamiento.

Foto 2.1: Inestabilidad en la quebrada

En este sentido, se han tomado cuantos datos han sido posibles para caracterizar los riesgos geológicos presentes en el área de estudio, en cuanto a su identificación y a los factores que los condicionan y desencadenan. Para ello, se ha realizado un inventario de las inestabilidades observadas (Foto 2.1), presentando especial atención a aquellas que están cerca de las poblaciones o que pudieran afectar a infraestructuras ya existentes. Con este objetivo, se han elaborado unas fichas que sirvieran como base para la descripción de las mismas. Estas fichas reflejan datos sobre tipología de inestabilidades, dimensiones, grado de desarrollo, grado de equilibrio, composición litológica y estado de alteración, existencia o no de cobertera vegetal, existencia de grietas, etc. Esta información ha sido llevada a una base de datos, quedando así reflejado el estado en que se encuentran estas zonas en el momento de la realización del presente estudio, y permitiendo, de esta manera, la realización de un seguimiento de su evolución.

Para la caracterización de la inundaciones se han tomado datos de los cauces y observado el estado en el que éstos se encuentran. Se ha estimado, igualmente, la cantidad de material susceptible de ser transportado en los momentos de regímenes

torrenciales y se ha recopilado información sobre la ocurrencia de eventos anteriores, proporcionada por los habitantes de las zonas afectadas.

Por último, se ha realizado también un inventario fotográfico en el que se refleja el estado general de toda la zona de estudio.

2.3. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se ha centrado en el análisis de los distintos factores que van a condicionar los riesgos estudiados, ya sean riesgos relacionados con los movimientos de ladera o inundaciones. Igualmente, se ha analizado la forma en que éstos interactúan y se han elaborado cartografías de los mismos, así como de su integración mediante SIG, que da lugar o contribuye al desarrollo de los mapas de susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos de ladera y zonas inundables.

Se ha llevado a cabo, además, un detallado análisis de las precipitaciones y estudio hidrometeorológico, conducentes a la estimación de los caudales esperados para distintos períodos de retorno y a la determinación junto con los trabajos de campo de la áreas inundables.

Para estimar el comportamiento de las amenazas se utiliza sistemáticamente el principio del actualismo, según el cual los procesos y las leyes naturales que actualmente modifican la corteza terrestre son los mismos que han venido actuando a lo largo de toda la historia geológica (Hutton, J. S. XVIII).

2.3.1. Caracterización de las amenazas

Tras las observaciones y datos obtenidos en el campo, se ha realizado una caracterización de las amenazas identificadas para este estudio, con el fin de analizar posteriormente la susceptibilidad y peligrosidad asociadas.

2.3.2. Susceptibilidad a las inestabilidades de ladera

La susceptibilidad a los movimientos de ladera es la mayor o menor tendencia a que se genere una inestabilidad gravitacional en una zona específica, en función de unos factores condicionantes. Por lo tanto, es una herramienta de predicción espacial, aunque no temporal.

Para establecer los distintos rangos de susceptibilidad se hace necesaria la realización de un análisis de la amenaza existente, debiendo determinarse cuáles son los factores condicionantes de la ocurrencia de movimientos gravitatorios.

En la realización del mapa de susceptibilidad a las inestabilidades de ladera se integrarán mediante SIG las cartografías elaboradas para cada uno de los factores condicionantes, dándoles un peso diferente en función de la información recopilada y las observaciones de campo realizadas.

2.3.3. Peligrosidad por inestabilidades de ladera

La peligrosidad es la condición, proceso o suceso geológico que supone una amenaza para el ser humano y su hábitat, en definitiva, para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos o la economía de una comunidad (USGS, 1977). Es función, por tanto, de la amenaza, como proceso que puede generar daño, y de la probabilidad de ocurrencia o frecuencia del fenómeno. Para determinar esta probabilidad de ocurrencia se debe establecer el tiempo de retorno de los factores desencadenantes.

En la determinación de la peligrosidad de las inestabilidades de ladera en el área de estudio, se debería establecer el período de retorno de sismos y precipitaciones sobre un registro mínimo. Para ello, se ha de tomar un valor tanto de intensidad de precipitaciones como de magnitud de sismos, a partir del cual se pueden producir inestabilidades, y obtener el tiempo de retorno de dichas intensidades y magnitudes. Debido a la dificultad que supone establecer estos rangos y períodos de retorno combinados para ambos factores, y a la escasez de registros disponibles, no se ha elaborado el mapa de peligrosidad.

2.3.4. Peligrosidad por avenidas e inundaciones

Según la definición dada de peligrosidad, para la estimación de este parámetro debe determinarse la probabilidad de ocurrencia de la amenaza de avenidas e inundaciones, estableciendo el tiempo de retorno de los factores desencadenantes.

Para ello, se ha realizado un estudio probabilístico de las precipitaciones. Al igual que para la caracterización de las inestabilidades ha surgido la problemática de la ausencia de un registro suficientemente completo. Por esta razón, se ha trabajado con los datos existentes aún sabiendo que pueden no representar fielmente las condiciones del área. A partir de los datos de precipitaciones estudiados, se han obtenido los principales caudales asociados a estas lluvias para distintos períodos de retorno. Para ello, se ha empleado un método de precipitación-escorrentía de uso común, el método racional modificado por Témez en 1999. Partiendo de los caudales, se ha modelizado el comportamiento de la quebrada de El Tránsito mediante el programa HEC-Ras desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estado Unidos (USACE, 1997). Esta aplicación permite el cálculo de áreas inundadas, anchura de flujo, altura alcanzada por las aguas, etc.

Debido a las dificultades encontradas durante el estudio y a las limitaciones del propio método, el mapa de áreas inundadas se ha generado a partir de diversas fuentes, como

son los resultados de dicha modelización, las observaciones de campo y foto aérea, y los datos aportados por los habitantes de la zona.

3. MARCO GEOGRÁFICO

En el presente capítulo se realiza una ubicación de la zona de estudio en su contexto regional, así como una descripción del área en la que se ha realizado el estudio.

3.1. Contexto geográfico

El territorio de La República de El Salvador tiene una extensión aproximada de 21.000 Km2, geográficamente ubicado entre las siguientes coordenadas:

Latitud: 13º 9’ N/ 14º 26’ N
Longitud: 87º 43’ E/ 90º 08’ E

Situado en América Central, limita la norte y oeste con Guatemala, al norte y al este con Honduras, y al sur con el Océano Pacífico.

El país está dividido en 14 departamentos, situándose el área de trabajo en el departamento de San Miguel.

Esta zona comprende parte de los territorios de los municipios de Chinameca, Concepción Batres, El Tránsito, Ereguayquín, San Jorge, San Miguel y San Rafael Oriente.

La zona de trabajo está situada dentro de las siguientes coordenadas:

Latitud: 13º 20’ N / 13º 29’ N
Longitud: 88º 22’ E / 88º 16’ E

3.2. Situación político-administrativa

Los 14 departamentos en los que se divide El Salvador, se dividen, a su vez, en municipios, que son la unidad político-administrativa primaria de la organización estatal, en cuya jurisdicción territorial se encuentran cantones y caseríos.

Las comunidades situadas dentro del área de estudio son las de El Mogote, Barrio Concepción y Las Moritas en el municipio de San Jorge. Piedra Azul Arriba, Piedra

Azul Centro, Piedra Azul Abajo (El Chirrión), Rodeo Pedrón, Barrio San Benito (La Isla), Barrio San Juan (Los Mangos) en San Rafael Oriente.

En general, los habitantes de estas comunidades se dedican a la agricultura de cultivos tradicionales, así como a trabajos esporádicos como jornaleros en algunos períodos del año.

La mayoría de los habitantes es propietaria del terreno donde viven, si bien, la mayoría de los agricultores no es dueño de la tierra que trabaja, siendo arrendatarios de la misma. Este hecho imposibilita que los agricultores accedan a créditos bancarios para mejorar sus explotaciones, ya que carecen de los avales necesarios para que se les concedan.

Los recursos económicos que poseen son muy escasos, muchas veces por debajo de los $80 mensuales, lo que les imposibilita acceder a algunos insumos necesarios y condiciona el acceso a la educación, ya que los niños tienen que trabajar para ayudar a la economía familiar.

La mayor parte de las viviendas está construida por bahareque, lámina y palma, sólo habiendo un porcentaje muy bajo de las mismas que tienen como materiales de construcción adobe o ladrillos de barro.

4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

4.1. Climatología

4.1.1. El clima en El Salvador

Desde el punto de vista climatológico, El Salvador se encuentra situado en la parte exterior del Cinturón Climático de los Trópicos, caracterizado por tener unas propiedades térmicas casi constantes durante todo el año y dos estaciones muy marcadas, una lluviosa y otra seca. Las precipitaciones se concentran casi exclusivamente durante la estación lluviosa, si bien, dentro de ella pueden aparecer grandes oscilaciones. Sus valores máximos suelen darse unas semanas después del paso del sol por su cenit.

La estación seca se presenta durante el semestre invernal que comprende los meses de noviembre a abril, presentándose las máximas temperaturas al final de la misma, en el mes de abril, antes del comienzo de la estación lluviosa.

Otra característica del clima en este país son los Alisios, vientos predominantes de rumbo aproximado NE, y los Nortes, que transportan aire frío procedente del Ártico hacia los trópicos. Se puede observar, también, un buen desarrollo del sistema que lleva aire del mar hacia tierra y sus zonas inmediatas.

Con los datos obtenidos a lo largo de más de 50 años se han podido establecer unas fechas promedio para el comienzo y el final de las dos estaciones, así como para los intervalos de transición que hay entre ellas (Tabla 4.1).

Tabla 4.1.- Duración aproximada de las estaciones.

Época del año	Principio	Final	Días
Estación seca	14 noviembre	19 abril	157
Transición seca-lluviosa	20 abril	20 mayo	31
Estación lluviosa	21 mayo	16 octubre	149
Transición lluviosa-seca	17 octubre	13 noviembre	28

En general, el país está sometido a las depresiones y a las tormentas tropicales. Nubes cumulonimbus creadas por convecciones intensas de aire causan fuertes lluvias de corta duración. El régimen anual de lluvia está determinado por el movimiento de los sistemas permanentes de altas presiones de las Bermudas y de la zona de Convergencia

Tropical, que se acercan a la costa de El Salvador en los meses de junio septiembre y produce los máximos de precipitación dentro de la estación lluviosa.

La lluvia no se comporta de manera homogénea en todo el país y presenta grandes variaciones de un lugar a otro y amplias oscilaciones a través del tiempo.

4.1.2. El clima en la vertiente sur del volcán de San Miguel.

Como el resto del país, la zona de estudio está dentro de la Región Climática de los Trópicos Semihúmedos. Según la clasificación climática de Köppen, se puede dividir, teniendo en cuenta su elevación respecto al nivel del mar, en tres zonas:

Sabana tropical caliente

Corresponde a la parte baja del zona de estudio. Agrupa las zonas situadas entre los 100 y 800 m de altura sobre el nivel del mar, abarcando el área comprendida desde la carretera del Litoral hasta las faldas del volcán de San Miguel, y las de la Laguna Seca del Pacayal, hasta los 800 m de altura.

Las temperaturas medias mensuales oscilan entre 25 y 29ºC, con una precipitación media superior a los 1.400 mm.

Sabana tropical calurosa

Se trata de áreas con elevaciones entre 800 y 1200 m. Corresponde a la franja limitada por estas cotas en el volcán de San Miguel y la parte más alta de la Laguna Seca del Pacayal.

En esta zona se registran temperaturas anuales de 19 a 21ºC, siendo la precipitación media anual de 1800 mm.

Clima tropical de las alturas

Este clima afecta a las elevaciones superiores a los 1200 m. Dentro del área de estudio correspondería a las zonas más altas del volcán de San Miguel.

Las variaciones de temperatura son de 16 a 19ºC, con escaso riesgo de heladas.

5. GEOLOLGÍA

En el presente capítulo se realiza una caracterización de la geología, tectónica y geomorfología tanto regional, para la República de El Salvador, como local, para la zona de estudio.

5.1. Marco geológico regional

Resultado de la subducción en dirección NE de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, se genera la cadena volcánica centroamericana que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica con una longitud de 1.100 Km., situándose El Salvador aproximadamente en la parte central. La compresión producida por la subducción genera un intenso fallamiento en todo el país y es, también, el origen de la acentuada actividad volcánica y sísmica. Por esta razón, la geología general del país se define por la masiva presencia de rocas volcánicas y su morfología por la alternancia de edificios volcánicos elevados sobre las planicies.

El Salvador es, desde el punto de vista geológico, un país extremadamente joven si se considera que una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocena y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando las de época pliocena. Los terrenos más antiguos son de edad cretácica y cubren aproximadamente un 5% del territorio salvadoreño. Únicamente estos últimos son de origen sedimentario marino, las demás rocas, con pocas excepciones, están originadas por fenómenos volcánicos. En algunos puntos aparecen, además, rocas intrusivas que pertenecen a la época miocena (terciarias).

A continuación se describen las principales formaciones que aparecen en El Salvador.

Rocas Sedimentarias

Se trata de una sucesión de rocas sedimentarias marinas, formada por rocas clásticas y calizas que sólo aparecen en el extremo NW cerca de Metapán, donde cubren un área aproximada de 200 km². Estos materiales han sido datados mediante fósiles y pertenecen principalmente al Albiense-Medio (Cretácico), aunque afloran también materiales del Jurásico.

Aparte de estas series marinas, en el país sólo se conocen rocas sedimentarias lacustres y fluviales que tienen extensiones muy limitadas. Se trata de productos piroclásticos

redepositados de menor importancia y algunos depósitos de diatomita y lignito de carácter calcáreo. Estos sedimentos lacustres y fluviales cuentan con intercalaciones de productos piroclásticos, lo que indica que son contemporáneos a la actividad volcánica joven.

También se encuentran aluviones recientes a lo largo de los ríos más importantes y en depresiones locales, sobre todo, en las planicies costeras de la parte suroeste y sureste donde cubren un área aproximada de 3.500 km².

Rocas Volcánicas

La mayor parte del territorio nacional está cubierta por rocas de origen volcánico de carácter riolítico a basáltico.

Al norte de los ríos Lempa y Torola afloran rocas de carácter ácido, se trata de productos piroclásticos que litológicamente se consideran de riolitas a dacitas.

Una gran parte de El Salvador está cubierta por una serie volcánica que consiste en una sucesión compuesta de andesitas a basaltos hasta aglomerados de carácter andesítico. El espesor de esta sucesión es mayor de 1.500 m. Estos tipos de rocas forman algunas regiones como la Sierra Tacuba, la Cordillera del Bálsamo, la Cordillera Jucuarán-Intipucá y la parte norte de Santa Ana.

Las formaciones volcánicas hasta aquí descritas se presentan siempre en forma de extensiones considerables, sin que haya sido posible reconocer los centros de actividad volcánica que produjeron estas series.

También existen en El Salvador formaciones volcánicas originadas por un vulcanismo individual, en las que es fácil localizar el centro de actividad. Se distinguen dos zonas volcánicas de este tipo:

- La primera, al sur de las montañas norteñas en forma de faja de volcanes individuales que atraviesa toda la República. A esta franja pertenecen, por ejemplo, el Volcán de Guazapa y el Volcán Cacahuatique. Éstos se caracterizan por su alto grado de erosión. Sus productos efusivos son lavas de carácter predominantemente basáltico y tobas con diferente grado de consolidación.

- La segunda zona de volcanes individuales se halla al Sur y se orienta paralelamente a la anterior. A esta faja pertenecen más de 50 volcanes, tales como: Laguna Verde, Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, Tecapa, San Miguel y Conchagua, algunos de los cuales todavía se encuentran activos. Existen también depresiones volcano-tectónicas, tales como los Lagos de Ilopango y Coatepeque. El carácter de las lavas originadas es basáltico y la mayoría de los productos piroclásticos son de carácter dacítico. También se conocen productos piroclásticos de erupciones lineares (fisurales) como los que se encuentran cerca de Zaragoza y Comalapa.

El vulcanismo Sur es más variado que el de la zona Norte, sin embargo, en ambas zonas, el tipo de estructura volcánica predominante es la de estrato-volcanes.

Rocas Intrusivas

En las montañas norteñas, cerca de Metapán y Chalatenango, se conocen rocas intrusivas de carácter granítico-diorítico. En el lugar de contacto de éstas últimas con las series sedimentarias marinas, existe un metamorfismo de contacto que puede ser observado en los niveles calcáreos.

Al sur, desde San Miguel hasta San Isidro, se encuentran afloramientos de carácter muy ácido. La característica principal de estos afloramientos es que corren paralelos a las fajas volcánicas y están conectados a yacimientos metalíferos subvolcánicos que se encuentran bajo las cubiertas basalto-andesíticas.

5.1.1. Elementos estratigráficos

En los últimos cincuenta años, diversos autores han descrito los materiales geológicos que forman el país. La secuencia litológica del mesozoico, el terciario y las unidades cuaternarias más recientes ha sido clasificada por Dürr (1960), Weisemann (1975), Weisemann et al (1978) y Weber (1979). En la Tabla 5.1 se muestran las diferentes unidades litológicas (Baxter,1984).

Tabla 5.1.- Unidades litológicas en El Salvador (Baxter, 1984).

CRONOLOGÍA	WIESEMANN et al. (1978)
Unidades sedimentarias terciarias-cuaternarias	FORMACIÓN SAN SALVADOR FORMACIÓN CUSCATLAN FORMACIÓN BÁLSAMO FORMACIÓN CHALATENANGO FORMACIÓN MORAZÁN
Unidades sedimentarias mesozoicas-terciarias	GRUPO VALLE DE ÁNGELES GRUPO YOJOA FORMACIÓN TODOS SANTOS-FORMACIÓN METAPÁN ESTRATOS DE METAPÁN

5.1.2. Historia geológica del Terciario-Cuaternario

La fase eruptiva ignimbrítica ha caracterizado el episodio final del vulcanismo del Terciario superior. Durante esta fase se depositaron grandes cubiertas piroclásticas, emitidas en su mayor parte a lo largo de fracturas y en menor proporción desde aparatos centrales, generándose, además, potentes depósitos de lahares. Los productos de esta fase son cartografiados como formación Bálsamo en el mapa geológico (E 1:100.000) de El Salvador, aflorando en la Cordillera Costera.

La emisión de grandes volúmenes de ignimbritas en un régimen distensivo dio origen al fallamiento con el consecuente hundimiento y formación de la fosa central (Plioceno-Pleistoceno), depresión estructural llamada por Williams y Meyer Abich (1953), graben, posteriormente (1955), fosa central o depresión central, y por Dengo (1968), "depresión de Nicaragua".

La formación Cuscatlán es producto de una fase posterior a la formación de la fosa, en la que tuvieron lugar la emisión de cubiertas piroclásticas desde centros ubicados en su interior, y formación de domos y aparatos volcánicos centrales. En esta formación también están comprendidos los depósitos lacustres y fluviales (originados a raíz de la erosión del material de la fosa) que se depositaron en cuencas con dirección W-E.

Los terrenos más recientes en el interior de la fosa, componentes de la formación San Salvador, son atribuibles a la actividad de los aparatos activos (Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, Usulután, San Miguel). Autores como Williams y Meyer-Abich (1953) y Weyl (1955) suponen que la depresión está asociada a unas fallas, a lo largo de las cuales, se alinean los centros eruptivos anteriormente citados. Se caracterizan por la presencia de lavas (basaltos, andesitas y dacitas) y piroclastos ácidos y básicos.

5.2. Marco geológico local

La geología del área estudiada, al igual que la del resto del país, está caracterizada por la presencia casi exclusiva de rocas volcánicas, procedentes de las erupciones de los volcanes Chaparrastique, Laguna Seca del Pacayal y Chambala.

El trabajo realizado en el área estuvo enfocado a la consecución de un mapa litológico del mismo. No se ha podido llegar a elaborar un mapa geológico más detallado del ya existente ante la imposibilidad de realizar los estudios necesarios para caracterizar con precisión las rocas y estructuras tectónicas que aparecen en el territorio.

La base de la que se partió fue el mapa geológico 1:100.000 realizado por la delegación alemana. De la misma manera, las descripciones de los diferentes materiales agrupados en "formaciones" fueron consultadas en el Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984).

La clasificación de las rocas aflorantes que se presenta en el Mapa Litológico (Mapa 5.1) está basada en la descripción que aparece en el léxico estratigráfico, si bien no coincide exactamente con la misma. En el nuevo mapa se ha realizado una alteración, como es la de individualizar el cerro de Chambala como una unidad a parte debido a las características litológicas que presenta y que van a hacer que ante los análisis e

integraciones para los que se va a utilizar este mapa, se comporte de una manera diferente a la “formación” en la que está incluido.

Todas las rocas observadas en el área de trabajo pertenecen a la Formación San Salvador, la cual consta de diversos miembros que se describen con posterioridad.

Dicha formación está compuesta por una secuencia de piroclastitas efusivas ácidas-básicas intercaladas (Wiesemann et al 1978); ubicada en una franja de rumbo ONO-ESE, aproximadamente. Estos materiales ocupan la depresión conocida como Fosa Central. Esta depresión, así como las fallas asociadas, se supone que se formaron en la cresta de un arco geoanticlinal. Los centros volcánicos están alineados a lo largo de estas fracturas.

Esta unidad está considerada de edad Pleistoceno Superior o Reciente.

La formación San Salvador está dividida en varios miembros, una parte de los cuales han sido identificados en la zona de trabajo. Son los siguientes:

s1.-

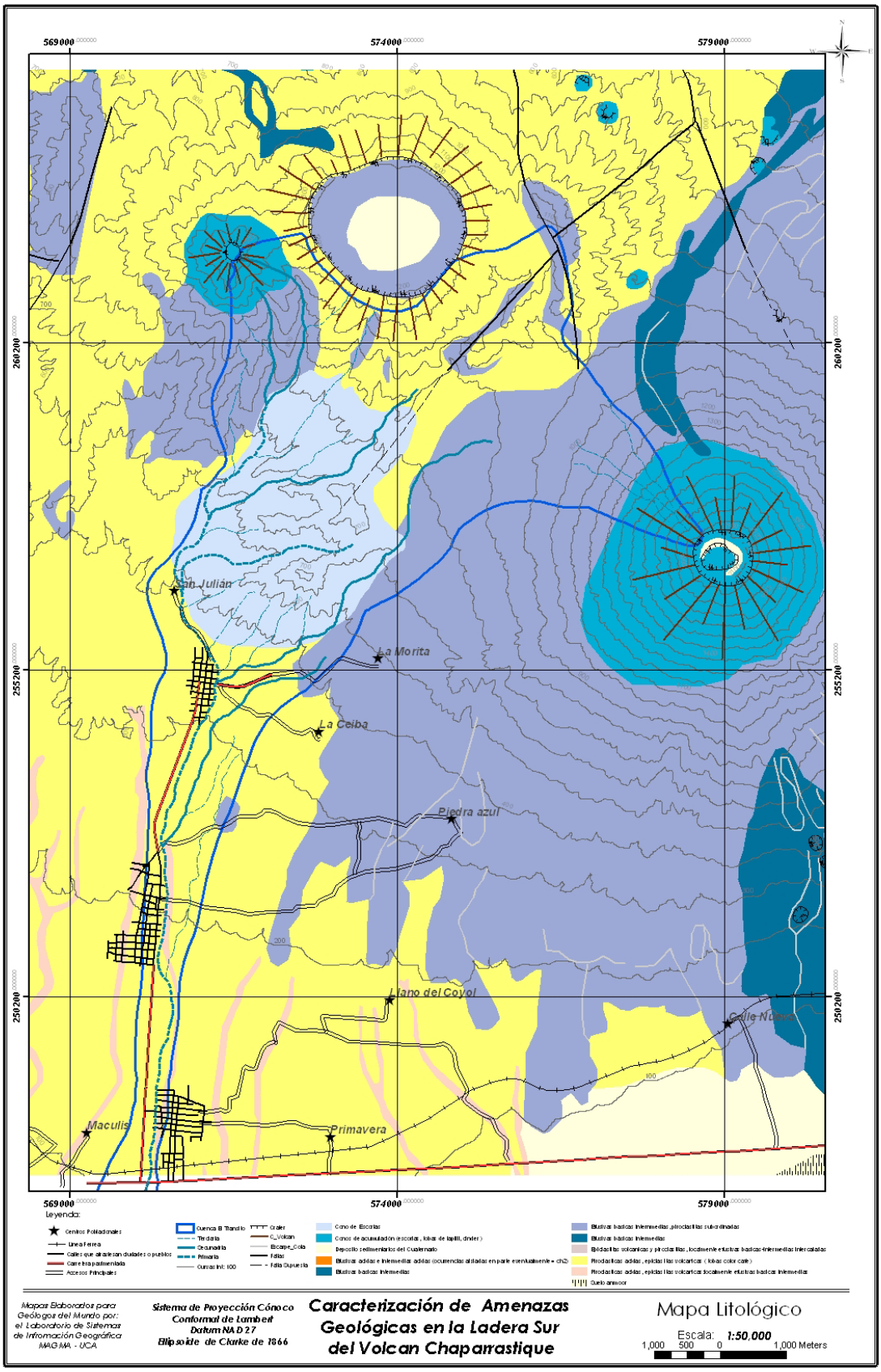
Foto 5.1: s1.

Wiesemann (1978) la define como una secuencia de prioclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas-intermedias. (Foto 5.1)

Se le atribuye una edad de entre 0’73 y 2’48 m.a., en la Época negativa de Matuyama.

En nuestra zona este miembro aparece en el fondo de las quebradas, por debajo de los 200 m y hasta que cortan a la carretera Litoral. No obstante, sólo se han podido observar en algunos puntos concretos, ya que se encuentra, en su mayor parte, cubierto por los sedimentos que arrastra la quebrada en la época de lluvias.

Se presentan como una alternancia de capas decimétricas compuestas por lapilli de color marrón claro grisáceo, arena fina limosa de color marrón oscuro y piroclastos de color negro o gris muy oscuro con tamaños de grano entre 3 y 5 mm. Esta última capa presenta un contacto neto con la superior. Toba


569000
574000
579000
260200
255200
250200
San Julián
La Morita
La Ceiba
Piedra azul
Llano del Coyol
Calle Nueva
Maculis
Primavera
Leyenda:
Centros Poblacionales
Linea Ferrea
Calles que atraviesan ciudades o pueblos
Carretera pavimentada
Accesos Principales
Cuenca El Titanilo
Tributaria
Secundaria
Primaria
Curvas Inf: 100
Crater
C_Volcan
Escarpe_Cola
Fallas
Falla Supuesta
Cono de Escorias
Conos de acumulación (escorias, lobas de lapilli, cinder)
Deposito sedimentarios del Cuaternario
Ignimbritas volcanicas y piroclastitas, localmente estructas basicas-intermedias intercalatas
Piroclasticas acidas, epiclastitas volcaricas (lobas color café)
Piroclasticas acidas, epiclastitas volcaricas localmente estructas basicas intermedias
Suelo arenoso
Mapas Elaborados para Geólogos del Mundo por: el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica MAGMA - UCA
Sistema de Proyección Cónoco Conformal de Lambert
Datum NAD 27
Elipsoide de Clarke de 1866
Caracterización de Amenazas Geológicas en la Ladera Sur del Volcan Chaparrastique
Mapa Litológico
Escala: 1:50,000
1,000 500 0 1,000 Meters

Mapa 5.1

s2.-

Foto 5.2: s2 en el cauce recubierto parcialmente de cuaternario.

Wiesemann (1978), la describe como una secuencia de rocas volcánicas básicas-intermedias, piroclastitas asociadas (Foto 5.2).

En nuestra zona correspondería a los afloramientos que sobre los 1400-1200 m y la parte baja del cono del volcán. Son coladas de rocas basálticas-andesíticas de color gris, entre las cuales aparecen unos piroclastos de color gris oscuro o rojizo de tamaño centimétrico, con una composición similar a la de la roca masiva. También se encuentra en la parte alta del volcán Laguna Seca del Pacayal.

s3'a.-

Wiesemann et al (1978), la describen como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (tobas color café) (Foto 5.3).

Foto 5.3: s3'a de la quebrada el Tránsito a la altura de la carretera Litoral

Ocupan la extensión que hay entre el miembro anterior y la carretera del litoral. Sólo han podido identificarse en los cortes existentes en los caminos o en los laterales de las quebradas. Son materiales de color marrón claro, con tamaño de grano arena gruesa-grava fina. En las zonas observadas se encuentran muy alteradas.

Se le estima una edad comprendida entre los 10.000 y 45.000 años

s5'a

Wiesermann et al (1978) la describe como una secuencia de rocas efusivas básicas-intermedias. Serían basaltos o basalto-andesitas (Foto 5.4).

Corresponderían a las coladas de lava emitidas por el volcán Chaparrastique en tiempos históricos (siglo XIX). En el área de estudio se encuentran cortando a la carretera que une San Jorge con Las Placitas.

Foto 5.4: s5'a. Basaltos vesiculares

Son rocas de color gris muy oscuro, casi negro. Con aspecto escoriáceo, o vesicular.

s5'b.-

Wiesermann et al (1978) lo describen como una acumulación de escorias, tobas de lapilli y Zinder (Foto 5.5).

Foto 5.5: s5'b en el cráter del volcán

Aparece en la parte alta del volcán de San Miguel, por encima, aproximadamente de los 1500 m. Se trata de un material de color marrón claro, muy heterométrico, donde aparecen bloques métricos dentro de una matriz arenosa. Se le puede considerar un conglomerado compuesto por clastos de tamaño centimétrico a métrico embebidos en una matriz de cenizas y/o lapilli. En esta zona se pueden distinguir varios tipos de afloramiento. Además de lo anteriormente descrito existen zonas de acumulación de material granular de tamaño de grano milimétrico de color gris oscuro o rojizo. También existen zonas de material de color marrón claro con laminación cruzada interna, interpretados como producidos por eventos de flujos piroclásticos.

Q'f.-

Son gravas, arenas y limos de origen eluvial y coluvial. Su presencia se restringe al interior de las calderas de los volcanes de San Miguel y en la de la Laguna Seca del Pacayal. En este último caso cubre la totalidad del fondo de la misma (Foto 5.6).

Foto 5.6: Desprendimientos interiores del cráter

En la Laguna Seca de El Pacayal, estos sedimentos provienen de los procesos de ladera que se dan en el interior de la caldera y que, cuando existió agua en su fondo, se extendieron homogéneamente por el mismo. En la actualidad se observa una acumulación de materiales en forma de abanico debidos a los deslaves que se producen periódicamente en la parte interior del cráter.

En el caso de El Chaparrastique, estos sedimentos se encuentran sobre las mesetas que existen alrededor del agujero central del cráter y provienen del desmantelamiento de las laderas internas del cráter del volcán, siendo redistribuidos por el agua de escorrentía durante la época de lluvias.

Cono de escorias (lapilli escoriáceo).-

Esta formación está restringida al cerro de Chambala, por presentar unas características particulares que van a hacer que se comporte de diferente manera que los materiales que tiene alrededor en la época de lluvias.

Foto 5.7: Material escoriáceo del cerro de Chambala

Se trata de piroclastos de color gris oscuro o rojizos, de tamaño de grano lapilli. Presentan una estructura masiva, si bien parece observarse una laminación muy grosera definida por los granos de mayor tamaño (Foto 5.7).

No presentan ninguna cementación, debiendo su estabilidad a su alto grado de rozamiento interno. No obstante, durante la época de lluvias, cuando se saturan en agua se llegan a fluidificar dando lugar a deslaves e incluso a pequeños lahares que corren dentro de las quebradas, hasta zonas con menos inclinación, donde pierden el agua y forman unos depósitos lobulares en el fondo de las mismas-

5.3. Tectónica

5.3.1. Tectónica regional

El origen de la intensa fracturación existente en la zona de estudio hay que buscarlo en las características geodinámicas de esta región geológica. Como se ha explicado anteriormente, éstas corresponden a las de una zona de convergencia entre dos placas, concretamente a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe.

La fracturación de la roca se produce por la compresión que sufren los materiales debido a la intensa presión que supone la fricción de una placa al desplazarse bajo la otra. La dirección de máxima deformación coincidirá aproximadamente con la dirección perpendicular a la fosa tectónica del Pacífico, donde subduce la placa de Cocos, produciendo fracturas de dirección perpendicular a este desplazamiento y planos de fracturación oblicuos. Otras direcciones de deformación importantes corresponden a la de las fallas transformantes, normalmente paralelas a la dirección del movimiento y que acompañan y acomodan el movimiento relativo de los diferentes bloques.

En superficie, una gran diversidad de fallas se producirán por respuesta frágil de la roca a los esfuerzos producidos por el movimiento de las fallas principales.

Se conocen tres sistemas de debilidad tectónica, siendo el más importante, el sistema tectónico con dirección E-W, caracterizado por desplazamientos verticales considerables que atraviesan la República. Estos desplazamientos darán origen a la

formación del graben o fosa tectónica. Se reconocen cinco ejes principales dentro de este sistema:

- Primer eje. Forma el límite sur de las montañas norteñas.

- Segundo eje. Se caracteriza por un vulcanismo individual apagado en la parte norte del país.

- Tercer eje. Se ubica al sur del segundo eje. Es el más prominente, con dislocaciones tectónicas (la más importante de ellas atraviesa el país, la fosa central) y con un vulcanismo individual joven, en parte todavía activo. También se encuentran depresiones volcano-tectónicas y cúpulas de lava. Los eventos sísmicos que aún ocurren en esta zona, indican que los movimientos tectónicos continúan.

- Cuarto eje. Se localiza en el Océano Pacífico a una distancia de 25 Km. de la costa salvadoreña y se caracteriza por una actividad sísmica frecuente.

- Quinto eje. Se encuentra al sur del anterior, formando una fosa marina que corre paralela a la costa salvadoreña y muestra cierta actividad sísmica. Existen elevaciones de forma cónica que se levantan desde más de 3.000 metros de profundidad hasta el nivel del mar, considerándose éstas como volcanes.

La segunda dirección de debilidad tectónica más importante es NW-SE, con un sistema de fallas que algunas veces tienden a nortearse. Estas fallas se extienden a lo largo del país y, en ocasiones, aparecen como fisuras y alineamientos de eventos eruptivos, como el complejo volcánico de Santa Ana, San Salvador, San Vicente, Tecapa y San Miguel.

El tercer sistema, de fallas subordinadas, presenta una dirección NE-SW. Es menos evidente que los anteriores y se detecta principalmente en el centro y este de El Salvador.

La localización de los mayores volcanes refleja, aparentemente, lugares de intersección entre las dos direcciones principales. Volcanes tales como San Vicente, Tecapa, San Salvador, Usulután y San Miguel yacen en el límite sur del graben central, donde existe un control tectónico debido a las fallas de dirección NW-SE.

5.3.2. Tectónica local

Dentro del esquema de los cinco ejes, anteriormente descrito, que determinan la estructura tectónica de El Salvador, el volcán de San Miguel estaría situado en el tercero. El edificio volcánico se eleva aislado en el lado este de la Cadena Volcánica al oriente del río Lempa. Está ubicado en la parte sur del Graben Salvadoreño Principal, el cual se encuentra limitado, por la parte meridional, por un bloque de montaña volcánica

que aflora puntualmente ya que se encuentra en su mayor parte cubierto por aluviones de la planicie costera. Al norte, el graben está limitado con la montaña volcánica más antigua de la zona (Chinameca), a través de una estructura de dislocación que se dispone desde Lolotique y Moncagua hasta el sureste cuyo trazo se pierde a unos 3 Km al norte de la ciudad de San Miguel.

Entre las bocas del volcán situadas, una al suroeste y la otra al noroeste, se puede establecer una línea que pasaría por el cráter situado en la cima del edificio. Esta línea parece definir una ruptura que sigue este sentido. Esta línea es el elemento estructural más reciente y está relacionada con la falla que atraviesa los volcanes de Santa Ana, San Salvador, Volcán Ircuapa, San Vicente y Tecapa.

A parte de la fractura mencionada y de dirección suroeste-noroeste existen un conjunto de grietas radiales que atraviesan el volcán según distintos rumbos. Estas grietas son las que han definido el trazado preferente de las coladas de lava que se han dispuesto simétricamente alrededor del pie del volcán. Únicamente existe una ruptura en la forma tronco-cónica del edificio en el flanco este sugiere la existencia de un antiguo y más bajo cono, alrededor a la actual forma.

El cráter del volcán se encuentra derrumbado por las continuas caídas, a lo largo de rupturas concéntricas, de bloques y material. La caída del material, en parte, está acelerada por la actividad fumarólica que agrava los procesos de alteración del mismo, reduciendo su cohesión.

5.4. Geomorfología y relieve

Anexo. Mapa 6

Las diferentes formas del terreno son el resultado de la interacción de los procesos geológicos internos y los externos. En líneas generales, los primeros son los formadores del relieve, mientras que los segundos son los que van a proceder al desmantelamiento de las formas creadas por los procesos geológicos internos.

El relieve va a condicionar el tipo de procesos que pueden actuar sobre él, así como su intensidad. Es el que va a controlar factores como las precipitaciones, red de drenaje o formación de suelo. Se trata, por tanto, de un elemento de suma importancia en el análisis de los procesos de erosión y de inundación.

En el presente apartado se hace una descripción de las seis unidades geomorfológicas y relieves asociados en los que se encuentra dividido el país, así como una caracterización de la zona de estudio.

5.4.1. Contexto regional

En función del origen geológico estructural, determinado por los procesos tectónicos regionales que afectan al conjunto de América Central, se diferencian las siguientes unidades: planicie costera, cadena costera, fosa central, cadena interior, fosa interior y montaña frontera. Estas unidades se caracterizan por las diferencias litológicas y estructurales, explicadas en los apartados correspondientes.

Planicie Costera

La Planicie Costera comprende dos zonas ubicadas en el oeste y en el centro del país, abarcando ambas algo más del 12% del territorio nacional. En lo que respecta a su petrografía y origen, no existe uniformidad alguna. Los ríos que descienden de las regiones montañosas, situadas al norte de esta unidad, transportan anualmente hacia el mar un gran volumen de agua de lluvia, lo cual ha contribuido decisivamente a la formación de la planicie, con el aporte de carga en suspensión que es depositada en estas áreas.

Cadena costera

La cadena costera o cadena volcánica, constituida por las cordilleras del Bálsamo y Jucuarán, cubre igualmente un 12% de la superficie salvadoreña. La altura máxima de esta unidad es de 1.200 m y su ancho varía de 15 a 20km. Petrográficamente está formada por aglomerados volcánicos gruesos y densos, intercalados por niveles delgados de lava andesítica y estratos de tobas e ignimbritas, integrando una serie con un espesor de 1.500m.

Fosa Central

La Fosa Central comprende un 20% de la superficie del país. Se extiende a lo largo de éste con un rumbo WNW-ESE, limitada al norte y al sur por escarpes de diversas alturas. Su ancho varía entre 10 y 30 km y su morfología está ligada estrechamente a las condiciones geológicas de la misma. Los desplazamientos tectónicos de la Fosa Central han ocurrido a lo largo del tiempo, variando de 1 a 1.5 km, asumiéndose que en los lugares de mayor altura, los desplazamientos han debido ser muy intensos.

En lugares como San Salvador o Usulután, el ensanchamiento de la fosa es bastante visible. Los cuatro plegamientos de la Cadena Costera están estrechamente conectados con los grandes macizos volcánicos de la Fosa Central, que constituyen los estratovolcanes. En esta franja volcánica se encuentran asociados los volcanes de Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, volcanes de la Sierra de Tecapa-

Chinameca y San Miguel. La intensa actividad eruptiva reciente ha dado lugar a la formación de estos edificios volcánicos, la mayoría de ellos con laderas inestables, formados por materiales volcánicos jóvenes y poco consolidados. Esto hace que al encontrarse sometidos a la continua acción erosiva de los agentes geológicos externos, especialmente precipitaciones muy intensas durante el período de invierno, y a la acción continua de los agentes geológicos internos, conformen unas unidades de relieve muy vulnerables.

Petrográficamente están formados por materiales piroclásticos y lavas. El espesor de estos materiales varía de 400 m a 800 m.

Cadena interior

La cadena interior abarca un 20% del país. Al oeste limita con la fosa central y la fosa interior. Al este, se une con la montaña fronteriza por la ausencia de la fosa interior en esta zona. Su altura oscila entre 700 y 1000 m.s.n.m. Está formada aproximadamente por diez plegamientos y petrográficamente está compuesta por aglomerados volcánicos. Se trata de una unidad formada por volcanes geológicamente inactivos o apagados y bastante erosionados, como el Sihuatpeque, el Guazapa o el Cacahuatique.

La fosa interior

La fosa interior es la unidad geomorfológica más pequeña del país, ocupando un 5% de su territorio. Situada al NE, cuenta con una longitud de 70km. Desde el punto de vista morfológico, su extremo oeste es una planicie rellena de material epiclástico. El extremo este es menos pronunciado y está constituido por tobas.

Montaña fronteriza

La montaña fronteriza comprende un 25% del país. Está constituida por dos elementos estructurales, bastante heterogéneos geológicamente, formaciones de Metapán y Chalatenango, en parte formada por rocas intrusivas. Las alturas máximas de la Montaña Fronteriza oscilan entre 1.500 y 2.500 m.s.n.m., abarcando grandes extensiones.

5.4.2. Contexto local

La característica geomorfológica del área de estudio es la presencia de edificios volcánicos. Son ellos lo que van a condicionar la geomorfología y las formas existentes en la zona.

El edificio volcánico más importante es el que corresponde al volcán de San Miguel o Chaparrastique, con 2130 msnm. Una corta distancia hacia el noroeste se encuentra la Laguna Seca del Pacayal, caldera volcánica casi perfecta con 1315 msnm.

A parte de estos dos edificios volcánicos que perfectamente conservados, también existen en la zona otras dos elevaciones de menor importancia y que parecen ser conos volcánicos en un avanzado estado de desintegración, el Cerro de Chambala y la Montaña Lacayo.

Todos estos relieves presentan unas incisiones, más o menos importantes, producidas por las quebradas que drenan las aguas superficiales de escorrentía, que en época de lluvia, bajan de las mismas. Su grado de incisión va a depender de la naturaleza y tipo de material por el cual discurre, siendo más profundas sobre materiales sueltos que sobre consolidados.

También se han identificado, sobre todo en el interior de la Laguna Seca de El Pacayal, una serie de deslizamientos o deslaves que afectan a las laderas más inclinadas y que forman acumulaciones en forma de pequeños abanicos en el interior de la caldera de éste volcán.

Por último, cabe destacar ya en la zona más alejada de los volcanes y alrededor de la carretera del Litoral, la presencia de una zona llana que llega hasta los cerros situados en la costa. Esta llanura es aprovechada en la actualidad como zona de cultivo de caña de azúcar y como pastizal para el ganado.

5.4.2.1. Unidades geomorfológicas

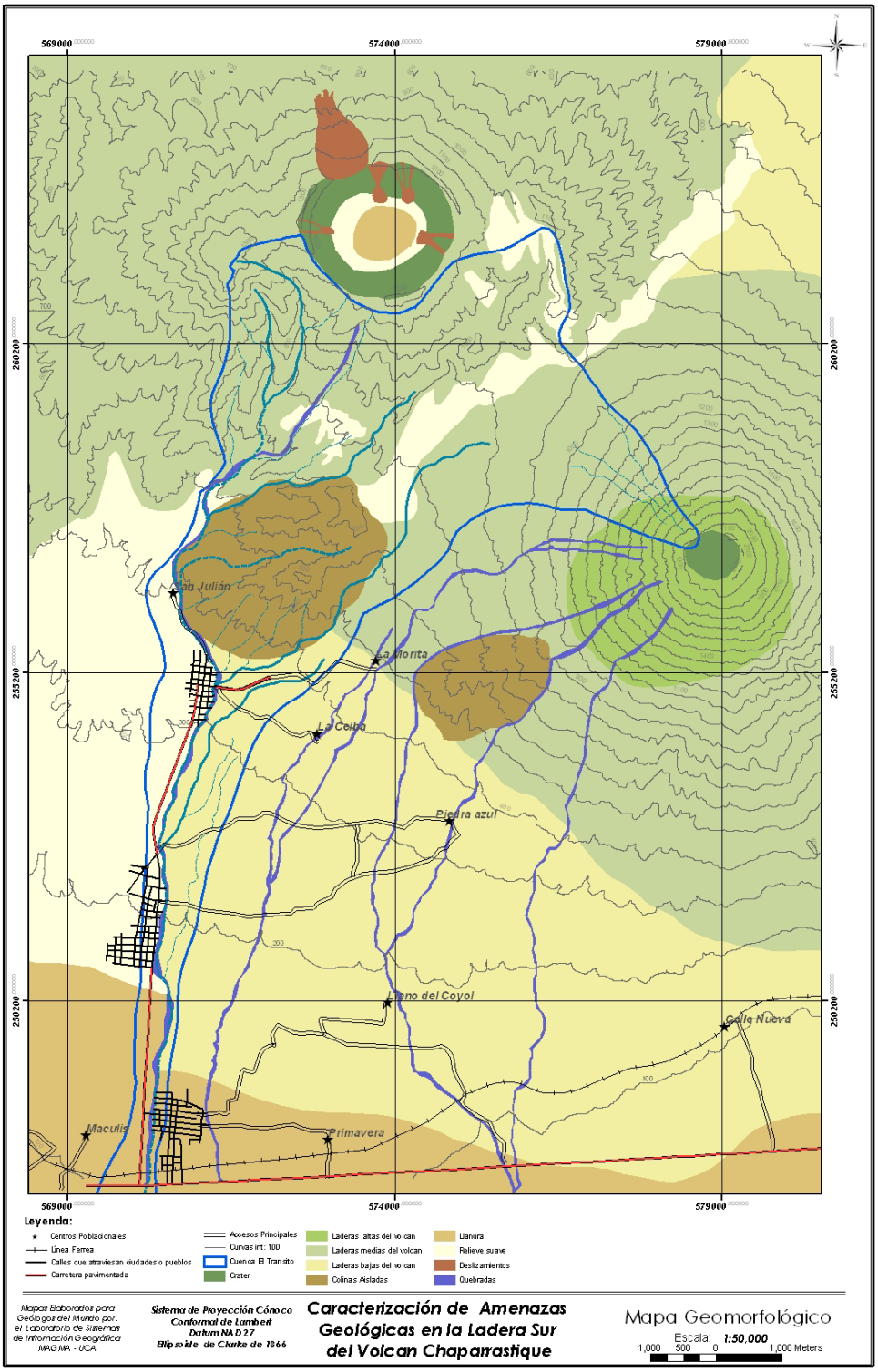
En base al relieve existente en la zona se han definido nueve unidades geomorfológicas, tal como se muestra en el mapa geomorfológico (Mapa 5.2)

- **Colinas aisladas**: En esta categoría se han señalado los cerros de Montaña Lacayo y Chambala. Se consideran volcanes extintos en proceso de desmantelamiento y que están en parte tapados por los materiales provenientes de las erupciones de los dos volcanes importantes que existen. Se trata de relieves positivos que tienen una importante red de quebradas encajadas, que los drenan y sirven como vía de evacuación de los sedimentos resultado de su erosión. Por lo observado en el campo, estarías formados por material piroclástico de tamaño lapilli y de composición basalto-andesítica.

- **Cráter:**: Corresponde a los dos cráteres de los volcanes de la zona. Son depresiones con paredes casi verticales donde se producen inestabilidades que van rellenando el fondo de las mismas. En el caso del de San Miguel hay que resaltar la presencia de fumarolas en su interior, lo que hace que las rocas del cráter se debiliten con mayor rapidez y se produzcan colapsos que van rellenando el conducto interior por donde salen los productos volcánicos cuando se producen erupciones.

- **Relieve suave**: Con esta denominación se ha tratado de distinguir las zonas situadas en las laderas del volcán Laguna Seca del Pacayal con una pendiente

inferior a la que domina, lugares donde se sitúan los asentamientos humanos que hay en la zona. También se ha delimitado una zona en el interior de su cráter entre la llanura del fondo y los escarpes de sus paredes. Así mismo, se le ha dado esta denominación al área occidental de la quebrada de El Tránsito desde la altura del cerro de Chambala hasta la salida de la población de San Rafael Oriente y la zona donde se solapan las laderas de los dos volcanes.



Mapa 5.2

- **Deslizamientos**: Se han incluido los deslaves importantes que se han podido identificar en la zona. Están restringidos a la parte interna de la caldera de la Laguna Seca del Pacayal. Son formas donde se pueden observar las cabeceras, canales y conos de deyección de los mismos con relativa claridad. Todos ellos, a excepción de una importante cicatriz de cabecera en la ladera norte del mismo, se encuentran dentro de la caldera.

- **Quebradas**: Esta unidad corresponde a las quebradas más importantes existentes. Se trata de las quebradas El Tránsito, La Palmera, La Piedrita y La Piedrona que se unen para dar la de El Llano, que a su vez se une aguas abajo con la del Coyolito para formar la de Piedra Pacha. A ellas va a parar toda una red de quebradas menores que recogen el agua y los sedimentos sueltos que existan en la zona. En todas ellas se producen los fenómenos de erosión y transporte más importantes identificados en todo el área estudiada. Presentan unos cauces rectilíneos, con una fuerte pendiente en su parte alta-intermedia, que luego disminuye hacia la zona baja, dando lugar a depósitos y a la presencia de mayor cantidad de material en su lecho. Cabe destacar que en su parte baja existe un ensanchamiento del cauce con una importante sedimentación de material arenoso. Este material no llega a colmatar el cauce debido a la intensa actividad extractiva de arena existente en las mismas. Otra característica importante a tener en cuenta en la zona más ancha de la quebrada es que se produce periódicamente un cambio del cauce de la misma, ya que periódicamente existen avenidas con la suficiente energía capaces de modificarlo.

- **Llanura**: Comprende la parte más al sur de la zona de trabajo. Se caracteriza por ser la zona con menor pendiente del lugar. Comprendería el área situada hacia el sur de la línea que marca la parte norte del pueblo de El Tránsito y, aproximadamente, la carretera del litoral.

Debido a que es el relieve más importante existente en la zona, en el volcán de San Miguel se han distinguido tres unidades:

- **Ladera alta del volcán**: Correspondería al área abarcada desde la cota mil hasta la cima, aproximadamente. Se caracteriza por tener las mayores pendientes, superiores al 30% y por estar casi totalmente sin vegetación, con la existencia de materiales sueltos y de roca más o menos compactada, dependiendo de su naturaleza y composición. Está surcada por numerosas quebradas que nacen en esta zona, si bien una parte de ellas sólo recorre unos pocos centenares de metros para luego desaparecer. Los procesos dominantes son los de erosión y trasporte. Cabe destacar la no presencia de material erosionado dentro del cauce de las quebradas.

- **Ladera media del volcán**: Su cota más baja estaría sobre los 300 msnm y la más alta correspondería al límite inferior de la unidad anterior. En esta zona la pendiente estaría comprendida entre el 10 y 30%. Es donde tiene lugar el transporte de los materiales provenientes de la parte alta, no obstante, en las zonas favorables de pérdida de pendiente o recodos, se observa una

sedimentación pequeña de los materiales más gruesos. Cabe resaltar la presencia de saltos o roturas de pendiente dentro de los cauces en esta zona, que llegan a tener varias decenas de metros de altura.

- **Ladera baja del volcán**: Estaría comprendida entre los 100 y 300 msnm, con pendientes menores a 10%. En esta zona predomina la sedimentación sobre los demás procesos, con un ensanchamiento importante de los cauces. Las quebradas transcurren sobre material poco consolidado, por lo que se encajan dando lugar a márgenes casi verticales, por lo que presentan una alta actividad de derrumbes, añadiéndose este material al que ya transportaba desde las partes más altas. En estas quebradas no llega a darse una colmatación de las mismas por la importante extracción de material para la construcción realizada.

6. HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL

Las redes de drenaje son la manifestación de la escorrentía superficial concentrada y jerarquizada en cauces. La arroyada concentrada y la jerarquización implican un proceso dinámico, ya que requieren del movimiento de las aguas y su concentración progresiva hacia colectores, cuyas dimensiones son proporcionales al volumen de escorrentía generado. Este proceso dinámico depende de la forma como interactúan numerosos factores: la alimentación hídrica, que incide con intensidades altamente variables; la respuesta del suelo ante estas precipitaciones, condicionadas por sus características intrínsecas y fisiográficas; la vegetación, litología, tectónica, factores antrópicos, etc.

La influencia de todos estos factores configura el diseño de la red fluvial cuyos elementos constituyentes pueden cuantificarse y clasificarse.

A continuación se exponen los métodos de análisis más usuales para el estudio del diseño de las redes fluviales, divididos en caracteres cualitativos y cuantitativos, es decir, la morfología y la morfometría de la red de drenaje para la cuenca objeto de estudio.

6.1. Delimitación de la subcuenca hidrográfica

La subcuenca de la quebrada de El Tránsito tiene su cabecera en los cráteres de los volcanes de San Miguel y Laguna Seca del Pacayal. En el primero estaría orientada hacia en W y en el segundo hacia el sur. Posteriormente recibe las quebradas que desaguan el cerro de Chambala y, manteniendo su dirección hacia el sur, pasa por los

pueblos de San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito, en su camino hacia el río Grande de San Miguel.

6.2. Morfología de la red de drenaje. Caracteres cualitativos de la red de drenaje

Los caracteres cualitativos vienen a definir la morfología de la subcuenca o algunos aspectos de ésta.

Tipología de la red de drenaje

Para caracterizar la tipología de la red de drenaje quizás es necesario definir en que punto podríamos considerar el inicio del cauce y cual consideraríamos como cauce principal.

Aunque existen diferentes definiciones, ninguna llega a aportar una idea exacta sobre el punto exacto donde podemos considerar el inicio de un cauce. Así que la precisión queda condicionada a la "agudeza visual" del investigador, su experiencia, y a la escala y calidad de la información manejada. Una de las definiciones mas extendidas es la que toma como punto de origen del cauce, la divisoria de aguas.

En cuanto a la longitud del cauce principal, existen principalmente dos criterios:

a) criterio topográfico: aquel cuya cabecera alcanza la cota mas elevada,
b) criterio de longitud: aquel cuya cabecera se considera que inicia en el lugar mas alejado del nivel de base.

Para el estudio que nos ocupa se ha elegido el criterio de longitud por el cual se considera que el cauce principal se inicia en el punto mas alejado del nivel de base.

Cauce principal Quebrada el Tránsito	
Criterio topográfico	Criterio de longitud
18 Km.	19.1 Km.

Así pues mientras otros trabajos consideran el inicio del cauce en la divisoria de aguas de el cerro El Limbo, en este trabajo se consideró el inicio en la divisoria de el cerro Cimarrón. Es claro que esto puede llevar a disparidad en los resultados pero consideramos que al abarcar el cauce mas largo estamos también teniendo en cuenta

los aportes sedimentarios que se incorporan en el trayecto mas largo y que afectan a las partes bajas de la quebrada.

La red hidráulica que surge del volcán y se desliza por la ladera oeste no esta muy bien definida y consiste en una serie de cárcavas de alta dinámica que se pierden a medida que las quebradas llegan a cotas topográficas bajas. De esta manera es difícil establecer un cauce continuo que vaya a desembocar a la red principal mejor definida. La tipología de esta red es radial a lo largo del cono del volcán.

La red que nace en el Pacayal, tiene una estructura dendrítica definida por diversas quebradas que van a unirse a la de El Tránsito como son: Qda. Las Piletas y Quebrada San Jorge, La Florida, Joya Grande, Mar y Cielo. Estas quebradas, actúan como calle a su paso por el Cantón Chambala. Las comunidades de este cantón se ven afectadas en invierno por las avenidas que se llevan el material del lecho y hacen dificultoso el transporte y la circulación a través de él. Para apaliar la falta de material que las corrientes se llevan, lo que hacen es rellenar las cárcavas que se generan con material del bordo de la quebrada con lo que aceleran la erosión de los taludes que defienden las viviendas colindantes. Durante el trabajo de campo se pudo comprobar como rellenaban dichas cárcavas agarrando material de una borda en la cual estaba asentada la escuela del caserío (Foto 6.2).

Foto 6.2: Reparación de la quebrada agarrando material del bordo

Características del cauce principal, tipo de lecho y márgenes.

Sinuosidad

Determinado el cauce principal de la cuenca, su sinuosidad puede revelarnos caracteres, tanto históricos como actuales, de la fuerza de la acción lineal a lo largo de su recorrido.

El cálculo de la sinuosidad propuesto por Shumm (1963) se obtiene relacionando la longitud del cauce con la longitud máxima del valle que lo forma.

Normalmente, en áreas de montaña, la longitud media del valle y la longitud del cauce principal coinciden, lo que nos lleva a obtener un índice de sinuosidad hidráulica en las quebradas igual o escasamente superior a uno, dado que las mayores pendientes dan lugar a bajas sinuosidades.

El índice obtenido para la sinuosidad es útil sólo para su clasificación. Por esta razón, y dado que define una cualidad tipológica de la cuenca centrada en su cauce principal, se incluye entre las variables cualitativas.

Cauce principal Quebrada el Tránsito	
Sinuosidad	1.07

Para clasificar este parámetro dentro de los diversos cauces fluviales propuestos por Schumm (1963) nos encontramos que pertenece a los que él denomina canales rectilíneos. Según la modificación que introduce Morisawa (1985), teniendo en cuenta, junto con el índice de sinuosidad, los valores de anchura y profundidad, e información y matices respecto a la tipología del cauce, se trata de un canal sinuoso.

Los canales sinuosos, según Morisawa, suelen llevar carga de todo tipo, siendo frecuente tanto el ensanchamiento como la incisión del cauce. Aquí cabría especificar que el origen de material proviene de un estrato volcán que está formado por capas de piroclastos y coladas de lava de tipo basalto-andesítico. Por lo tanto, el tamaño de grano del material que se extrae de las laderas va a venir condicionado por el tamaño de los piroclastos ya existentes y por los procesos dinámicos que se van a producir, como el descalce de grandes bloques de basalto al desmantelarse los fragmentos no consolidados de los piroclastos.

Hay que tener en cuenta que el índice de sinuosidad obtenido es resultado de mediciones del cauce principal total. Es necesario tener en cuenta los tramos en los que se produce una sinuosidad diferente, puesto que estos cambios son indicativos de variaciones en las condiciones topográficas, litológicas o estructurales.

Por otro lado, atendiendo a las diversas tipologías de lechos encontrados, en función del sustrato en que se desarrollan, las características del canal varían entre predominio de material fino y predominio de grandes cantos, cuyo tamaño y peso revelan una mayor dificultad para ser movidos. Entre ambos tipos existe una gran variedad de tamaño de partículas, además de la posibilidad de presentarse el lecho en roca viva.

El área de una cuenca experimenta procesos erosivos más intensos cuanto mayor son los tamaños de las partículas de su lecho, aunque éstas se muevan con mayor dificultad y a intervalos de tiempo más largos.

La cuenca de el Tránsito se podría dividir en tres partes: parte alta, parte media y parte baja. Cada una de las tres desarrolla una dinámica diferente debido a sus características de pendiente, anchura y material que arrastran.

Las cabeceras de las quebradas que nacen en el Pacayal son densamente vegetadas por cafetales lo que ayuda en la retención de la escorrentía, la cual sería bastante grande debido a la pendiente de entre 30º-40º de la zona.

En estas partes hay presencia de bloques de basalto-andesita métricos en la quebrada y también una cantidad considerable de pequeños desprendimientos debido al material

inconsistente de los márgenes (normalmente escoria). Como ya se dijo, la pendiente es alta y la erosión importante. El lecho es estrecho y encajado.

La parte media por donde discurre el cauce de la quebrada tiene una pendiente de 15º-30º, el lecho no se encuentra tan encajado y no hay presencia de bloques de basalto-andesita lo que indica que la fuerza del agua en estos puntos no tiene suficiente poder para seguir arrastrando esos bloques. La mayoría de viviendas empiezan a aparecer en esta zona y la gente usa la quebrada como calle. Para que esta pueda ser transitada la gente rellena las cárcavas que se generan debido a las lluvias con material del bordo lo que genera mayor inestabilidad de los taludes.

En la parte baja, el lecho se ensancha hasta llegar a las 80 metros y el aporte de material es arena gruesa que rellena las partes llanas. Aquí la pendiente es inferior a 8º y se podría definir claramente como una zona de inundación.

Con lluvias intensas baja un gran volumen de agua que afecta los márgenes erosionándolos, por lo cual hay un gran interés en seguir construyendo muros y obras gavionadas a lo largo de la parte baja de la quebrada que es donde se concentra la mayor parte de los habitantes de los municipios de San Jorge, San Rafael Oriente y el Tránsito. La arena que se deposita en el lecho es aprovechada por la gente y recogida para su utilización en la construcción. Esta arena removida adecuadamente seria favorable para la dinámica de la quebrada; el problema es que esta arena esta siendo removida de la zona próxima a los márgenes, a veces en lugares donde hay construidas obras de mitigación, provocando un socavamiento de la base y acortando la vida útil de los gaviones o muros (Foto 6.3).

Foto 6.3:Obras gavionadas para la protección de las bordas

6.3. Morfometría de la red de drenaje. Caracteres cuantitativos de la red de drenaje

La morfometría de la red de drenaje establece una serie de parámetros geométricos de la cuenca en tanto a su forma y constitución que permiten identificar caracteres

cuantitativos de la misma. Para el análisis morfométrico, Strahler toma la cuenca de drenaje como un sistema geométrico plano, considerando, en principio, las longitudes de los cauces (valor unidimensional) y la superficie de las cuencas (valor bidimensional). Teniendo en cuenta esta consideración se tiene que aclarar que el valor de las longitudes cartográficas puede diferir de la real cuanto mayor sea la pendiente por la que discurre el cauce. Dado que la pendiente media por la que discurre la Quebrada de el Tránsito es de el 5%, el error se puede despreciar.

La red de drenaje de la cuenca de el Tránsito, tiene una dinámica muy activa, y como se explicó en el apartado dedicado a la geomorfología, los cursos de estas quebradas pueden variar a lo largo del tiempo sobretodo en las zonas donde hay menor encajamiento de las mismas.

Características físicas

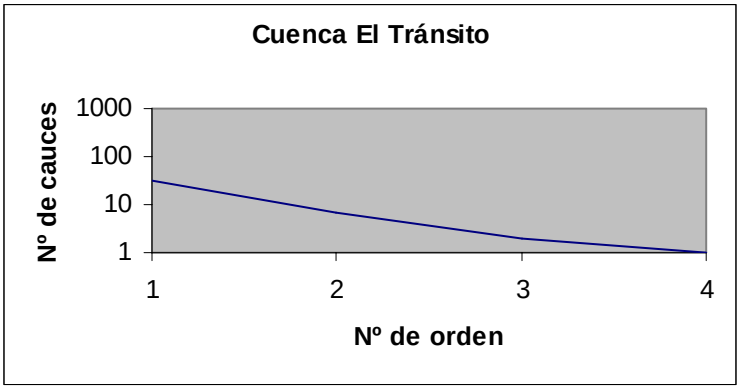
Las principales característica físicas que van a ser utilizadas para el análisis morfométrico de la cuenca de el Tránsito y el cálculo de sus parámetros, se definen en la siguiente tabla:

PARÁMETRO	VALOR
Área (km^2)	43.1
Perímetro (m)	48735
Elevación máxima (m)	2100
Elevación mínima (m)	100
Desnivel máximo (m)	2000
Longitud del cauce principal (m)	19105
Diferencia máxima de elevación en el cauce principal (m)	960
Número de canales de orden 4	1
Número de canales de orden 3	2
Número de canales de orden 2	7
Número de canales de orden 1	32
Longitud media de canales de orden 4 (m)	10121
Longitud media de canales de orden 3 (m)	3282
Longitud media de canales de orden 2 (m)	2177
Longitud media de canales de orden 1 (m)	1257
Suma de la longitud total de todos los órdenes (m)	70873
Longitud máxima del valle (m)	17785

Relación de bifurcación

Para obtener la relación de bifurcación es necesario realizar la jerarquización de la cuenca. Eso quiere decir clasificar los cauces de la cuenca en segmentos para aplicarles luego un orden determinado. Pese a existir varias maneras de analizar la bifurcación de la cuenca, la mas extendida, y utilizada en este trabajo, es la propuesta por Strahler (1964): “Se entiende que un segmento de cauce es de primer orden cuando dicho

segmento inicia la red de drenaje y no recibe cauce tributario. Cuando confluye con otro segmento de primer orden, se origina un segmento de segundo orden, cuyo orden jerárquico se mantiene si recibe otro segmento de primer orden; en cambio al unirse con otro segmento de igual orden dan lugar a uno de tercero, y así sucesivamente" (Senciales, 1995). Este sistema se puede representar gráficamente como en la grafica 6.1, teniendo esto la ventaja de poder comparar resultados visualmente e incluso comparar dos cuencas en una misma gráfica.



Grafica 6.1

El calculo numérico de la relación de bifurcación se realiza mediante el cociente entre el numero de cauces de un orden cualquiera y el numero de cauces de un orden inmediatamente superior:

$$R_b = U_n / N_{u+1}$$

Donde: R_b = Relación de Bifurcación

U_n = Número de cauces de orden "u"

U_{n+1} = Número de cauces del orden inmediato superior a "u"

Los resultados obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

Relaciones de bifurcación.

Cuenca de la Quebrada el Tránsito		
Orden del cauce	Número de cauces	R_b
1	32	4.57
2	7	3.50
3	2	2
4	1	
		3.36

Los valores próximos a 2 son indicadores de cuencas con escaso relieve; valores entre 3 y 5 indican zonas de montaña sin demasiada dependencia estructural; y valores superiores a 5 indican fuerte dependencia estructural con cuencas estrechas y alargadas (Senciales, 1995).

Si vemos, nuestra cuenca tiene una relación de bifurcación media de 3.36 lo que significaría una zona de montaña sin demasiado dependencia estructural. Pero nuestra cuenca es una zona singular en cuanto tiene la presencia de dos estructuras volcánicas que se elevan hasta más de mil ochocientos metros en un una distancia horizontal relativamente corta generando grandes pendientes de mas del 40%. Es por eso que, aunque es esperable que con un orden elevado de jerarquización, tengamos razones de bifurcación dispares, en nuestro caso ya se obtienen esos valores dispares teniendo un orden de jerarquización 4. Obsérvese que en el orden 3 se obtiene un valor de 2 el cual implica alto riesgo de inundación por concentración brusca de escorrentía. En el otro lado tenemos que en el orden 1 casi obtenemos un valor de 5 identificable como zona de erosión y cárcavas (Sala y Gay, 1981).

Relación de longitud

La relación de longitud se obtiene del cociente entre la longitud media de los cauces de un orden concreto y la longitud media de los cauces de un orden inmediatamente inferior:

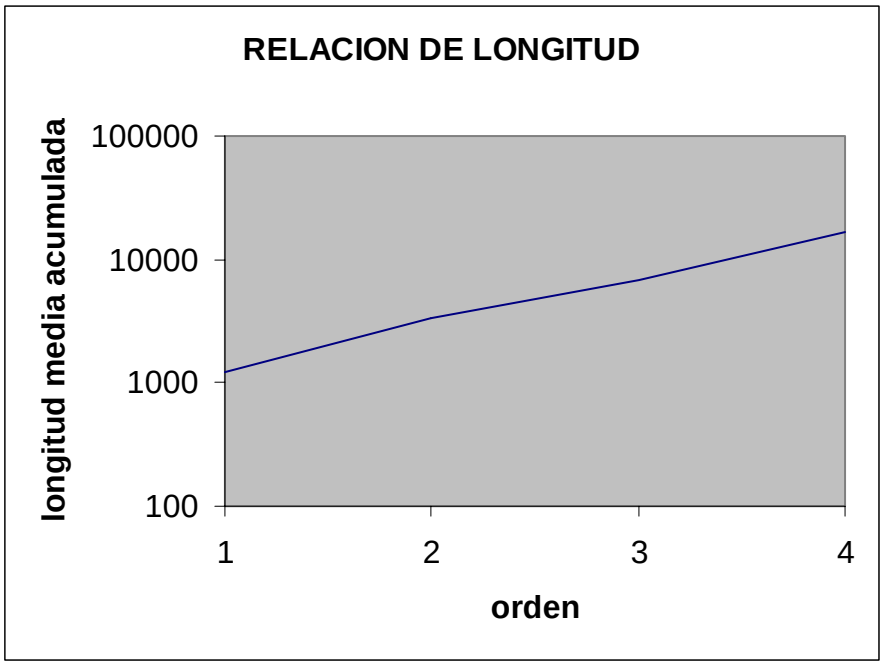
$$R_l = L_u / L_{u-1}$$

Donde : R_l = relación de longitud

L_u = longitud media de los cauces de orden “u”

L_{u-1} = longitud de un cauce de orden “u-1”

Este sistema se puede representar gráficamente como en la grafica 6.2, teniendo esto la ventaja de poder comparar resultados visualmente e incluso comparar dos cuencas en una misma gráfica.



Grafica 6.2

Cuenca de la Quebrada el Tránsito	
Orden del cauce	Longitud media (m)
1	1217.06
2	2177.42
3	3282
4	10121

Tabla 6.1

Los valores obtenidos para las relaciones entre los diferentes órdenes de cauces a partir de los valores de longitudes medias que aparecen en la Tabla 6.1, son los siguientes:

2 – 1 = 1.79

3 – 2 = 1.51

4 – 3 = 3.08

En general, los valores medios que se suelen obtener en este parámetro oscilan ente 1’5 en cuencas en las que se incremente poco la longitud de los cauces y 3, para cuencas en las que los órdenes superiores presentan grandes longitudes.

Para nuestra cuenca se puede observar que la relación entre los segmentos de orden 1-2 y 2-3 se aproxima a 1.5 indicando cauces de corta longitud correspondientes a las zonas de mas pendiente en las laderas del cerro de el Pacayal, donde las quebradas

rápidamente se unen en poco recorrido y generan segmentos de orden mayor. Al llegar a la zona de llanura, la relación es prácticamente 3 indicando un largo recorrido de los ordenes altos precisamente generada por la disminución de la pendiente.

Factor de forma o relación de elongación

Sala y Gay (1981) definen este factor como la razón entre el diámetro de un círculo con el mismo área de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma. Cuanto más se acerca la razón al valor 1, más se aproxima la forma de la cuenca al círculo; cuanto mayor sea el valor hallado en esta relación, menos elongada será la cuenca.

Para calcular el valor de la relación de elongación se utiliza la fórmula de Schumm (1956):

$$R_e = (1'129 \times A^{0'5}) / L$$

Donde: R_e = relación de elongación

A = superficie de la cuenca

L = longitud máxima de la cuenca.

Factor de forma de la cuenca.

Cuenca	Factor de forma
Qda. El Tránsito	0.39

El valor máximo, para cuencas circulares es de 1'275. El valor obtenido para la cuenca en estudio es de 0'39, muy inferior al valor anterior, lo que nos indica que es una cuenca elongada. Este tipo de cuencas presentan un claro retardo de la concentración de la escorrentía, lo que da lugar a una mayor brusquedad de la crecida una vez concentradas las aguas.

Parece lógico el hecho de que una baja razón de elongación genere bruscas crecidas, ante la incorporación mas rápida y casi simultánea de los caudales de escorrentía de una fuerte lluvia, fluyendo casi a la vez hacia un mismo punto (Senciales, 1995).

Factor de circularidad

Se trata de un parámetro que relaciona el área de la cuenca y el área de un círculo con igual perímetro.

$$R_c = (4\pi A) / p^2$$

Donde: R_c = factor de circularidad
A = área de la cuenca
P = perímetro de la cuenca

Factor de circularidad.

Cuenca	Factor de circularidad
Qda. El Tránsito	0.23

Si consideramos que el valor máximo, correspondiente a una cuenca circular, es 1, se puede observar que el valor resultante de 0'23, coincide con la conclusión obtenida a partir de la relación de elongación, donde se definía a la cuenca como elongada. Nuestra cuenca nace en una zona escarpada de alta pendiente lo que refleja bajos índices de elongación, y al tener que salvar fuertes desniveles, sobretodo en su cabecera, presenta cauces principales muy alargados.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es quizás uno de los parámetros mas importantes en morfometría ya que nos habla de la dinámica erosiva de la red hidrográfica.

La densidad de drenaje es un "output" de los factores de control de la producción de agua y sedimentos de una cuenca (López Bermúdez et al.,1988).

Un área con alta densidad de drenaje tiene una mayor área canalizada por la que desviar sus cursos de agua y conducir con mayor velocidad el caudal generado por las aguas de escorrentía (Senciales, 1999).

Strahler (1964) lo define como la relación entre el sumatorio de la longitud total de los cauces de todos los órdenes y el área total de la cuenca.

$$D = \sum L_k / A_k$$

Donde: D = densidad de drenaje expresada en Km. de cauce por Km^2

$\sum L_k$ = suma de la longitud total de los cauces de todos los órdenes

A_k = área total de la cuenca

Densidad de drenaje de la cuenca.

Cuenca	Densidad de drenaje
Qda. El tránsito	1.64

Para Strahler, los valores menores de 10, y en este caso el valor obtenido es de 1.64, indican una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica y espesa cobertera vegetal, así como en materiales permeables y con alta infiltración.

Según la interpretación de Morisawa (1985), los valores menores de 8 caracterizan a un suelo permeable o con roca resistente dentro de un clima lluvioso con vegetación abundante y una textura gruesa de la red.

Quizá quepa aclarar que la textura o razón de textura es la relación entre el número de inflexiones de la cuenca producidas por los cauces y el perímetro de la cuenca. Este índice propuesto por Smith, aunque es poco utilizado, presenta alta correlación con la red de drenaje.

La cuenca estudiada está situada dentro de un clima tropical cálido no desértico, con una estación lluviosa que aporta agua la cuenca. Las rocas existentes en la zona son, en su mayor parte, basaltos-andesitas y piroclastos, presentando una permeabilidad de moderada a alta. Así mismo, la vegetación existente en la zona es abundante y de carácter permanente, tratándose de cafetales y árboles asociados a los mismos en las zonas de nacimiento de los cauces. Otras zonas sin embargo (como el cerro de Chambala formado de material escoreáceo), esta densamente cultivado con grano básico el cual favorece a la escorrentía y no retiene el suelo. Estas características hacen de la zona de estudio una área singular si bien en gran parte concuerdan con las definiciones que hacen Strahler y Morisawa para el valor obtenido de la densidad de drenaje en la zona.

Razón de relieve

Se trata de un parámetro que pone en relación el desnivel de la cuenca y la longitud máxima de la misma. Es importante porque tiene una relación directa con la pérdida anual de sedimento (Sala y Gay, 1981).

Este parámetro se puede calcular según dos autores:

- Según Schumm (1956), se calcula relacionando el desnivel máximo de la cuenca y la longitud máxima de la misma. Con esta expresión se obtiene la pendiente máxima de la cuenca.

$$R_r = H / L_{máx}$$

Donde: R_r = relación de relieve
H = desnivel máximo de la cuenca
$L_{máx}$ = longitud máxima de la cuenca

- Melton (1957) relaciona el desnivel absoluto de la cuenca y el perímetro de la misma. Con esta expresión se obtiene la pendiente media o “razón relativa de relieve”.

$$R = H / P$$

Donde: R = relación de relieve
H = desnivel absoluto de la cuenca
P = perímetro de la cuenca

Razón de relieve.

Cuenca	Razón de Relieve	Razón Relativa de Relieve
Qda. El Tránsito	0.10	0.04

La Razón de Relieve permite conocer la existencia de áreas locales con gran velocidad de los caudales. Por otro lado, la Razón Relativa de Relieve permite conocer la existencia de fuertes velocidades de caudales generalizadas debidas a la pendiente de la cuenca.

Ambas razones tienen utilidad por ser comparables con otras cuencas del entorno y sus respectivas pérdidas de suelo, con lo cual se puede estimar el efecto erosivo que introduce la razón de relieve en diferentes cuencas con características similares.

Un fuerte desnivel implica mayor velocidad del caudal y mayor capacidad denudativa. Esta capacidad es potencial, ya que depende de la presencia del caudal y de su volumen, de la intensidad de las precipitaciones que provocan caudales diferentes y de la resistencia del sustrato a ser erosionado por la acción mecánica.

En las cabeceras de las quebradas se observan fuertes desniveles con pendientes superiores al 40% influyendo directamente en la velocidad que puede llevar el caudal a lo largo del cauce, lo que condiciona su energía cinética y, por tanto, su potencial erosivo.

Número de rugosidad de Strahler

El número de rugosidad de Strahler relaciona el desnivel máximo de una cuenca con su densidad de drenaje:

$$NR = H / D$$

Donde: NR = numero de rugosidad

H = desnivel máximo

D = densidad de drenaje

Cuenca	Numero de rugosidad
Qda. El tránsito	3

Este valor es útil para saber la evolución de la cuenca. Si una red hídrica ha aumentado su red de drenaje o el desnivel a lo largo de los años, eso conllevará un mayor valor en el numero de rugosidad, lo que implica un incremento de la acción erosiva, bien por acentuarse la pendiente o bien por intensificarse la arroyada concentrada.

Este índice sobredimensiona el peso de los desniveles en las cuencas de montaña, especialmente cuanto mayor sea su superficie. Es por eso que es un buen indicador para comparar la evolución de una misma cuenca en el tiempo, pero no para hacer análisis comparativos con otras cuencas.

6.4. Interpretación

Parámetros cualitativos como la tipología de la red de drenaje o la sinuosidad caracterizan a las quebradas por presentar una red de drenaje poco evolucionada con cierta dependencia estructural, con fuertes pendientes, y con un potencial erosivo alto, principalmente en las partes altas de las quebradas, donde el cauce se encaja en el propio substrato. El carácter erosivo queda reflejado a la vez por el tamaño de partículas que predomina en el lecho de las quebradas, que aún siendo debido, en parte, al material aportado por las inestabilidades de laderas, no hay que olvidar que éstas son desencadenadas en cierta medida por la socavación del agua en las partes bajas de las laderas, influyendo de manera indirecta en la generación de parte del material. Las fuertes pendientes asociadas a la parte alta y media de las quebradas y el régimen de precipitaciones estacionario caracterizado por altas intensidades de lluvia, dan lugar a un régimen torrencial no permanente con fuerte potencial erosivo y energía cinética capaz de transportar una carga sólida importante.

Parámetros cuantitativos como la relación de bifurcación, relación de longitud, densidad de drenaje, etc., reflejan las distintas fases erosivas en la cabecera y partes media y baja de las quebradas, así como su tendencia evolutiva a base de incidir en las cabeceras para alcanzar una adecuada jerarquización. La implicación hidráulica de estos parámetros indican una alta probabilidad de inundación por concentración brusca de la escorrentía en pocos cauces, reflejado en un marcado retardo, alcanzando picos de crecida importantes.

7. ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS

7.1. Análisis de inundaciones

Para realizar esta parte del estudio se han tenido en cuenta los datos obtenidos en campo, a partir de los cuales se ha realizado un inventario de puntos de inundación, y los obtenidos mediante el análisis de precipitaciones y del estudio hidrometeorológico. A partir de éste último, se han calculado los caudales esperados para los diferentes períodos de retorno. Para dichos caudales, se ha modelizado mediante el programa HEC-Ras, el área inundada, anchura de flujo, altura, etc, de la quebrada de El Tránsito con el fin de situar aquellas áreas que se encuentran bajo la amenaza de inundación.

7.1.1. Caracterización de la amenaza

Además de la cantidad de agua caída durante el evento climatológico, las avenidas e inundaciones van a estar condicionadas por las características intrínsecas del terreno: su capacidad de retener agua, su grado de saturación, su porosidad, la geometría y dimensiones de los cauces, etc. Son, en suma. este conjunto de características, las que van a definir aquellas áreas susceptibles de sufrir inundaciones.

Los puntos de inundación localizados mediante el trabajo de campo y la consulta a los habitantes de la zona, se sitúan principalmente en las intersecciones de los caminos y en la parte baja de las quebradas. Debido a su densidad de población, los puntos más conflictivos se encuentran en la cale que une Piedra Azul con San Rafael Oriente, la cual cruza cuatro quebradas importantes. Otros puntos problemáticos estarían situados en el área urbana de San Rafael Oriente y El Tránsito en su contacto con la quebrada de El Tránsito.

El recorrido realizado durante la campaña de campo, a lo largo de las quebradas, ha permitido observar las características de las mismas. En general, se pueden distinguir tres zonas diferenciadas en las mismas, que se pueden hacer corresponder con las tres unidades geomorfológicas diferenciadas dentro del volcán: ladera alta del volcán, ladera media del volcán y ladera baja del volcán. No obstante, hay que hacer una diferenciación con la quebrada de El Tránsito, ya que los terrenos por los que circula le confieren unas características algo diferentes.

Las quebradas de la vertiente sur del volcán se enraízan en su parte más alta, donde no existe vegetación o es muy escasa y de pequeño porte. El material que se encuentra es de carácter piroclástico bastante consolidado, alternando con coladas de lava. Esto hace que las quebradas estén poco encajadas, ya que tienen como lecho el basalto de dichas coladas, estando sus márgenes ocupados por materiales no sueltos. El fondo de las quebradas en esta zona está completamente limpio, sin sedimentos, lo que indica una zona de erosión y transporte.

Foto 7.1: Colada cóncava.

En la parte media, estas quebradas siguen teniendo como lecho el basalto de las coladas, impidiendo que se encajen. Como característica principal es la presencia de desniveles que dan lugar a saltos de decenas de metros dentro del propio cauce. Hay que resaltar que algunos de ellos se observa que la colada de lava tiene una forma cóncava, con un hueco debajo. Esto se interpreta como un tubo cuyas paredes son el basalto-andesita y por cuyo interior fluía la lava hacia cotas más bajas. (Foto 7.1) En esta zona, los márgenes están vegetados, sobre todo con plantas herbáceas, potreros y algunas manchas de bosque bajo. Los procesos dominantes son los de trasporte y erosión, apareciendo ya algunos sedimentos rellenando depresiones o huecos y zonas de menor energía de la quebrada.

Ya en su tramo más bajo, las quebradas se encajan más profundamente. Esto es debido a que los materiales que atraviesan son depósitos dejados por procesos torrenciales o por lahares y avalanchas. Son materiales poco consolidados, granulares y con una grosera laminación interna. Lo que se observa con claridad son los sets en los que se agrupan los sedimentos. En esta parte se unen los sedimentos que vienen de la parte alta con los que proceden de los márgenes de las mismas. En esta zona es donde se han observado una mayor cantidad de inestabilidades, sobre todo desprendimientos. El tramo bajo es donde se produce una mayor acumulación de sedimento, pero no se llegan a colmatar las quebradas debido a la extracción de arena de las mismas para la construcción. No obstante, este tipo de extracción puede ser en ocasiones perjudicial, ya que se realiza sin ningún control, por lo que a veces se socavan las bases de los muros y bordas de protección, dejándolos vulnerables a las futuras avenidas.

En el caso de la quebrada El Tránsito, la situación varía notablemente, sobre todo porque a lo largo de todo su recorrido su lecho se encuentra relleno de material arenoso (Foto 7.2). Esto es así porque las zonas por donde discurre están compuestas por un material granular poco cohesionado y fácilmente erosionable y transportable por la escorrentía superficial. Esta quebrada tiene su nacimiento en el cerro La Laguna Seca del Pacayal, pero es en el momento en el que sale del Cerro de Chambala, donde se ensancha, alcanzando en ocasiones más de 50 m de anchura que la convierte en una calle transitada por todo tipo de vehículos. A partir de esta zona existen, predominantemente, los procesos de transporte y sedimentación. Su cauce está poco encajado, pero llega a formar taludes de 10 m en vertical, lugares donde se producen inestabilidades en forma de desprendimientos de bloques y de granos. La existencia a lo largo de todo su recorrido de una importante actividad extractora de arena hace que no se llegue a colmatar y cause mayores problemas en la parte más baja de su cauce. Debido a la falta de control

Foto 7.2: La quebrada como vía de transporte

en esta actividad, no se sabe la cantidad de material extraído de la quebrada, cosa que sería muy importante con el fin de estimar la cantidad de sedimentos que arrastra la quebrada durante las avenidas.

En general, se ha observado la existencia de puntos de inundación en aquellos lugares donde los caminos intersectan a los cauces de las quebradas. En estos casos, los caminos se vuelven intransitables durante el tiempo que dura la tormenta, sobre 1 ó 2 horas. La importancia de este hecho radica en que, en ocasiones, existen comunidades que pueden quedar incomunicadas o con un difícil acceso, con las consecuencias que ello conlleva en un caso de emergencia.

7.1.2. Análisis de peligrosidad

Una de las características del clima de El Salvador son las lluvias torrenciales ligadas a tormentas. Este tipo de lluvia trae consigo una gran cantidad de precipitación en un corto período de tiempo, provocando una gran concentración de caudal en los cauces, que en muchas ocasiones, no pueden evacuar, provocando inundaciones en las zonas más bajas de la cuenca.

Con objeto de conocer con más detalle la recurrencia de los factores que desencadenan las inundaciones, y por tanto la recurrencia de la amenaza, se ha realizado un estudio meteorológico seguido de un estudio hidrometeorológico

Dichos estudios permiten determinar los caudales punta previstos para los diferentes períodos de retorno fijados, basándose en el análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias anuales.

Una vez obtenidos los caudales punta, en función de la probabilidad de ocurrencia de las lluvias máximas, se podrán calcular los niveles de agua alcanzables en varias secciones del cauce principal.

7.1.2.1. Análisis de precipitaciones

El análisis de las precipitaciones que se producen en una zona geográfica es una herramienta de gran ayuda para determinar la evolución de las lluvias a lo largo del tiempo, hacer predicciones e intentar obtener valores que aportan valiosos datos sobre inundaciones, avenidas, deslaves, lahares, etc.

Es por esto que se hace constar la importancia de la recolección de estos datos a todas las comunidades, especialmente las que están dotadas de pluviómetros, ya que la dedicación necesaria para su obtención no comporta más de cinco minutos y la ayuda y resultados que se obtienen de ellos son importantes.

En El Salvador se producen tres tipos principales de lluvias asociadas a otras tantas situaciones climáticas:

- El desarrollo de tormentas locales por movimientos de aire convectivos debidos al calentamiento del aire húmedo del océano a lo largo del día y que, en la estación lluviosa (mayo-septiembre), suelen dar como resultado la precipitación de grandes cantidades de agua en poco tiempo o lo que es lo mismo, precipitaciones de alta intensidad.

- Los eventos meteorológicos asociados a la presencia continuada de bajas presiones atmosféricas, situaciones ciclónicas debidas a la zona de convergencia tropical (Perla, Alfaro y Domínguez, 1990), ocasionan periodos de lluvias prolongados en el tiempo, con duraciones de varios días que, en general, ocasionan grandes precipitaciones, pero de baja intensidad relativa.

- Situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical, con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe, que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del huracán Mitch.

Para el presente estudio se estuvo recolectando información de los diversos pluviómetros que estaban situados en la zona de estudio para, de esta manera, complementar los ya situados en el anterior estudio de la ladera norte del volcán (tabla 7.1). La mayoría de los nuevos pluviómetros están situados en las zonas bajas de la ladera sur occidental del volcán, lo que viene a ser un importante insumo de cara a posteriores estudios, ya que no se contaba con datos de esos lugares. El problema que se deriva para este estudio es que estos pluviómetros son de reciente instalación (2 años), y no constan de un registro amplio con el cual poder trabajar.

Nombre	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z (m)	Lugar	Años recopilados
Oikos	354010	1476066	130	El Tránsito	2
El Coyol	358827	1478336	171	Llano el Coyol	2
El Mogote	354142	1484074	364	San Jorge	2
La Piedrona	358125	1481189	362	Piedra Azul Arriba	2
San Jorge	354442	1483204	336	San Jorge	2
San Isidro	359361	1490205	1000	El Jocote	22
Quirós 3	359361	1489438	970	El Jocote	22
Las Cruces	358462	1490104	1060	Fca. El Pacayal	22
Las Placitas	359714	1487696	810	Fca. Las Placitas	22
Tres mil pies	359934	1487282	860	Fca. Sta. Rita	22
Cuatro mil pies	361309	1486677	1155	Conacastal	22
Cinco mil pies	361309	1486290	1322	Conacastal	22
Santa Rosa	359143	1488252	790	El Jocote	22
Amaya	359080	1489110	893	El Jocote	2

Tabla 7.1 Situación de los pluviómetros de la zona de estudio en coordenadas Lambert.

La mínima serie recomendada para elaborar resultados fiables a partir de los datos de precipitación es de unos 20 años y de tres estaciones. Debido a esta circunstancia, se decidió complementar la base de datos de los pluviómetros que se usaron para el estudio de la ladera norte, y utilizar aquellos que se encontraban dentro de la zona de trabajo, ya que eran los únicos que contaban con un registro mínimo de 20 años y podían dar resultados fiables en los cálculos.

Para la cuenca estudiada se eligieron las estaciones de San Isidro, Placitas, 5000 pies y Santa Rosa, por encontrarse dentro del área de estudio y estar situadas en las partes altas de la misma.

Precipitaciones anuales

Las precipitaciones anuales totales recogidas entre los años 1980 y 2002 en los pluviómetros situados dentro de la cuenca de el Tránsito, nos muestran un patrón oscilatorio comprendido entre los 1300 y los 2800 mm. (grafico 7.1). Esta oscilación más o menos periódica, sitúa puntos máximos de precipitación cada 3 ó 4 años. Esto es importante ya que de esta manera pueden esperarse años de precipitación abundante solamente con observar la evolución de la grafica. Manteniendo un seguimiento periódico de los pluviómetros y registrando la precipitación que en ellos se obtiene, es fácil ir actualizando la base de datos y generar gráficas que ayuden a la predicción de lluvias esperables.

Puntualmente las lluvias más elevadas se registran en la estación de San Isidro situada a 1000 msnm, durante el año 1988. La precipitación en esta estación fue de 3798 mm. Ese año la precipitación media entre todas las estaciones fue de 3013 mm., 2882 mm si no se tiene en cuenta la estación de San Isidro la cual distorsiona el promedio.

En ese sentido, en el año 1998 que correspondió con el Huracán Mitch, la precipitación media fue de 2992 mm. De esta manera, se podría considerar el año 1998 como el mas lluvioso de los últimos 24 años obviando que en 1988 la estación San Isidro marca un pico de precipitación mucho mas alto que los registrados por las otras estaciones de la zona en el mismo año.

Estaciones	Precipitaciones anuales medias (mm)
San Isidro	2570’14
Placitas	2306’5
5000 pies	2209’45
Santa Rosa	2227’14

Lo que se observa en el gráfico 7.1, es que actualmente estamos en un periodo de lluvias bajo, después de las grandes precipitaciones del 1998. En el 2000 hubo un pequeño pico pero la tendencia fue descendente. Así pues, considerando los ciclos de entre tres y cuatro años antes mencionados, seria esperable una tendencia al alza de las precipitaciones para el presente 2003 y siguiente año 2004.

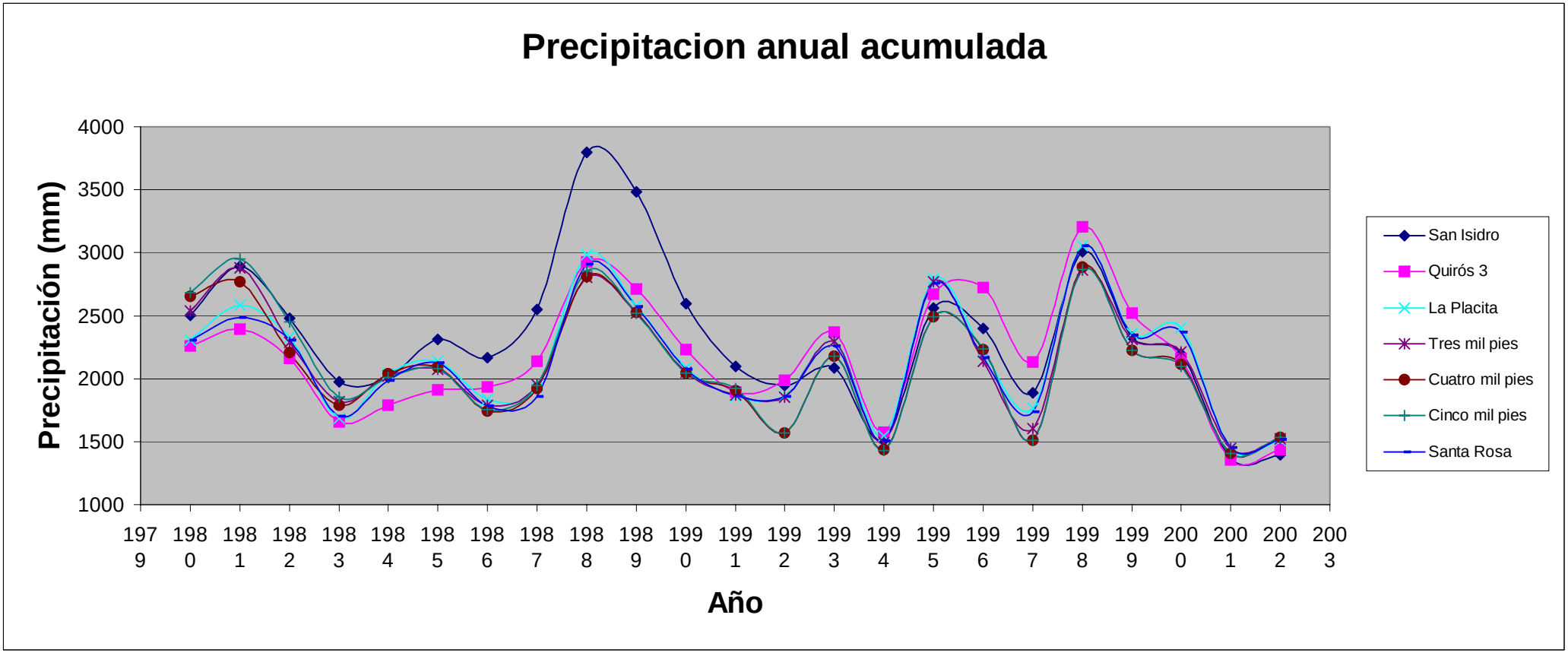

Precipitacion anual acumulada
Precipitación (mm)
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
Año
San Isidro
Quirós 3
La Placita
Tres mil pies
Cuatro mil pies
Cinco mil pies
Santa Rosa

Grafico 7.1

Las precipitaciones a lo largo del año se concentran en la época de invierno que corresponde a los meses entre Mayo y Noviembre. Las lluvias en el resto de los meses es escasa o nula. A continuación se representan 3 gráficos correspondientes a la distribución de las lluvias mensuales para los siguientes años:

- 1993: Año de precipitación media (Gráfico 7.2)
- 1994: Año de precipitación baja (Gráfico 7.3)
- 1998: Año de precipitación alta (Gráfico 7.4)

Lo primero que se observa en los tres gráficos es la presencia de dos picos de altas precipitaciones comprendidos entre los meses de mayo-junio y agosto-septiembre. Asimismo en el mes de julio se produce un descenso de las precipitaciones para volver a aumentar hacia el final de la época de invierno.

El año 1998 es de especial interés ya que fue el año que se produjo el huracán Mitch y el patrón de lluvias se vio modificado. Ya en el mes de mayo de ese año, las precipitaciones que podían ser esperables estuvieron muy por debajo de la media. Además se marca un pico en el mes de octubre (huracán Mitch) nada típico y fuera de la tendencia descendente de la mayoría de años estudiados. Por lo tanto, la presencia de estas anomalías pueden ser indicadoras de un evento extraordinario en el año en el que se producen.

Las lluvias máximas mensuales esperables en un año de tendencia normal sin la ocurrencia de agentes atmosféricos singulares como pudieran ser los huracanes, abarca entre los 450 y 700 mm localizados en los dos picos de lluvias antes mencionados.

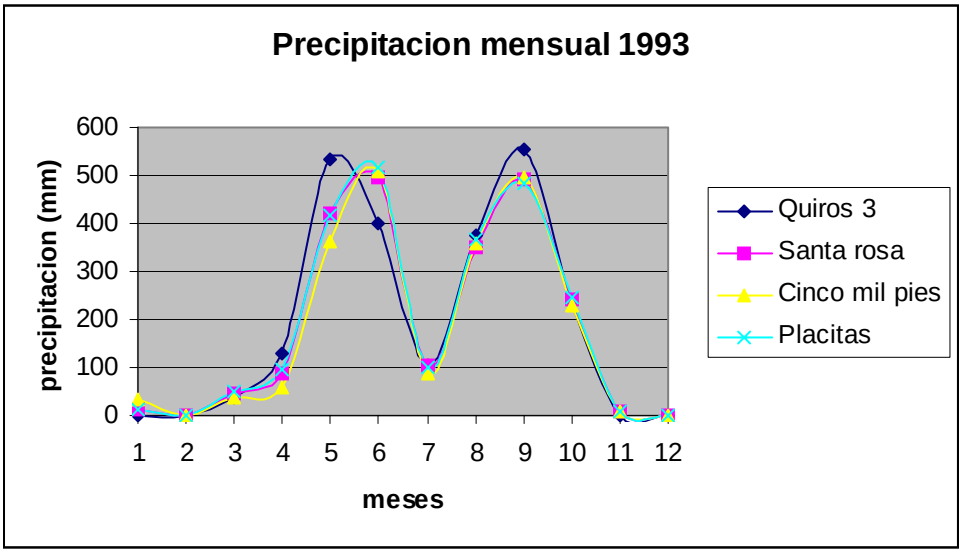


Grafico 7.2

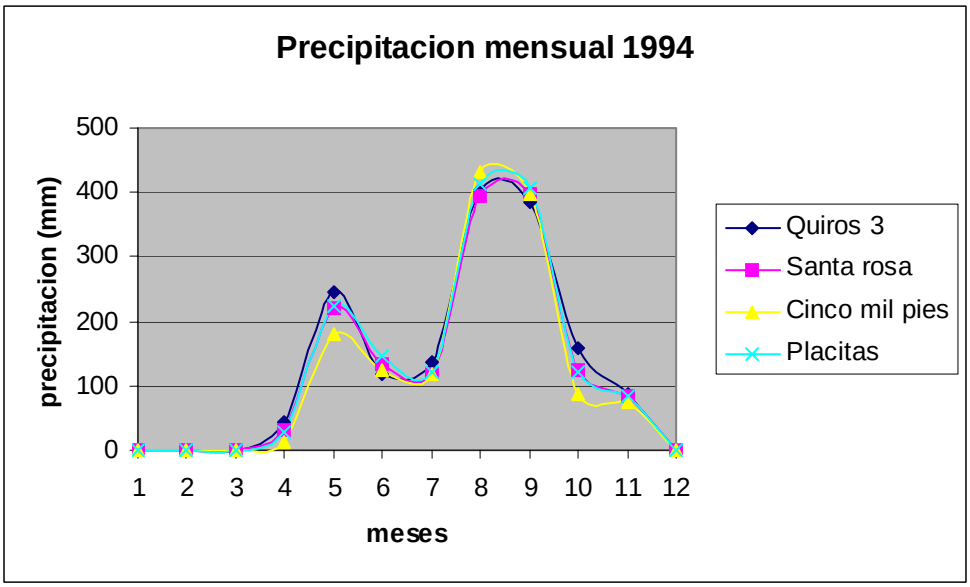


Grafico 7.3

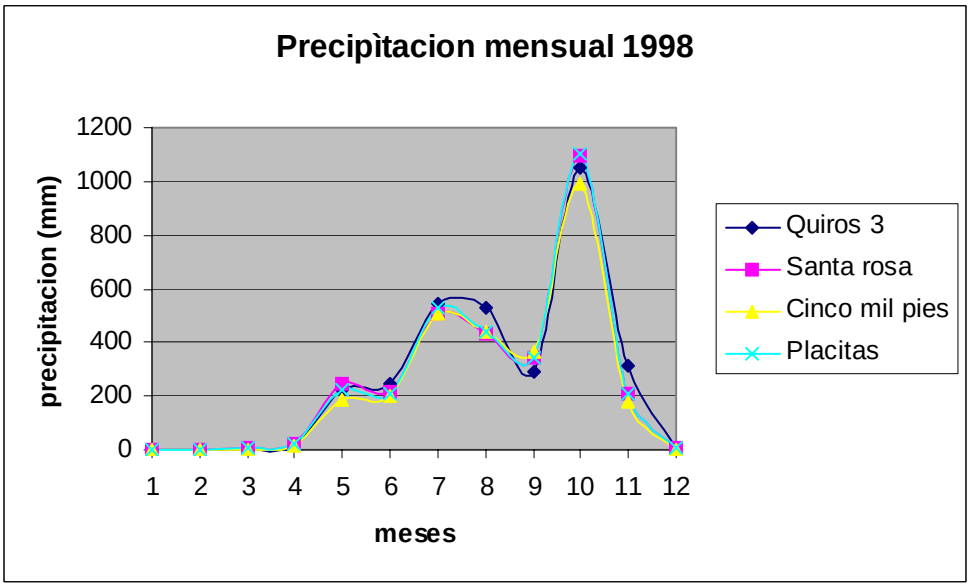


Grafico 7.4

Precipitaciones diarias

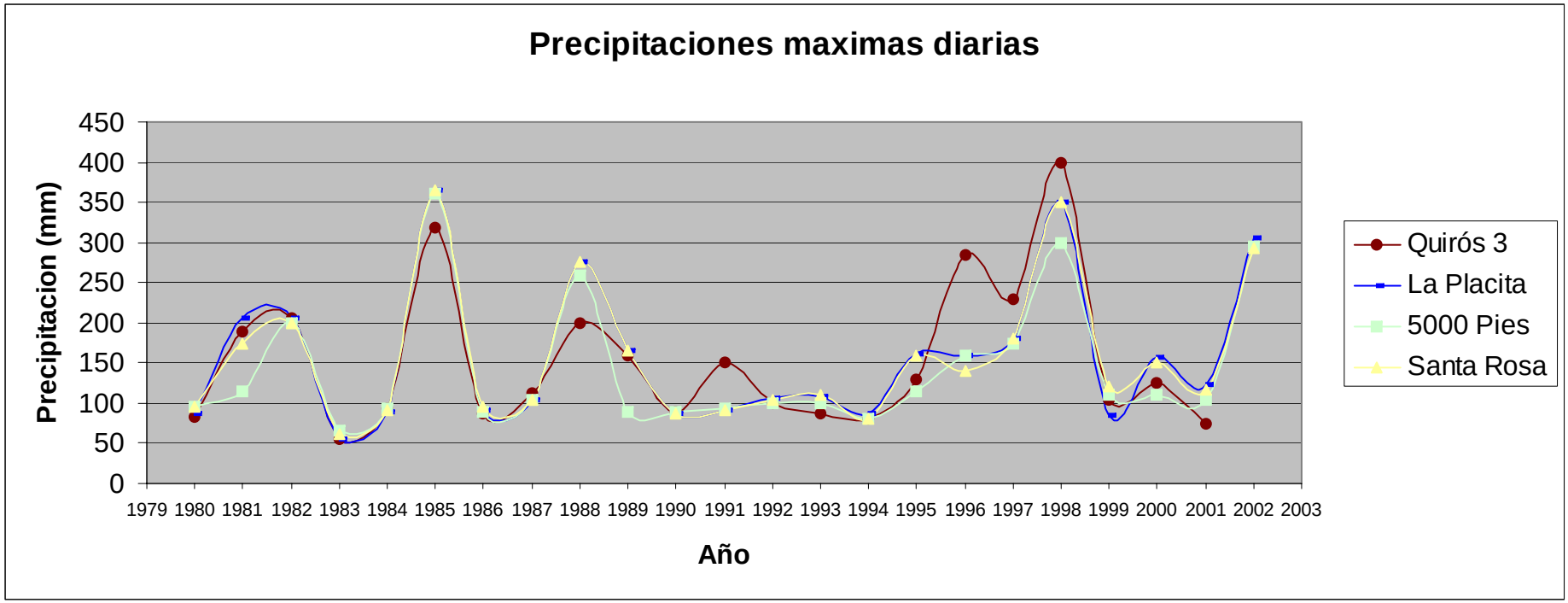
Las precipitaciones diarias son las que mas influencia van a tener en el echo de producir inundaciones, lahares y desprendimientos. Y mas concretamente la intensidad de lluvia que pueda ocurrir.

Altas intensidades de lluvia pueden producir una alta circulación superficial de agua lo que genera un aumento considerable de la escorrentía. Lo que se pretende hacer es calcular mediante métodos probabilísticos, qué lluvias máximas pueden producirse en un determinado espacio de tiempo. Estas lluvias tienen la peculiaridad de estar asociadas a fenómenos tormentosos de gran intensidad, que pueden llegar a precipitar todo el agua en una o dos horas.

Para calcular estas precipitaciones se han extraído las precipitaciones máximas diarias comprendidas entre 1980 y 2002 (tabla 7.2). La grafica 7.5 muestra la distribución de estas lluvias máximas.

Precipitaciones máximas diarias				
Año	Quirós 3	La Placita	5000 Pies	Santa Rosa
1980	83	88	95	95
1981	188	205	115	175
1982	205	205	200	200
1983	56	55	66	62
1984	94	90	93	92
1985	318	365	360	365
1986	86	92	90	95
1987	113	105	105	105
1988	200	275	260	275
1989	160	165	90	165
1990	89	88	90	88
1991	150	92	93	92
1992	100	107	100	104
1993	88	108	100	110
1994	80	87	80	80
1995	129	162	115	160
1996	285	160	160	140
1997	230	180	175	180
1998	400	350	300	350
1999	104	85	110	120
2000	125	157	110	150
2001	74	123	104	116
2002		306	294	293

Tabla 7.2


Precipitaciones maximas diarias
Precipitacion (mm)
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003
Año
Quirós 3
La Placita
5000 Pies
Santa Rosa

Grafica 7.5

La máxima precipitación diaria registrada fue en la estación Quirós 3 con una lluvia de 400 mm. (rojo en la tabla 7.2). Esta precipitación se corresponde con las lluvias producidas por el huracán Mitch en octubre de 1998. La mínima precipitación máxima diaria se registró en la estación las Placitas en el 1983 con 55mm (verde en la tabla 7.2). Estos datos corresponden con los datos de lluvias anuales

En el grafico de precipitaciones máximas diarias se observa, al igual que en las precipitaciones anuales acumuladas, un comportamiento cíclico. En un 71% se pueden asociar los años con máximas precipitaciones diarias y los años con mayor lluvia anual acumulada (tabla 7.3). El hecho de que no coincidan en su totalidad, puede ser debido a que los fenómenos meteorológicos que dan origen a las lluvias más abundantes en una jornada, suelen ser fenómenos de alta intensidad, con precipitaciones abundantes y corta duración.

Años con picos de máxima precipitación							
Diaria	1982	1985	1988	1991	1995	1998	2000
Anual	1981	1985	1988	1993	1995	1998	2000

Tabla 7.3

El promedio de las máximas precipitaciones diarias a lo largo de los años comprendidos entre 1980 y 2002 es de 147 mm. Para nuestras estaciones este promedio se ve superado en Quirós 3 con 153 mm, Placitas con 158 mm y Santa Rosa con 157 mm.; Cinco mil pies esta por debajo de la media con 143 mm.

Análisis probabilístico de ocurrencia de precipitaciones

Con objeto de estimar la probabilidad de ocurrencia de lluvias en la zona de estudio, se han analizado las series de precipitaciones máximas diarias anuales, únicos datos disponibles y que pueden proporcionar información en este tipo de fenómenos.

En su estudio se requiere que la serie posea una extensión mínima, considerándose ésta del orden de 20 años de registro y de tres estaciones, con el objeto de que los datos obtenidos en el análisis estadístico sean lo más precisos posible (Ferrer, 1993, Ferrer y Ardiles, 1995). Para poder tratar este mínimo de años, se han utilizado los datos de precipitación máxima diaria recogidos durante los 22 años de la serie continua de las estaciones de Quirós 3, Placitas, Cinco mil pies y Santa Rosa.

A partir de la función de distribución de Gumbel se han obtenido los cuantiles (periodos de retorno T) correspondientes a las precipitaciones máximas. La distribución de Gumbel obtiene buenos resultados para el estudio de frecuencias de valores extremos. Se han calculado las precipitaciones tipo para diferentes periodos de retorno que se reflejan las tablas siguientes:

QUIROS 3	**5000 PIES**

T	Precipitacion	Prob(Pmax<=x)
2	139.2548459	0.5
5	233.5572381	0.2
10	295.9936272	0.1
25	374.8821705	0.04
50	433.4061984	0.02
100	491.4980941	0.01
200	549.3780223	0.005
500	625.7395969	0.002

T	Precipitacion	Prob(Pmax<=x)
2	131.3875042	0.5
5	217.6143409	0.2
10	274.7040096	0.1
25	346.8369574	0.04
50	400.3492987	0.02
100	453.4665133	0.01
200	506.3899121	0.005
500	576.2122875	0.002

PLACITAS		
T	Precipitacion	Prob(Pmax<=x)
2	145.4052697	0.5
5	238.5133181	0.2
10	300.1589477	0.1
25	378.0483641	0.04
50	435.8311828	0.02
100	493.1873421	0.01
200	550.3342185	0.005
500	625.7286705	0.002

SANTA ROSA		
T	Precipitacion	Prob(Pmax<=x)
2	144.1751646	0.5
5	234.3263376	0.2
10	294.0142584	0.1
25	369.4301046	0.04
50	425.3778875	0.02
100	480.9125607	0.01
200	536.2445973	0.005
500	609.2447128	0.002

Según la observación de las distribuciones probabilísticas de otros estudios realizados, la función de distribución Gumbel no refleja bien los periodos de retorno a partir de los 25 años, infravalorando los resultados de las precipitaciones. Las funciones que mejor reflejan estos eventos extraordinarios, sin amplificar el periodo de retorno, son GEV y SQRT-ET máx.

Para un periodo de retorno (T) de 2 años, las lluvias pueden superar el abanico comprendido entre 131 mm obtenido en Cinco mil pies y los 145 mm de Placitas, lo que indica que existe una probabilidad del 50% en un año, de que se produzcan precipitaciones superiores a los valores anteriormente mencionados.

Para los periodos de retorno de 5, 10 y 25 años, considerados como valores válidos para la distribución de Gumbel, la probabilidad de que ocurran precipitaciones superiores a las obtenidas en un año es del 20%, 10% y 4% respectivamente.

7.1.2.2. Estudio hidrometeorológico

Con el presente estudio se pretende determinar los posibles niveles que pudieran alcanzar las aguas para diversos períodos de retorno. Para llegar a conocer este dato, es necesario obtener los caudales máximos correspondientes a dichos períodos de retorno. Como se trata de sistemas torrenciales (no permanentes) no existen datos de caudales; por lo tanto se realizará un análisis indirecto, aunque no sea lo más fiable.

Para alcanzar el objetivo planteado se han empleado los datos de precipitación resultantes del estudio pluviométrico. Concretamente se usa el parámetro P_d (precipitación máxima diaria) para determinar los caudales máximos.

Para ello, se transforma la precipitación máxima diaria en intensidades, que junto con el coeficiente de escorrentía, obtenido a partir de los datos físicos de la cuenca, permite determinar el caudal máximo asociado a los períodos de retorno establecidos.

El estudio hidrometeorológico comprende los siguientes pasos:

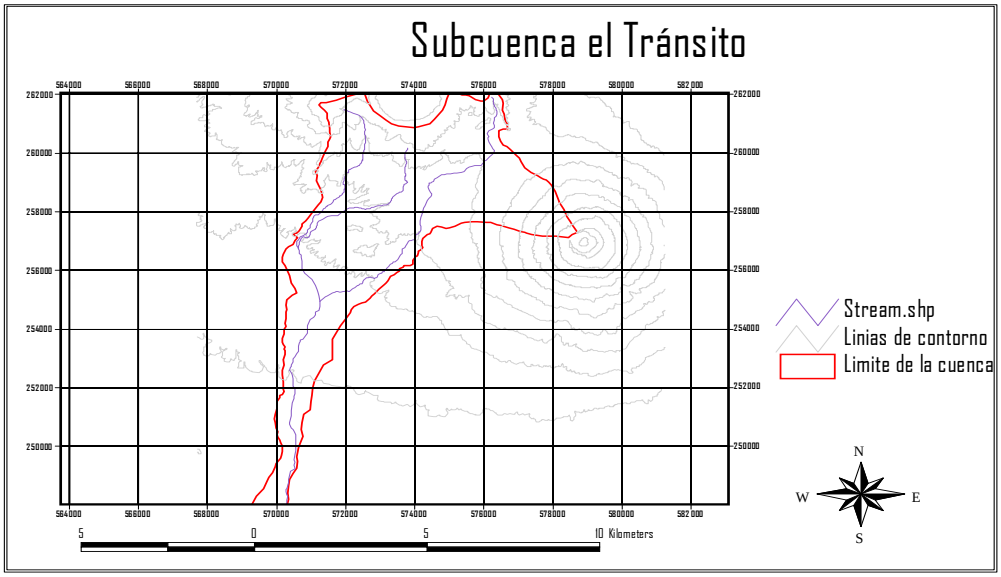
- Delimitación de la subcuenca
- Cálculo del tiempo de concentración
- Cálculo de la intensidad de lluvia
- Determinación del coeficiente de escorrentía
- Determinación de los caudales máximos asociados a cada período de retorno

Delimitación de la subcuenca de El Tránsito.
Características morfológicas

Se ha elegido la quebrada de El Tránsito por ser la que mayor volumen de sedimento arrastra durante la época en la que aparece activa, así como por ser la de mayor longitud y porque en su recorrido se encuentran los tres pueblos más importantes de la zona (San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito), por lo que su dinámica afecta a un número importante de personas.

La subcuenca de la quebrada de El Tránsito forma parte de la cuenca del río Grande de San Miguel. Está limitada al norte por el cono volcánico de la Laguna Seca de El Pacayal, de 1315 msnm y la collada que lo une al cono volcánico, situado hacia el sureste del Chaparrastique con 2130 msnm. Dicho límite sube por su ladera hasta llegar al cráter para volver a bajar hacia el sur, ya siguiendo el cauce de la quebrada.

Dentro de esta subcuenca se encuentra el cerro de Chambala. El cerro de Chambala se considera un antiguo volcán de escorias que se encuentra en pleno proceso de desmantelamiento, ya que lo cortan numerosas quebradas de pequeño tamaño que son tributarias de la de El Tránsito, aportándole una carga importante de material de tamaño lapilli. Este cerro tiene una altura de 732 msnm.



Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo transcurrido desde que cae una gota de agua en el punto más alejado de la cuenca, hasta que llega a la salida de ésta. Este tiempo es función de las características geográficas y topográficas de la zona y, por tanto, independiente de la configuración y magnitudes del aguacero.

Existen varias formas de hallar el tiempo de concentración, Tc, de una cuenca.

- Según Kirpich, la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$Tc = 0.87\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.38}$$

Tc: tiempo de concentración (minutos)
L: longitud cauce principal (metros)
H: diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (metros).

- Según Témez:

$$Tc = 0.3\left(\frac{L}{J^{\frac{1}{4}}}\right)^{0.76}$$

Tc: tiempo de concentración (horas)
L: longitud del cauce principal (kilómetros)

J: pendiente media del cauce principal (%)

- Según Giaudotti:

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

A: superficie de la cuenca (km^2)
L: longitud del cauce principal (kilómetros)
H: desniveles máximo y mínimo de la cuenca (metros)

Los parámetros físicos para realizar los cálculos del tiempo de concentración son los que aparecen en la Tabla 7.3

Tabla 7.3.- Parámetros de cálculo para hallar el tiempo de concentración.

Parámetro	Valor
Superficie de la cuenca	43.1 km^2
Desnivel de la cuenca	980 m
Longitud del cauce principal	19105 m
Pendiente media del cauce principal	5.86 %

Los resultados obtenidos para la subcuenca de la quebrada El Tránsito, según los tres autores anteriores son los que muestra la Tabla 7.4

Tabla 7.4.- Tiempo de concentración calculados según diferentes autores.

	Tiempo de concentración	
	En minutos	**En horas**
Kirpich	121.05	2.02
Temez	121.07	2.02
Giaudotti	131.57	2.19

Como se puede observar, los resultados obtenidos para el tiempo de concentración son muy similares al aplicar las diferentes fórmulas de estos autores. No obstante, se va a

elegir el valor obtenido según Temez ya que se va a seguir la metodología propuesta por él para el estudio de la quebrada.

Intensidad de lluvia

Para la estimación de la intensidad de lluvia (I) en la subcuenca se ha utilizado la metodología expuesta por Témez (1987), adoptando las expresiones que aparecen en dicha publicación, junto con los tiempos de concentración, T_c, estimados con anterioridad.

Las entradas de precipitación a la cuenca se obtienen mediante el tratamiento de la información meteorológica disponible. La serie utilizada como entrada de precipitación a la cuenca refleja las precipitaciones máximas diarias recogidas en las estaciones pluviométricas. Dicha serie ya ha sido tratada estadísticamente, obteniendo los diferentes periodos de retorno.

Así, se tiene un valor final de precipitación en 24 horas para la cuenca y para cada periodo de retorno. Este valor debe ser convertido posteriormente a intensidad de lluvia.

La intensidad de precipitación, a utilizar en la aplicación del método racional para el cálculo de caudales máximos, es la correspondiente a un determinado periodo de retorno y a un intervalo de duración que se corresponde con el tiempo de concentración.
Para su cálculo se emplea la ley de intensidad-duración que utiliza la expresión:

$$I_t / I_d = {}_{(I1 / Id)} (28^{0.1} - Tc^{0.1}) / (28^{0.1} - 1)$$

Esta expresión se propone como universal para cualquier curva "intensidad-duración", es decir, la curva resultante de unir puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes, todos ellos, a una misma frecuencia o período de retorno.

El cociente I_1/I_d, relación entre la intensidad horaria y diaria, es un parámetro característico de cada región, independiente del período de retorno. Para el área de estudio se ha estimado un valor de 11. Este valor se obtuvo relacionando los valores utilizados en diversas áreas de la Península Ibérica e interpolándolos para el área de estudio, teniendo en cuenta las características de ambas zonas. Esto se ha hecho así por la carencia de este parámetro para la región. El valor 11 indica un régimen torrencial asociado al mediterráneo.

Esta ley, debido a su carácter adimensional, es independiente de los valores absolutos de la lluvia, lo cual permite su aplicación a cualquier período de retorno, e incluso extrapolar, eligiendo como valor de referencia el relativo a lluvia diaria:

$$I_d = P_d/24$$

I = intensidad de precipitación (mm/h) asociada a intervalos de duración D (h)

P_d = precipitación máxima diaria, obtenida para la subcuenca y para cada uno de los periodos de retorno considerados (mm).

Periodos de retorno	Intensidades en la subcuenca de el Tránsito Para la estación 5000 Pies	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	5.474	38.74
5	9.067	64.17
10	11.446	81.01
25	14.452	102.28
50	16.681	118.06
100	18.894	133.72
200	21.100	149.33
500	24.009	169.92

Periodos de retorno	Intensidades en la subcuenca de el Tránsito Para la estación Quirós 3	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	5.802	41.06
5	9.732	68.87
10	12.333	87.29
25	15.620	110.55
50	18.059	127.81
100	20.479	144.94
200	22.891	162.01
500	26.072	184.52

Periodos de retorno	Intensidades en la subcuenca de el Tránsito Para la estación Placitas	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	6.059	42.88
5	9.938	70.34
10	12.507	88.51
25	15.752	111.48
50	18.160	128.52
100	20.549	145.44
200	22.931	162.29
500	26.072	184.52

Periodos de retorno	Intensidades en la subcuenca de el Tránsito Para la estación Santa Rosa	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	6.007	42.52
5	9.764	69.10
10	12.251	86.70
25	15.393	108.94
50	17.724	125.44
100	20.038	141.82
200	22.344	158.13
500	25.385	179.66

Para el cálculo de I_t se ha utilizado el resultado de la aplicación de la fórmula de Témez por considerarse que es la que mejor se ajusta a la región.

Coeficiente de escorrentía

Los caudales de escorrentía aumentan a medida que el suelo se va saturando de agua de lluvia. Es el agua que va a alimentar principalmente, durante el evento lluvioso y en el momento inmediatamente después del mismo, a los cauces superficiales que existen en el área donde se producen las precipitaciones. Por este motivo, es necesario conocer la lluvia neta que pasará a formar parte de la escorrentía superficial. Para ello, se calcula el coeficiente de escorrentía, dependiente de la precipitación y de las llamadas abstracciones iniciales, o cantidad de agua que va a ser retenida y, por lo tanto, no es efectiva para producir caudales. Esto dependerá de las características físicas de la cuenca.

En el presente trabajo se va a utilizar la siguiente expresión para calcular el coeficiente de escorrentía (C):

$$C = \frac{(Pd - Po)(Pd + 23\ Po)}{(Pd + 11\ Po)2}$$

Dicho coeficiente es función de la precipitación total diaria correspondiente a un período de retorno Pd (mm) y del umbral de escorrentía P_o (mm).

Por otro lado, el umbral de escorrentía P_o es función de parámetros específicos de cada cuenca como son: usos del suelo, pendiente del terreno, características hidrológicas (infiltración), grupo de suelo. Para llegar a conocer su valor se han integrado los mapas de pendientes del terreno, usos del suelo y grupo de suelo (este último relacionado con el mapa litológico obtenido mediante el trabajo de campo). A partir de dicha integración se obtiene un mapa de zonas de escorrentía a las que se asigna un factor de permeabilidad determinado. Este factor se multiplica por el área planimetrada de cada zona. Mediante la ponderación del porcentaje que representa cada uno respecto al área total de la cuenca, se obtiene el valor del umbral de escorrentía que corresponde a la cuenca. Una vez obtenido este valor, se multiplica por un coeficiente corrector regional, que en este caso se ha tomado igual a 2. Se toma este valor por corresponder con el área de máxima precipitación en España, con valores que se acercan a los existentes en la zona de trabajo. Una vez mas, se utilizan datos españoles por no haber disponible datos nacionales.

El valor obtenido para el umbral de escorrentía ha sido P_o = 22.56 mm. Esto significa que a partir de esta valor de la precipitación, el agua que cae no se infiltra en su totalidad, sino que parte de ella circula por la superficie del terreno.

Cálculo de caudales máximos

El cálculo de caudales se ha llevado a cabo mediante el método de caudales de Témez método racional, utilizando la expresión:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6} \times K$$

C= coeficiente de escorrentía
I= Intensidad media (It)
A= Area de la cuenca

K= constante que depende del tiempo de concentración (Tc):

$$K = 1 + \frac{Tc^{1.25}}{Tc^{1.25} + 14}$$

En la Tabla 7.5 se muestran los resultados obtenidos. En ella se dan los valores calculados para los diferentes períodos de retorno considerados: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. La estación Placitas es la que obtiene unos valores mayores de precipitación y por eso los cálculos de caudal se han realizado con sus datos, ya que son los que generan un volumen de agua mayor.

Tabla 7.5 .- Caudales obtenidos para distintos periodos de retorno.

Estacion Placitas					
T (años)	**Área (km^2)**	**Pd (mm)**	**I_t (mm/min)**	**C**	**Q (m^3/s)**
2	43.1	145.40527	0.71	0.53	**86.14**
5	43.1	238.513318	1.17	0.69	**185.21**
10	43.1	300.158948	1.48	0.76	**255.24**
25	43.1	378.048364	1.86	0.81	**345.65**
50	43.1	435.831183	2.14	0.84	**413.30**
100	43.1	493.187342	2.42	0.87	**480.62**
200	43.1	550.334218	2.70	0.89	**547.70**
500	43.1	625.728671	3.08	0.90	**636.09**

En el análisis de precipitaciones se han usado los datos obtenidos para realizar simulaciones en ordenador y obtener las zonas de inundación de la quebrada el Tránsito.

Para este objetivo se usaron los programas informáticos ArcView y Hec-Ras.

ArcView es un programa de información geográfica (SIG) sobre el que se trabajó para digitalizar los cauces de las quebradas sobre una base topográfica, definir los *Banks* (zonas de desbordamiento), secciones transversales, líneas de flujo y coeficientes de rugosidad. Mención tiene, que tal digitalización se hizo sobre las curvas de nivel a escala 1:25000, cuando lo ideal para obtener un resultado de alta fiabilidad es hacerlo

sobre una escala 1:5000. Por este motivo pueden generarse diferencias entre los gráficos obtenidos y la realidad.

Otra mención es que este programa tiene la limitación de trabajar sólo con caudales líquidos, sin tener en cuenta la carga sólida que puede llevar el fluido. Este hecho supone una limitación importante, dado que el fluido que circula por las quebradas y el río durante los eventos tormentosos lleva una importante carga sólida.

El modelo comprende varias opciones de modelización, de las cuales se han considerado las siguientes:

- Flujo subcrítico: Se trata del tipo de flujo que aparece en flujos hiperconcentrados. Se caracterizan por ser fluidos newtonianos, en los que no hay suficiente agua como para que se comporten como fluidos puros. El régimen de flujo suele estar comprendido entre turbulento y laminar, más cerca del primero. Esto significa que muy pocas veces son capaces de alcanzar el régimen de flujo supercrítico.

- Rugosidad: Para el cálculo de rugosidad de Manning se utilizo el mapa de usos de suelo del MARN (Ministerio de Medio Ambiente) generado para el SIG y se le otorgó los valores expresados en la siguiente tabla a cada tipo de suelo:

TIPO de USO	N_MANNING
Café	0.075
Lava	0.030
Pastos y granos básicos	0.060
Bosques naturales	0.100
Areas urbanas	0.013
Caña de azúcar	0.070

- Caudales: Los caudales considerados han sido los obtenidos en el cálculo hidrometeorológico para los distintos periodos de retorno.

- Geometría: Se han realizado 22 perfiles a lo largo de todo el río tal como se observa en la figura 7.1.

Todos estos datos se exportan al programa Hec-Ras para introducirle las variables de caudales máximos esperables en un determinado tiempo, y de esta manera que calcule las áreas de inundación. El uso de ArcView a la vez que acelera el proceso de introducción de datos, da mayor realismo en los cálculos ya que los datos geográficos han sido sacados directamente del sistema de información geográfica siempre teniendo en cuenta las limitaciones antes mencionadas.

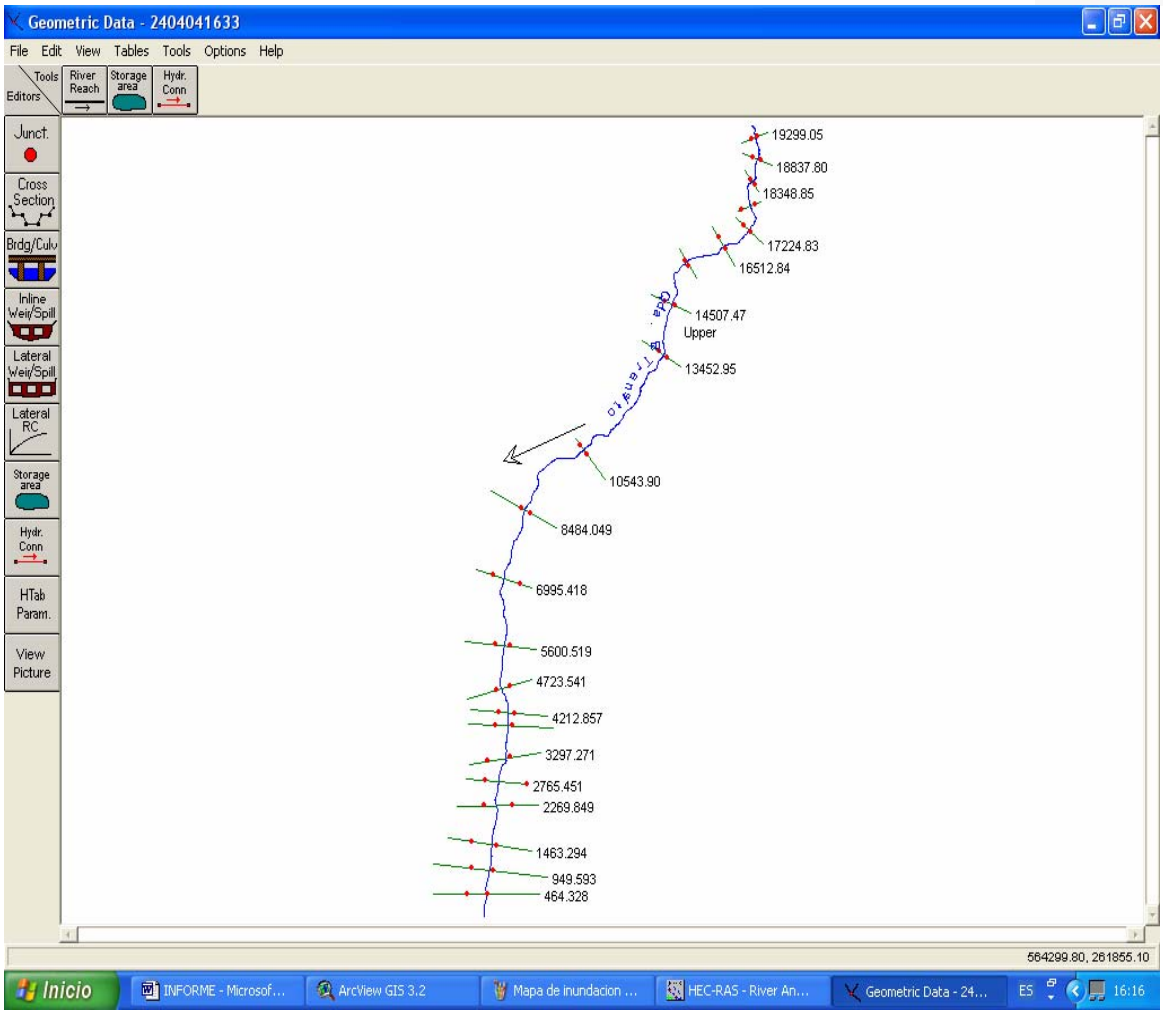


Figura 7.1. Datos geográficos exportados de ArcView a Hec-Ras

Los cálculos han sido realizados introduciendo al programa Hec-Ras unas condiciones iniciales de flujo constante como si de un río se tratase. Esto no es totalmente cierto ya que las quebradas actúan estacionalmente durante el invierno y mas concretamente en lluvias intensas. Por esta circunstancia se le ha introducido al programa unas condiciones de lámina de agua de 0.0004 metros para considerar un caudal mínimo.

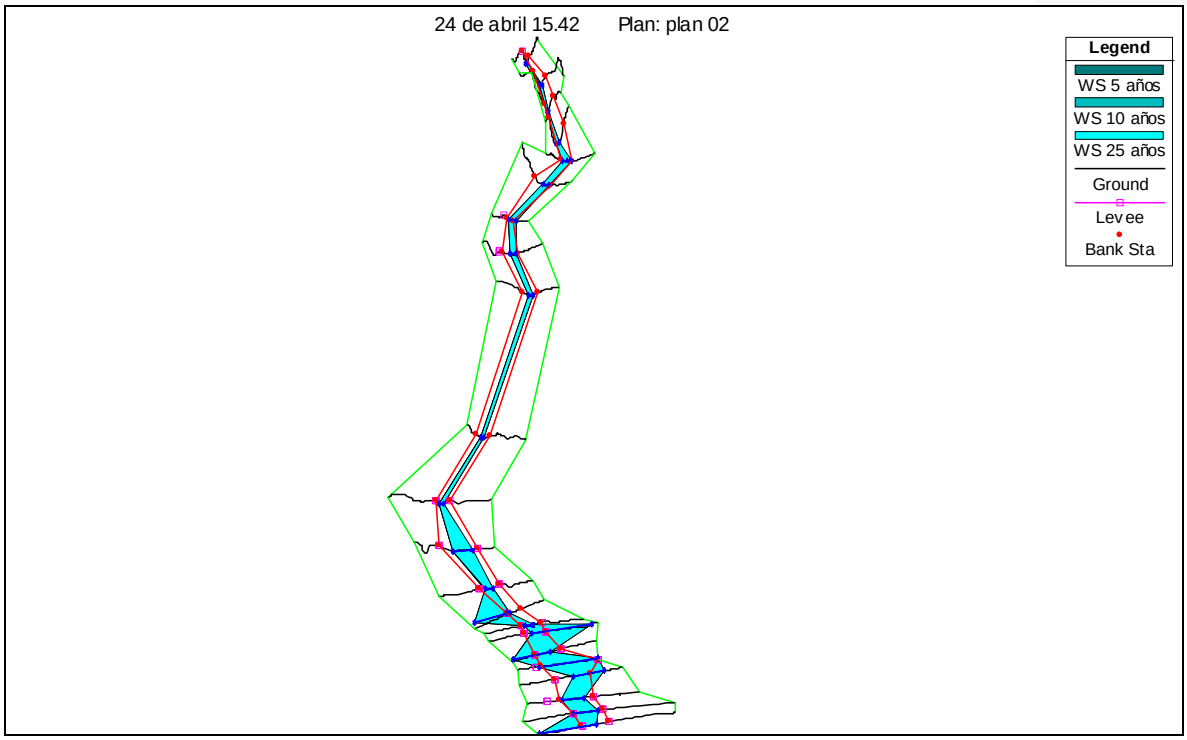


Figura 7.2. Zonas de inundación de la Quebrada el Tránsito

Se han supuesto condiciones de periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años porque son los años en que mas recientemente pueden producirse esas lluvias y también porque los cálculos son mucho mas fiables en series cortas de tiempo que por ejemplo en periodos de retorno de 100 años. Asimismo no se vio la utilidad de calcular inundaciones a 100 años vista lo que implicaría construcciones poco realistas con las predicciones a corto y medio plazo de los caudales. Además hay que considerar la alta dinámica de las quebradas que varían su curso a lo largo de los años modificando las zonas de deposición y erosión a lo largo de su cauce en relativamente poco tiempo.

Las zonas mas afectadas son las zonas llanas de la quebrada. Desde la parte alta de la quebrada, el agua se encaja por el valle debido a la alta pendiente y va adquiriendo velocidad. Al llegar a las zonas bajas todo el volumen de agua se expande inundando el mayor área del cauce de la quebrada debido a un descenso considerable de la pendiente. Si bien como se observa en la figura 7.3, las inundaciones se producen hacia la zona occidental del cauce para un tiempo de retorno estimado de 25 años.

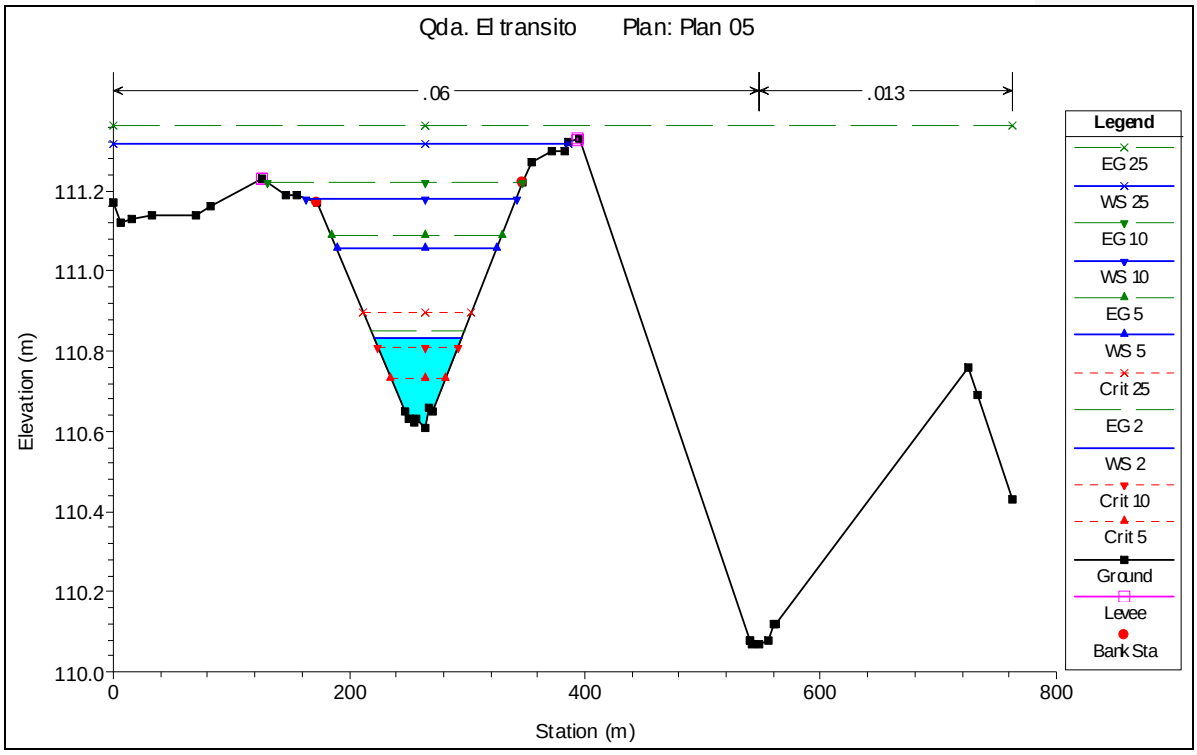


Figura 7.3. Sección transversal en la parte baja de la quebrada

En general, los resultados obtenido con la simulación por ordenador, corresponden a las zonas que plantean un mayor problema cuando por la quebrada baja la "correntada". Estas zonas están situadas a la altura de San Rafael Oriente y El Tránsito. En la actualidad estas zonas no tienen problemas graves de desbordamientos por las obras de mitigación realizadas en estos tramos, si bien por muros o por bordas hechas con el propio material que arrastra la quebrada. No obstante, las zonas de inundación predichas por el programa coinciden con bastante exactitud con las que tradicionalmente sufrían estas "correntadas" (figura 7.4). Las zonas aledañas a la Quebrada en la zona de El Tránsito, sufren inundaciones de láminas milimétricas en su parte oriental cuando hay presencia de lluvias intensas.

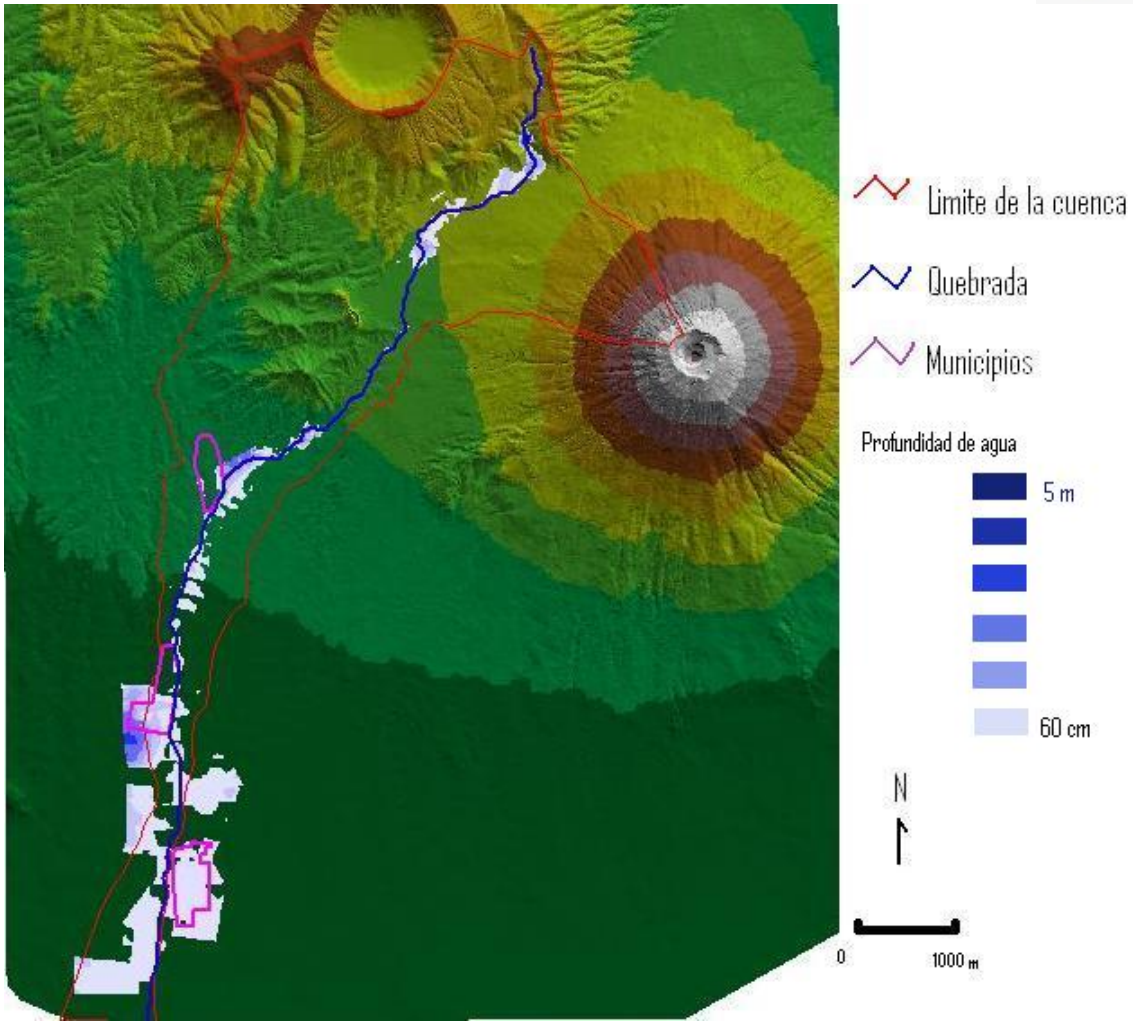


Figura 7.4. Zonas y profundidad de inundación

7.2. Análisis de inestabilidades de ladera

Las inestabilidades de ladera son los procesos de erosión que aportan material susceptible de ser arrastrado durante la época lluviosa a las quebradas. Cuando esto ocurre, la dinámica de la quebrada se ve alterada, lo que provoca que pueda existir un cambio del cauce más o menos importante, con el consiguiente problema de inundaciones y avenidas en la misma. Además, el proceso erosivo da lugar a la pérdida de suelo fértil de las tierras de labor que rodean a las quebradas.

Para que se produzca una inestabilidad en las laderas, es preciso que se rompa el equilibrio natural que permite que los materiales estén en reposo. Este equilibrio depende de dos fuerzas, por una parte la resistencia, que impide el movimiento; y por otra, el esfuerzo cortante, que tiende a que se produzca el movimiento y es consecuencia directa de la gravedad terrestre.

En este capítulo se realiza una caracterización de las inestabilidades identificadas en el área de estudio en cuanto a su tipología. Para ello, se ha realizado un inventario en el que se reflejan las características de estas zonas y su localización, representada mediante la cartografía de las áreas afectadas.

Así mismo, se han caracterizado los factores condicionante y desencadenantes de estos procesos, con el objetivo de facilitar un mayor entendimiento de su dinámica.

Los factores condicionantes o internos son de carácter natural, es decir, las características propias del terreno, y son los que establecen las características resistentes de las laderas. Son los que determinan en qué punto concreto se puede generar un movimiento de ladera, definiendo principalmente la tipología, el mecanismo y el modelo de rotura. En una palabra, son los que van a hacer más o menos vulnerable al terreno a la ocurrencia del fenómeno estudiado. Se han considerado como factores condicionantes los siguientes: pendiente, litología, vegetación, y procesos activos.

La identificación e integración de estos factores y el inventario de inestabilidades han sido la base para el análisis de susceptibilidad y la elaboración del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera en el área de estudio.

Por otro lado, los factores desencadenantes o externos pueden ser de carácter natural o antrópico, y son los que permiten un aumento del esfuerzo cortante, produciendo variaciones en las condiciones de estabilidad y rompiendo el equilibrio. Factores desencadenantes pueden ser sismo, precipitaciones, modificación de la geometría de las laderas, etc. Estos factores determinan el momento de ocurrencia de un proceso y son responsables, en gran medida, de la magnitud de los movimientos.

7.2.1. Caracterización de la amenaza

Mediante el estudio de la fotografía aérea y el trabajo de campo se ha llevado a cabo la identificación de inestabilidades de ladera en el área estudiada. Fueron cartografiadas e inventariadas, con el fin de analizar tipología, dimensiones, depósitos asociados, grado de desarrollo, grado de estabilidad, entre otras características. Teniendo en cuenta la dificultad de acceso y la escala de trabajo y el tiempo disponible no ha sido posible caracterizar todas las inestabilidades existentes; no obstante, se considera que se han caracterizado todas las tipologías de movimientos de ladera existentes, así como los materiales y las zonas en las que se pueden producir.

De forma general, en el área estudiada, se han podido diferenciar tres tipos de movimientos de ladera: deslizamientos, desprendimientos y flujos.

7.2.1.1. Deslizamientos

El tipo de deslizamientos identificados en la zona de trabajo corresponden a dos tipos: traslacionales y rotacionales.

La mayoría de este tipo de movimientos ha sido clasificado dentro de la categoría de traslacionales, sólo se encontró uno de tipo rotacional.

Los deslizamientos traslacionales se han encontrado dentro en los márgenes de las quebradas, con una inclinación superior a 30º. Afectan generalmente al suelo vegetal y se caracterizan por ser poco profundos.

Derrumbe traslacional

Este tipo de movimientos se producen a favor de la rotura generada por la existencia de planos de debilidad con dirección más o menos paralela a la superficie del talud e inclinación menor o igual que la del mismo. Generalmente se trata de superficies de discontinuidad estructural o de contacto entre materiales de distinta competencia. En el caso de las formaciones afectadas por estas inestabilidades, ha sido la superficie de contacto entre el suelo vegetal y el sustrato rocoso la que ha servido como superficie de rotura.

En general se trata de acontecimientos de pequeñas dimensiones, que no sobrepasan los 25 m^2 de superficie y el metro de espesor, es decir, inferiores a 25 m^3 de volumen. Son, en su mayoría recientes, aunque se han podido identificar algunos ya recubiertos por la vegetación, sin que esto signifique que sean fósiles, ya que dicha vegetación tiende a colonizar estas zonas rápidamente.

Deslizamiento rotacional en la Qda. El Transito

En cuanto a su grado de estabilidad, estas inestabilidades deben clasificarse como latentes, ya que a pesar que en el momento de su reconocimientos el material descansaba sobre el ángulo de estabilidad natural, la socavación a la que se ven sometidos durante la época en que funciona la quebrada, vuelve a desestabilizar los materiales.

El único deslizamiento rotacional encontrado en la zona de estudio se produjo durante el último movimiento sísmico importante del país. Se trata de un fractura concoidea con un salto de aproximadamente tres metros, desarrollada en materiales que son el reflejo de eventos de sedimentación de los que fueron arrastrados desde la parte alta del volcán hacia la más baja por medio de transporte fluido. En ellos se observan alguna estructura

grosera de laminación. Este movimiento se ha desarrollado sobre el margen derecho de la quebrada en un talud vertical.

7.2.1.2. Desprendimientos

Los desprendimientos son aquellos movimientos que conllevan la caída de bloques de un talud, individualizados por planos de rotura, con caída libre al menos en parte de su recorrido. Estos procesos de dan en taludes escarpados. El material se deposita a cotas más bajas o al pie del talud.

Desprendimiento con material medida bloque

Se ha distinguido desprendimientos en dos tipos de materiales. Por una parte los producidos en piroclastos de tamaños de grano lapilli y por otra parte los que se producen en los taludes rocas de tipo coladas de basalto-andesita, con un tamaño considerado bloque

Este tipo de movimiento se ha observado en taludes verticales o casi verticales. En el caso de los materiales granulares, las grietas que dan lugar a la individualización de los bloques son producidas por la acción de las raíces de la vegetación existente en el borde de la quebrada o por la tensión provocada por la acción de la gravedad que hace que el material tienda a situarse en las zonas más bajas. También pueden ser provocados por la erosión diferencial de material, provocando la socavación del bloque que sobresale.

Dependiendo del grado de cementación existente entre los granos, se van a producir desprendimientos de bloques que pueden llegar a tener 3m x 2m x 5m, es decir, unos 30 m^3. Estos tipos de movimientos son desencadenados por los movimientos sísmicos o por las precipitaciones,

Cuando se producen en los taludes verticales de las quebradas con material granular, se acumula el material a su pie, de una manera totalmente disgregado o en bloques de diferentes tamaños que se rompen al chocar contra el fondo de la quebrada, dando tamaños muy variables, dependiendo del grado de cementación de los mismos.

Los observados en las zonas donde existe una alternancia de materiales, éstos se producen por el descalzado de los bloques, ya que los materiales que hay debajo de ellos son erosionados, dejándolos sin apoyo. Se rompen según fracturas o planos de debilidad ya existentes en las mismas. Los depósitos implican bloques de tamaño decimétrico a métrico y con un volumen máximo aproximado de 3 m^3.

7.2.1.3. Flujos

Se trata de movimientos caracterizados por su alto contenido en agua. El material desplazado no mantiene la forma original, adoptando, normalmente, morfología lobulada.

Pequeño flujo de material lapilli

Este tipo de movimientos se han observado en el fondo de las quebradas en las que se han podido ver dos depósitos de material granular de tamaño de grano lapilli. Este material está depositado en forma lobular dentro de la propia quebrada, en una zona donde la pendiente desciende y donde el agua que lleva estos materiales se filtra o se pierde rápidamente. Tienen dimensiones pequeñas, siendo el mayor de unos 25m x 10m x 2m, presentado un volumen máximo de 500 m^3 de materiales.

El factor desencadenante de estos movimientos son las precipitaciones que lavan el material ya existente y lo ponen en suspensión.

7.2.2. Caracterización de la susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera se basa en un estudio de todos los factores condicionantes de dichas inestabilidades. Este análisis permite identificar las áreas afectadas, así como aquellas potencialmente inestables, en las que confluyen una serie de factores que las hacen proclives a la inestabilidad.

Los factores condicionantes considerados han sido: litología, pendientes, procesos activos y usos del suelo, realizando un análisis y una cartografía de cada uno de ellos para el área de estudio.

Para la realización de cada uno de los mapas temáticos se ha empleado una metodología diferente. Los mapas de usos de suelo y pendientes se han elaborado a partir de los mapas de la base cartográfica digital de la UCA. Los mapas litológico y de procesos activos se han elaborado mediante trabajo de campo y fotografía aérea.

La integración de estos mapas ha dado lugar al Mapa de Susceptibilidad a las Inestabilidades de Ladera del área de trabajo.

Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera

La obtención del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera es un resultado del trabajo realizado, así como uno de los objetivos del mismo. Está basado en la cartografía obtenida durante el desarrollo del presente proyecto y en él se va a reflejar los distintos grados de susceptibilidad por inestabilidades existentes en el área de trabajo. Así mismo, se considera una herramienta importante de trabajo a la hora de hacer una planificación del uso del territorio por parte de las alcaldías afectadas por estos procesos y que están dentro del área de trabajo.

Los factores considerados para realizar este mapa son la litología, la pendiente, los procesos activos y la vegetación o usos del suelo. Dentro de cada uno de ellos se ha establecido cuatro rangos diferentes, según su susceptibilidad. Para determinar estos rangos se ha tenido en cuenta las observaciones realizadas en el campo y los trabajos realizados con anterioridad dentro de Geólogos del Mundo

Factores condicionantes

Litología

Se ha basado en el Mapa Geológico 1:100.000 realizado por la misión alemana. Sólo se ha introducido una ligera modificación, diferenciando el cerro de Chambala de todo lo demás por el diferente comportamiento de los materiales que lo conforman. Así mismo, en este estudio no se planteó como objetivo el estudio de la geología en detalle.

Para la determinación del grado de susceptibilidad con respecto a la litología, dada la ausencia de un estudio detallado de las mismas, se han asociado las características geomecánicas, permeabilidad y grado de alteración, para poder determinar su afectación como factor condicionante. Por tanto, en el factor litológico van a quedar reflejadas las características del material, su grado de fracturación, estado de alteración, la disposición de los materiales de diferentes competencias y la permeabilidad de éstos.

Las propiedades de los materiales que definirán principalmente su resistencia, serán su cohesión y ángulo de rozamiento, parámetros que caracterizan tanto la matriz como las discontinuidades, en el caso de los materiales rocosos. Ambos parámetros definirán la competencia del material considerado, así como su respuesta ante los factores desencadenantes.

En el caso de las discontinuidades, éstas determinarán planos de debilidad del terreno, a favor de los cuales se pueden producir inestabilidades por un aumento de las presiones internas por infiltración de agua, o por rotura y pérdida de cohesión de los materiales, en el caso de cruce de dos o más fracturas.

El grado de alteración de un material va a condicionar los parámetros resistentes del mismo. De esta manera, si el grado de alteración es alto, la

cohesión y el ángulo de rozamiento que caracterizan una determinada litología se verán reducidos, contribuyendo a inestabilizar el material.

La diferencia de competencia entre los materiales, además de variar las características geomecánicas de los depósitos, tiene una gran importancia, dado que puede dar lugar a una erosión diferencial que afecte en mayor medida a los materiales más vulnerables, quedando desprotegidos los niveles más competentes por el descalce producido y, por tanto, más susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades.

El grado de permeabilidad determina la cantidad de agua que puede infiltrarse en un terreno, aumentando la presión interna y disminuyendo así la cohesión y estabilidad. Existen dos tipos de permeabilidad, según esté asociada a la porosidad del material, permeabilidad primaria, o a las diaclasas y fracturación, permeabilidad secundaria. La permeabilidad primaria está relacionada con la génesis de una litología, es decir, aquella dada por el vacío que puede quedar entre las partículas que forman la roca o el suelo. La permeabilidad secundaria, también llamada postdeposicional, es adquirida después de su formación y se asocia principalmente a fisuras, fracturas o cualquier discontinuidad. Los planos de discontinuidad facilitan la percolación de agua, aumentando las tensiones internas y aumentando, por tanto, la probabilidad de ocurrencia de movimientos gravitatorios, especialmente si dichos planos son paralelos a las líneas de pendiente.

A partir de estas características se han definido los rangos de susceptibilidad para los distintos tipos de litologías presentes en la zona de estudio.

Rango 4: Es el rango de mayor susceptibilidad. Se consideran de este rango los materiales cuaternarios y los materiales piroclásticos de tamaño lapilli con características escoriáceas.

Los materiales cuaternarios son depósitos poco consolidados y con una alta porosidad. Presentan un tamaño de grano heterogéneo, ya que provienen del desmantelamiento de los materiales existentes en las laderas más escarpadas de los cráteres volcánicos, situándose al pie de los mismos, formando depósitos de morfología lobular y sin clasificación.

Los piroclastos de tamaño lapilli, con menos de 3 mm de diámetro, son materiales muy permeables. Las características de estos depósitos es la inexistencia de material aglutinante que una los clastos. Éstos se encuentran en contacto puntual entre sí, y lo que les permite tener estabilidad es el alto grado de rozamiento interno, si bien, la presencia de agua entre ellos hace que se desestabilicen con facilidad.

Rango 3: En este rango se incluyen las alternancias de coladas de lava basalto-andesíticas y piroclastos de tamaño bloque y lapilli.

Los basaltos observados en estas alternancias presentan un espesor entre 1 y 2 m de espesor. Se encuentran afectados por una red de fracturas que son las que les otorga una cierta porosidad, aunque se considera baja.

Los espesores de piroclastos llegan a tener 4 m de potencia. Son clastos de color rojizo o gris oscuro, con contacto puntual entre ellos y con los más pequeños introducidos en los huecos que dejan los de mayor tamaño. Cerca de las coladas de basalto presentan un contacto plano debido al calentamiento de los mismos que les permite tener una cierta plasticidad. Estos materiales presentan una porosidad primaria alta.

Al presentar esta alternancia, el contacto entre ambas litologías da lugar a planos de debilidad, ya que debido a la menor porosidad de los basaltos, éste nivel funciona como un plano por donde puede circular una lámina de agua, pudiendo arrastrar a los clastos del material menos consolidado de los piroclastos.

Rango 2: Con este grado de susceptibilidad se consideran los materiales que presentan una matriz fina en la cual están inmersos clastos más o menos heterogéneos. La consolidación observada en estos materiales es alta.

Se incluyen las tobas de color café y aquellas que tienen intercaladas niveles de epiclastitas ácidas. También, los materiales existentes en la parte alta del volcán Chaparrastique que tienen un aspecto conglomerático con clastos altamente heterogéneos. Este material presenta una porosidad primaria muy baja, viéndose incrementada por la secundaria debida a la fisuración del mismo.

Rango 1: Esta es la litología menos susceptible. Son coladas de lava consolidadas. Corresponden a los flujos emitidos por el volcán por las diferentes bocas secundarias que se encuentran repartidas en las diferentes partes de la ladera del volcán Chaparrastique.

Pendientes

Este mapa se ha elaborado a partir de la base cartográfica ya existente en 3D con una escala 1:25.000.

Los movimientos gravitatorios se generan en el momento en el que se altera el equilibrio de fuerzas existente en un talud. En este sentido, la pendiente condiciona la estabilidad de una ladera, ya que con ella varían las componentes, tanto de las fuerzas favorables al movimiento, como de las fuerzas resistentes al mismo, y que determinan su equilibrio. Al aumentar la pendiente aumenta la componente tangencial de la gravedad, que es una de las fuerzas desestabilizadoras, y disminuye el rozamiento o resistencia a la cizalla (función de la componente normal de la gravedad), como fuerza estabilizadora. Por tanto, a mayores pendientes, será necesaria una mayor cohesión del talud para mantener el estado de equilibrio, así como unas presiones de agua menores para que éste equilibrio se pierda.

Para el presente trabajo se han diferenciado cuatro rangos de susceptibilidad. Son los siguientes:

Rango 4**: El de mayor susceptibilidad, comprendería aquellas pendientes con un porcentaje superior al 50%.**

Rango 3**: Las pendientes consideradas estarían comprendidas entre el 30 y el 50%**

Rango 2**: Los valores de inclinación de estas pendientes varían entre 15 y 30%**

Rango 1**: Son las que presentan una menor susceptibilidad, y por lo tanto, menos vulnerables. Su inclinación es menor del 15%.**

Procesos activos

En él se representan los procesos geológicos que están actuando en la zona de trabajo. En este caso se han agrupado en dos grupos: procesos hídricos y gravitatorios.

En el primer apartado se incluyen aquellos en los que el agua tiene un papel primordial, como son la actividad erosiva, de transporte y sedimentación existentes en las quebradas o la acción de la lluvia sobre los terrenos desnudos o con menos cobertera..

En el segundo se incluyen los procesos en los cuales la gravedad es el principal agente, es el caso de la caída de rocas que pueda existir en las partes altas de los taludes.

Este tipo de procesos se presenta mediante distintos mecanismos como pueden ser el impacto de las gotas de lluvia, la escorrentía, la dinámica torrencial y la acción gravitatoria.

En el caso del impacto de las gotas de lluvia, éste está determinado por la existencia o no de cobertera vegetal, que puede absorber la energía de las gotas y disminuir la erosión y transporte de partículas. La erosión por salpicadura toma mayor importancia en suelos cultivados sobre los que no se han tomado medidas de protección y en las laderas carentes de cobertera vegetal, especialmente a mayor pendiente y menor cohesión de las partículas del suelo o la roca.

La escorrentía superficial es función de la intensidad de la precipitación, de la capacidad de infiltración y del lugar de la vertiente. Cuando el suelo absorbe toda la precipitación no se produce escorrentía. Si la cantidad de precipitación es mayor a la velocidad de infiltración máxima, el exceso de volumen discurrirá por la superficie. En la parte superior de la vertiente, el flujo es ante todo laminar, haciéndose más turbulento al aumentar el caudal y la velocidad. Agravan este proceso dos factores, la escasa cubierta de vegetación y las precipitaciones intensas en las tormentas locales. El flujo producto de la escorrentía superficial tiene varios efectos. Por un lado, la arroyada tiene un gran poder erosivo, que implica la pérdida de suelo y el consiguiente descalce de numerosos

bloques de basalto-andesita presentes en el área de estudio y que serán susceptibles de movilizarse. Por otro lado, las aguas tenderán a formar canales (arroyada en surcos). El desarrollo de estos canales dará lugar a nuevos torrentes, haciendo que estas zonas sean más susceptibles a la ocurrencia de procesos gravitatorios, así como a las inundaciones en las zonas más bajas de la ladera, donde desembocarían estos flujos canalizados.

La dinámica torrencial implica principalmente procesos de erosión en los cauces que afectarán a la base de las laderas, pudiendo desencadenar o contribuir a su desestabilización. Este efecto es muy intenso en la dinámica torrencial al tratarse de un proceso muy energético, con un mayor poder erosivo. Por otro lado, el efecto de los torrentes se amplifica al encontrarse en una red más encajada que afecta a laderas con un mayor volumen de material movilizable.

Los procesos influidos por la fuerza de la gravedad son los que provocan la caída de material de los escarpes con una mayor inclinación que presentan un disposición en de bloques diferenciados por fracturas o granos de roca sueltos. Estas inestabilidades ocurren con una mayor intensidad en los cráteres de los volcanes, sobre todo en el Chaparrastique, agravada por la existencia de fumarolas que alteran mucho más rápidamente las rocas.

Se han establecido los siguientes rangos:

Rango 4: Procesos gravitacionales

Rango 3: Proceso torrencial: parte baja de la quebrada

Rango 2: Proceso torrencial: parte alta de la quebrada

Rango 1: Proceso de lavado superficial (arroyada)

Usos de suelo

Este mapa ha sido realizado por la UCA a partir de imágenes satelitales a escala 1:25.000 del año 2001. En él están representados los tipos de cultivos existentes en el área de trabajo.

El papel de la vegetación como factor condicionante está relacionado con efectos como la sujeción que ejercen las raíces y la desecación, regulando el contenido de agua en el suelo, uno de los agentes principales de inestabilidad. Por otra parte, la cobertura vegetal permite la infiltración efectiva de la precipitación, evitando la erosión debida a la escorrentía y al impacto de las gotas de lluvia al caer sobre el suelo.

Para este factor se han definido los siguientes rangos según las condiciones en las que se encuentre, bien normales o después de haber sufrido un incendio:

Rango 4**: El de más alta vulnerabilidad. Estarían los suelos desnudos y los potreros y cultivos estacionales si han sufrido quemas.**

Rango 3**: Potrero y cultivos permanentes y bosques si han sufrido incendios.**

Rango 2**: Cultivos estacionales**

Rango 1**: Cultivos permanentes y bosques**

7.2.3. Mapa de susceptibilidad

En el mapa de susceptibilidad sólo existe una zona de valor muy alto, situado en el cráter del volcán Chaparrastique, donde existen unos procesos gravitacionales muy activos, acelerados por la alteración de las rocas debida a la acción fumarólica.

Las zonas de alta susceptibilidad se encuentran en la parte desnuda del volcán Chaparrastique y en las partes altas del cerro de Chambala, donde se han observado inestabilidades y movimientos en las laderas con más pendiente de las quebradas. Así mismo, las partes altas de las quebradas y aquellas con una actividad torrencial mayor aparecen en esta categoría.

Las mayoría del territorio se clasifica como zona de susceptibilidad media, bien porque se trata de zonas de escasa pendiente o porque presentan una cobertera vegetal importante.

Por último, las zonas de susceptibilidad baja se restringen a las zona pobladas y con menor pendiente. En esta categoría entran los tres pueblos importantes de la zona: San Jorge. San Rafael Oriente y El Tránsito.

8. SITEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT)

Un sistema de alerta sistema es una herramienta con la cual se pretende mitigar , mediante la prevención, el riesgo a que una población está expuesta con respecto a un evento natural. En este caso se trataría de minimizar el riesgo frente a los lahares y "correntadas" o avenidas que pudieran venir de la parte alta del volcán y que se encauzaran dentro de la quebrada de El Tránsito.

Dentro de la zona de trabajo se encuentran las comunidades de Chambala, y los pueblos de San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito. Se consideran las comunidades de Chambala las más expuestas, ya que están en la zona más elevada de la quebrada y en una zona con una susceptibilidad alta con respecto a los movimientos de ladera, además de las avenidas que puedan bajar por las quebradas. Las otras comunidades van a estar expuestas a las "correntadas" que pueden bajar por la quebrada de El Tránsito.

En la actualidad, sólo existe un comité de emergencia en funcionamiento, en concreto en el cerro de Chambala. En las otras poblaciones, estos comités están en fase de formación, por medio del apoyo de las ONG´s locales.

Para definir y diseñar este sistema se han tenido en cuenta tres factores; uno en función del riesgo existente (lahares y avenidas), otro que nos permita conocer a partir de cuando se puede desencadenar el fenómeno y un tercero que nos permite conocer el tiempo de que se dispone para poner en funcionamiento el sistema de alarma.

Estos factores son:

- Definir la magnitud y alcance de la amenaza
- Factores desencadenantes de la amenaza
- La evolución temporal del fenómeno

8.1. Magnitud y alcance de la amenaza

Este primer factor se ha tratado de definir mediante el estudio de campo, tanto para observar los depósitos dejados por los lahares y las avenidas, como para conocer por medio de encuestas personales a los habitantes de la zona su localización, alcance y dimensiones. También se ha realizado un estudio bibliográfico de los trabajos anteriores realizados en el área de trabajo.

A la hora de describir los depósitos producidos por estos eventos, no sólo se ha limitado el área de observación a la quebrada de El Tránsito, sino también, a todas las quebradas que surcan la falda sur del volcán Chaparrastique. En la quebrada de El Tránsito no se

han podido observar depósitos de este tipo directamente porque existe una fuerte actividad extractiva de material y de modificación de márgenes mediante obras de mitigación para evitar que afecte a las comunidades asentadas en sus orillas.

Por esto, se han recorrido las quebradas adyacentes a la misma, donde se han podido observar depósitos ya consolidados de estos eventos, sin que se haya podido identificar ninguno reciente.

Estos depósitos antiguos afloran en los márgenes de las quebradas de la parte baja de la misma, a la altura de la carretera de El Litoral. Existen varios tipos de depósitos, caracterizados, principalmente, por su granulometría y por su estructura interna.

Los tipos de depósitos observados son los siguientes:

- Depósitos formados por capas de 0’5 a 1 m de espesor con un aspecto conglomerático donde clastos de basalto-andesita están embebidos dentro de una matriz arenosa de tamaño de grano medio-grueso. Estos clastos tienen un tamaño comprendido entre 5 y 20 cm, están matriz-soportados, si bien existen algunos contactos puntuales entre ellos. Presentan una cierta organización interna al tener el eje más largo de los mismos paralelo a la dirección de la corriente. Son depósitos consolidados.

- Depósitos formados por arenas de tamaño de grano grueso, con laminación convoluted y/o planar. Son depósitos de 1 m de espesor que aparecen alternando con los anteriores. Están también consolidados. Esta estructura interna nos indica que fueron dejados por flujos con una alta densidad que acarreaban una importante carga de material.

- Corresponden a los que están a una altura de unos 200 msnm, observables, sobre todo, en los campo de cultivo. Están compuestos por material de tamaño de grano lapilli (de unos 3mm), en sets de entre 0’5 y 1’5 m. Son de color gris oscuro y rojizo y no presentan una consolidación fuerte, pero sí la suficiente como para desprenderse en bloques que no pierden su cohesión al caer al fondo de la quebrada, aunque se pueden desprender los granos con la mano. Presentan una laminación interna planar grosera.

- Los depósitos más modernos observados fueron los depositados en el fondo de la quebrada de El Tránsito, en la parte media de la misma. Corresponden a dos lahares de pequeño tamaño que se depositaron en su lecho. Al de mayor tamaño se le estimaron unos 500 m^3 de material y al otro unos 20 m^3. Se trata de depósitos formados por material tamaño lapilli, de color rojizo o gris oscuro, proveniente del desmantelamiento de los márgenes de las quebradas que drenan el cerro de Chambala. Se depositan en forma de lengua en el fondo de la quebrada. En esta categoría también se incluyen los depósitos arenosos que tapizan el fondo de la quebrada y son dejados por las avenidas.

Aparte de estas observaciones directas, los datos aportados por los habitantes de la zona de trabajo no han sido muy reveladores, ya que no han reportado ningún dato sobre

lahares, en cambio sí sobre inestabilidades de laderas en las quebradas, la mayoría asociadas a los últimos terremotos importantes. En relación con las avenidas, la población sólo recuerda una correntada importante, con la quebrada llena, cuando el huracán Mitch afectó a la región. No obstante, esto no quiere decir que no haya tenido lugar ningún lahar en la zona estudiada, ya que, como se ha podido comprobar en otras ocasiones, estos acontecimientos se suelen olvidar con cierta frecuencia de la memoria histórica. Otro factor es que muchos habitantes tienen poco tiempo de vivir en la zona, por lo que tampoco pueden aportar datos históricos sobre la misma.

Por otro lado, los datos históricos encontrados no se refieren a las quebradas de la vertiente sur, sino de la norte. Estos datos han sido tomados de un trabajo anterior donde se realizó un estudio similar dentro del programa DIPECHO II, también con el objetivo de situar un sistema de alerta temprana en la ladera norte del volcán Chaparrastique, estudiando en detalle la quebrada La Arenera.

De este estudio se han obtenido los siguientes datos históricos:

Fecha	**Quebrada**	**Origen**	**Sedimentos (potencia)**	**Desborde**	**Daños**
19/06/1945	Quebradona	Fuerte tormenta en año de incendios	¿?	Si	Casa y calles aterradas
06/05/1951	La Silva y Mª Chavez	Lluvia fuerte	Arena y lodo (1 m)	Si	Ateramiento de calle
05/1965	La Arenera	Lluvia muy fuerte	Bloques y Lapilli (2 m)	Si	Casa y calles aterradas
15/09/1965	La Arenera	Lluvia fuerte solo en el cerro	¿? (1 m)	¿?	¿?
08/05/1975	La Piedrita	Lluvia	Arenas, material fino (1 m)	No	Niña muerta
07/05/1985	La Placita	Lluvia	Gravas arenas y algún bloque (1,5 m)	Si	Casa aterrada, corte de carretera
28/09/1992	La arenera	Lluvia	125 Estación 5000 pies (1,5 m)	Si	Corte de calle y casas soterradas
26/08/2000	La arenera	Lluvia fuerte en el cerro	Gravas, arena, palos y algún bloque (1,5 m)	2 – 3 Madrugada	Corte de calle y casas soterradas
06/09/2001	La arenera	Lluvias	Arenas y gravas	No	Relleno de borda de

					contención

Como se ha podido observar, se han encontrado los siguientes depósitos:

- Lahares o flujos hiperconcentrados a alturas de unos 100 msnm, si bien son depósitos antiguos ya consolidados. No se puede estimar su volumen porque aparecen en los aflorando en los cortes de las quebradas sin poder observar su extensión.
- Otros, de edad más reciente, son los que aparecen sobre los 200 msnm, menos consolidados y compuestos por lapilli.
- Por último, los lahares actuales observados aparecen dentro de las quebradas, también de material de tamaño lapilli y a una altura superior a las anteriores. No obstante, hay que tener en cuenta que todo los años la quebrada de El Tránsito recibe un importante aporte de sedimentos provenientes de "correntadas" durante la época lluviosa, si bien no se trata, en general, de flujos hiperconcentrados, sí son flujos con una alta carga de material sólido que rellenan los huecos dejados por la actividad extractiva que se lleva a cabo a lo largo del año del mencionado material a lo largo de toda la quebrada.

8.2. Factores desencadenantes de la amenaza

El agua es el elemento que pone en suspensión y se encarga de transportar el material suelto existente en las partes altas del volcán hacia las bajas, tomando como camino las quebradas. Lo hace en forma de "correntadas" que arrastran todo tipo de material hasta zonas con una menor pendiente donde lo depositan. Se puede decir, por lo tanto, que las lluvias son las causantes de los flujos que puedan tener lugar en el volcán Chaparrastique. Estas lluvias pueden ser caracterizadas por su intensidad, es decir, el volumen de agua caída en función del tiempo.

En El Salvador se producen tres tipos principales de lluvias asociadas a otras tantas situaciones climáticas. El desarrollo de tormentas locales por movimientos de aire convectivos debidos al calentamiento del aire húmedo del océano a lo largo del día y que en la estación lluviosa (mayo-septiembre) suelen dar como resultado la precipitación de grandes cantidades de agua en poco tiempo o lo que es lo mismo, precipitaciones de alta intensidad. Los eventos meteorológicos asociados a la presencia continuada de bajas presiones atmosféricas, situaciones ciclónicas debidas a la zona de convergencia tropical (Perla, Alfaro y Domínguez, 1990), dan lugar a periodos de lluvias prolongados en el tiempo, con duraciones de varios días que, en general, dan lugar a grandes precipitaciones pero de baja intensidad relativa. Además, pueden existir situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del famoso huracán Mitch.

En el trabajo realizado dentro del programa DIPECHO II para la ladera norte del volcán Chaparrastique, se habían analizado nueve eventos con desarrollo de lahares de

diferente magnitud, disponiéndose sólo en tres de ellos de información sobre las precipitaciones caídas en ese día.

Después de estimar la magnitud de los eventos, la cantidad de agua caída durante el día y la duración de la lluvia, se llegó a una estimación de intensidad horaria que podría generar tres tipos de avenidas diferentes:

- Avenidas de magnitud baja: 20 mm/hora
- Avenidas de magnitud media: 40 mm/hora
- Avenidas de magnitud alta: 60 mm/hora

En este trabajo se estiman que los parámetros más importantes que van a determinar cuando una lluvia puede dar lugar a un lahar son:

- Cantidad total de lluvia desencadenante
- Duración de la lluvia
- Intensidad media del evento
- Cantidad de lluvia acumulada durante los 10 minutos más intensos

En el presente trabajo, el cálculo de la intensidad de lluvia necesaria para que se pueda producir un lahar, va a estar basado en la acumulación de lluvia existente en los cuatro días precedentes a que el fenómeno pueda tener lugar. Es sabido que la presencia de agua en el terreno tiende a desestabilizarlo debido a las presiones internas que provoca en los poros. Por eso, se considera importante tener en cuenta el grado de saturación de agua que puede tener el terreno, ya que de eso va a depender la intensidad de lluvia necesaria para que se ponga en movimiento el material.

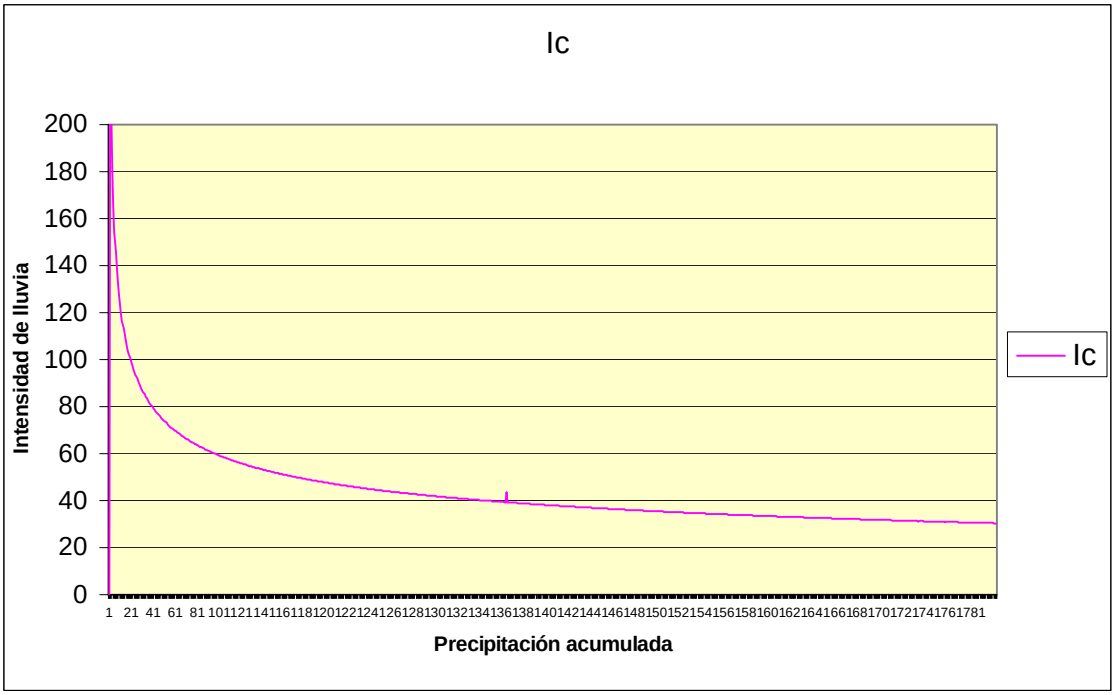
Para ello se va a utilizar la fórmula propuesta por Heyerdahl et al. (2003), y empleada en Nicaragua. Existen otras fórmula similares, propuestas por d'Orsi et al. (1997) y Chleborad (2000), pero se considera más representativa la utilizada en Nicaragua por estar dicho país situado en la misma región que El Salvador y presentar unas características similares. No obstante, esta fórmula debería ser revisada para El Salvador una vez se tengan datos más precisos sobre intensidad de precipitaciones y su relación con la ocurrencia de lahares.

La fórmula de Heyerdahl et al. (2003) es la siguiente:

$$I_c = 258 \times R_{96}^{-0.32}$$

I_c = Intensidad de lluvia
R_{96} = Precipitación acumulada en los últimos cuatro días

A partir de esta fórmula se obtiene la gráfica 8.1 donde se observa la relación existente entre la lluvia acumulada y la precipitación mínima necesaria para que se pueda producir la puesta en movimiento del material que puede dar lugar a los lahares.



Gráfica 8.1

No obstante, comparando la gráfica obtenida y los datos que se tienen de lluvia acumulada y de las intensidades que dieron lugar movimientos de materiales por las quebradas, estos no se ajustan a lo que cabría esperar en la gráfica. En concreto, para acumulaciones inferiores a 50 mm en los cuatro días anteriores al evento, los valores de intensidad de lluvia necesarios fueron menores que los esperados mediante la gráfica. Caso contrario ocurre para los valores superiores a 100 mm de acumulación, para los cuales se necesitó una mayor intensidad de lluvia que la pronosticada por la fórmula aplicada.

De todas maneras, los datos que se han comparado son muy escasos, ya que no existen registros de la relación entre la intensidad de lluvia y la aparición de estos eventos. Los dos lahares observados en el campo se encontraban situados en zonas de difícil acceso dentro de las quebradas, por donde no suele haber circulación de personas. Es por esto que la fórmula debe ser aplicada con un mayor número de datos y ajustada a los resultados obtenidos de la observación directa.

Durante el tiempo de trabajo de campo, sólo se ha podido relacionar un evento lahárico, en concreto el definido como de 50 m^3. En este caso, se ha podido comprobar que después de una precipitación de 81 mm caída en 2 horas, parece ser que dio lugar al pequeño lahar anterior y que en la quebrada de El Tránsito alcanzó la “correntada” una altura de 0’5 m a su paso por la población de El Tránsito, durante aproximadamente media hora, para luego bajar su nivel.

Por lo tanto, en base a estos pocos datos observados y al estudio previo realizado para la vertiente norte del volcán Chaparrastique durante el desarrollo del DIPECHO II, se puede concluir que la intensidad mínima que puede dar lugar a la aparición de lahares

en la zona estudiada es de 40 mm/hora. No obstante, este es un dato que necesita ser reajustado con las futuras observaciones que se hagan en la zona y que relacionen la aparición de estos eventos con la intensidad de lluvia caída en la zona.

8.3. Evolución temporal del fenómeno

El tiempo que transcurre entre que empieza a llover y que llega la "correntada" a las zonas habitadas depende de la distancia de la que estén de las partes altas del volcán donde tiene lugar el mayor aporte de agua.

Los datos obtenidos de los habitantes de la zona hablan de un tiempo de una media hora entre que empieza a llover y baja la "correntada" por la quebrada. Esto para las partes altas como puede ser el Cerro de Chambala. Para la parte más baja de la subcuenca, El Tránsito, este tiempo se estima en superior a una hora.

Teniendo en cuenta el análisis morfométrico realizado para la subcuenca, anteriormente explicado, el tiempo de concentración calculado para la quebrada de El tránsito es de aproximadamente 2 horas, según el método de Témez. Este es el tiempo que tarda en llegar una gota de agua desde la parte más alta de la subcuenca hasta el puente que existe en la carretera del Litoral y que pasa por debajo de él la quebrada.

Este tiempo se ha calculado teniendo en cuenta que la quebrada sólo va a llevar caudal líquido, cosa que no es cierta, ya que lo que realmente circula es una mezcla de líquido y sólido, por lo que el tiempo de concentración calculado será menor o igual que el real.

Pierson & Scot (1985), en sus estudios realizados de los lahares producidos después de la erupción del monte Santa Elena, obtuvieron una velocidad media para este tipo de flujos de 2'75 m/s. Velocidad menor que las del flujo de agua en avenidas, por lo que el resultado del tiempo de concentración obtenido debe tomarse como el valor mínimo para las alertas.

Si se calcula el tiempo mínimo que puede tardar en llegar hasta las poblaciones más importantes que recorre la quebrada, se obtienen los siguientes resultados:

POBLACIÓN	TIEMPO
Chambala	30 minutos
San Jorge	1 hora y 10 minutos
San Rafael Oriente	1 hora y 30 minutos
El Tránsito	2 horas

Este tiempo se calculó relacionando la distancia del punto del que pueden partir los lahares con la velocidad que pueden desarrollar.

Mediante el cálculo de la cantidad de material potencial que podría ser puesto en movimiento en caso de la ocurrencia de lluvias intensas, se usó el programa LaharZ para el análisis de las zonas de afectación.

Los lahares que arrastren un volumen de $1*10^6$ m^3 podrían suceder en la zona pero dentro de una probabilidad anual bajísima. Otros lahares medios (con volúmenes de entre 200000 m^3 y 500000 m^3), y pequeños (con volúmenes 100000 m^3), son volúmenes más típicos que podrían resultar de los desprendimientos de tierra iniciados por temblores o lluvias torrenciales.

Así pues, con base al examen de las probabilidades de ocurrencia de los desprendimientos de tierra y lahares de varios tamaños en otros volcanes principales dentro del país, es probable que los desprendimientos de tierra y lahares con dimensiones de $1*10^6$ m^3 o más tengan una probabilidad anual de ocurrencia menor a 1/10000. Es mucho mas probable que ocurran desprendimientos de tierra y lahares muchos mas pequeños, los lahares de aproximadamente 500000 m^3 o menos podrían tener una probabilidad anual de 1/100 o quizás hasta de 1/5.

En la siguiente figura se observa el resultado de la modelización para cada uno de los volúmenes estimados:

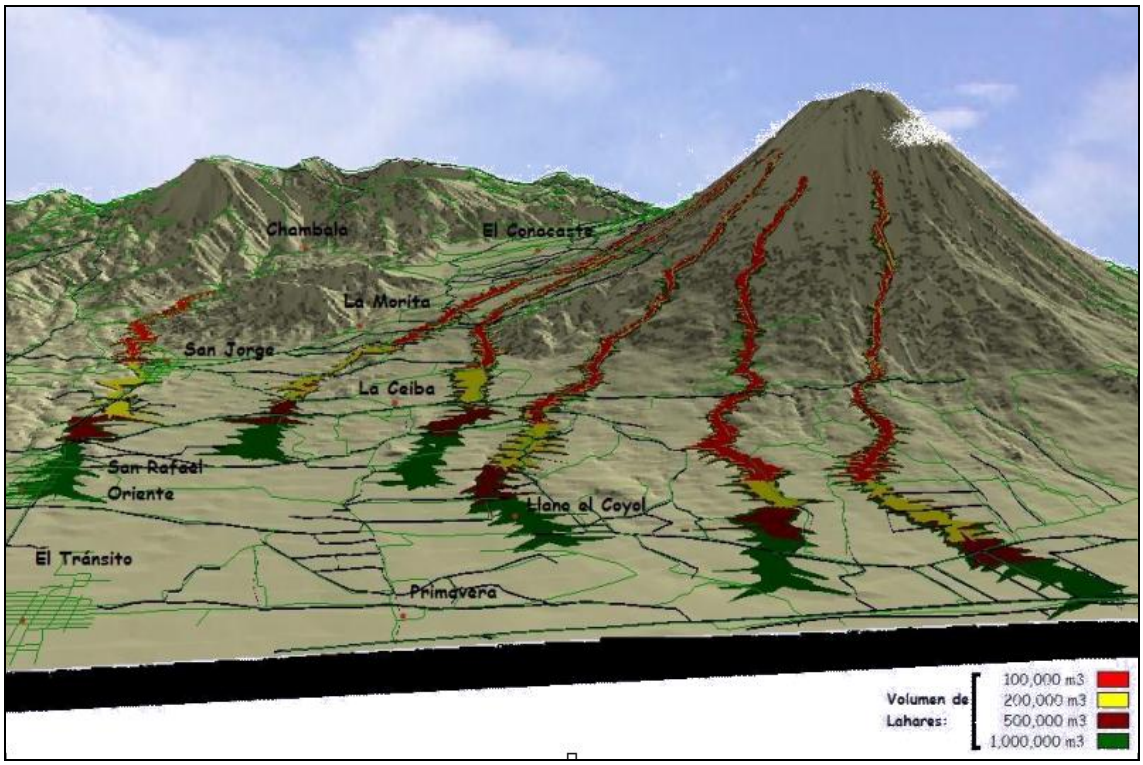


Figura 8.1. Modelización sobre la ocurrencia de lahares

8.4. Propuesta de sistema de alerta temprana

Una vez realizado el estudio de las características existentes en la zona de trabajo, se propone el siguiente sistema de alerta temprana basado en las mismas:

a) La amenaza existente en las ladera sur-occidental del volcán Chaparrastique es producida por la ocurrencia de lahares y de avenidas provocados por precipitaciones intensas.

b) Los lahares se originan una vez superado el umbral de intensidad de precipitación estimada, por datos históricos y recientes, de 40 mm/hora

c) Las avenidas relacionadas con lluvias intensas tienen una duración media de unas 2 horas.

d) El tiempo que tarda en llegar la "correntada" a las zonas más habitadas oscila entre la media hora y las dos horas, según a la altura a la que se encuentren los pueblos.

e) Los cauces de las quebradas pueden ser ocupados por agua y material en forma de flujos hiperconcentrados durante la precipitación de lluvias continuas pero no intensas. Estos procesos no suelen presentar una amenaza.

f) El sistema de alerta ha de ser capaz de recoger la lluvia y medir su volumen en un tiempo dado, es decir, medir su intensidad. Este dato ha de ser obtenido al menos cada hora.

g) Se deberá situar en la parte más alta posible de la subcuenca y que represente la mayor superficie de recogida de lluvia.

h) Es necesario instalar un sistema que permita emitir una señal una vez superado el umbral de intensidad propuesto.

i) El umbral de intensidad propuesto para amenaza por lahar es de 40 mm/hora.

j) La alarma debería ser dada a la población donde se recibe por medio de una señal acústica, como pueden ser altavoces situados en puntos estratégicos. Por su parte también deberá haber una comunicación directa y rápida con los otros pueblos que están quebrada abajo del lugar donde se recibe la alarma. La comunicación deberá realizarse bien por radio o teléfono hacia las poblaciones que se encuentren aguas debajo de la que recibe la primera señal.

k) La ubicación del aparato receptor de la señal se va a situar en una casa particular en el pueblo de San Jorge. Esta situación se estima temporal, ya que se pretende que se haga cargo del mismo la Fundación San Jorge, de Chambala. El motivo de este cambio es que está situados en una cota superior a San Jorge, tienen en funcionamiento un comité de emergencia local, poseen un sistema de aviso por medio de altavoces en toda la comunidad y pueden dar con anterioridad la alarma a las poblaciones aguas abajo ya que se encuentran en la parte alta de la quebrada de El Tránsito.

l) El responsable institucional del mantenimiento y seguimiento de las instalaciones será el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). El cual tiene un equipo de técnicos perfectamente preparados y capacitados para que el equipo se mantenga en perfectas condiciones.

m) Las avenidas suelen durar unas dos horas según las informaciones recibidas por los habitantes de la zona, por lo que se debería mantener la alerta unas tres horas después de que se haya dado la alarma.

n) Este sistema debe servir para validar las estimaciones realizadas en el estudio de la amenaza de lahares, así como para calibrar con mayor exactitud el umbral de intensidad propuesto una vez que se obtengan los registros de la estación meteorológica instalada a tal efecto.

UBICACIÓN UTM	
EMISOR SAT	**RECEPTOR**
356743/1488731	354052/1484524

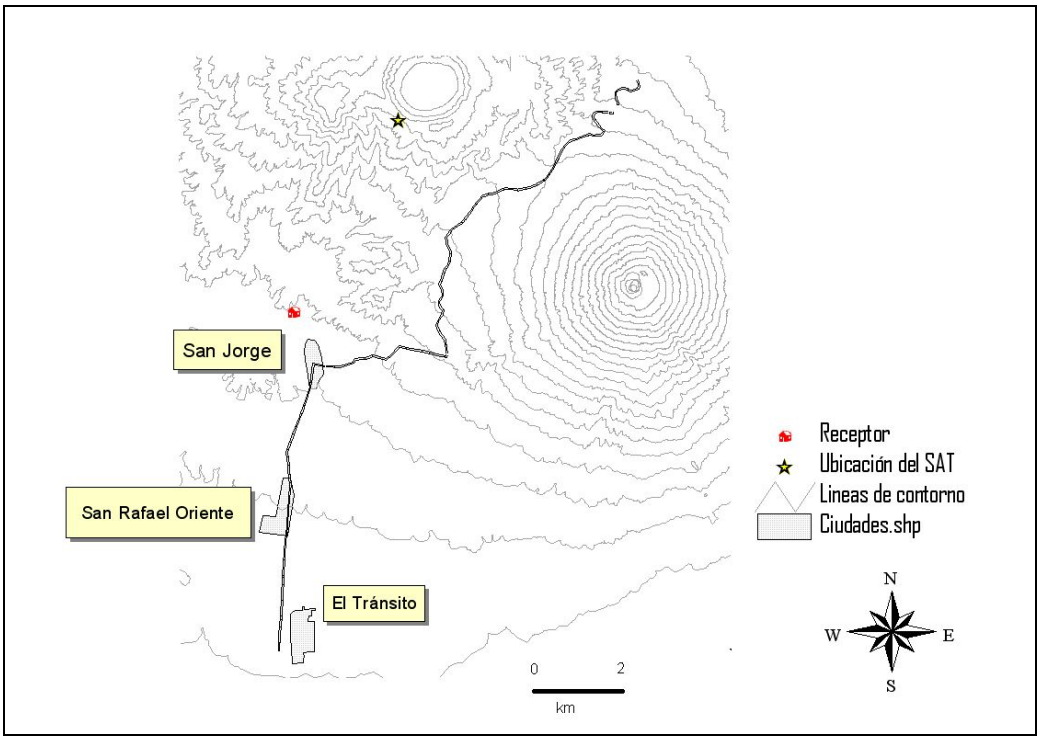


Figura 8.1. Ubicación del SAT y la estación receptora.

SUTRON CORPORATION
21300 Ridgetop Circle, Sterling, VA 20166
Phone: 703-406-2800, Fax: 703-406-2801
www.sutron.com

For: Servicio Nacional de Estudios Territoriales El Salvador
Attn: Edwin Escobar
Phone: 011-503-283-2262
Fax: 011-503-283-2269
Email: eescobar@snet.gob.sv
Subject:

Prepared by: Ted Soto
tsoto@sutron.com
Date:
No of Pages: 1
Reference: 04IN-053
Valid: 90 Days

Item	Part Number	Description	Unit Price	Qty	Price
Enclosure, DataLogger, Transmitter and Accessories					
1	Special	NEMA4 Fiberglass Enclosure (16"Wx20"Hx8"D) Assembly including cabling, voltage protection, dessicant tube for submersible sensor and MS connectors	$1 500.00	1	$1 500.00
2	8210-SL14-1	Data Recorder, 8210 with SatLink Transmitter (HDR)	$6 126.00	1	$6 126.00
3	Special	Radio Modem, LOS, with External Radio	$1 500.00	1	$1 500.00
Antenna and Accessories					
4	5000-0080	Crossed Yagi Antenna, 401.8 MHz, 11 dB gain with 2" pipe mount, Type N Connector	$573.00	1	$573.00
5	6411-1162-1	Cable Assy, Antenna, 15ft *Additional cable lengths available for $2.00 per foot*	$72.00	1	$72.00
6	5000-0030-1	Antenna, UHF, 406 - 512Mhz, Specify freq.	$191.00	2	$382.00
7	6411-1022-1	Cable Assy, Semi-Rigid, Low Loss, 15 ft, Antenna	$167.00	2	$334.00
Power System					
8	5100-0040	Battery, 12VDC, 24AH	$98.00	1	$98.00
9	5100-0410-1	Solar Panel, 20 Watt unregulated	$513.00	1	$513.00
10	6411-1017-3-MS	Cable Assy, Solar Panel, 18ft *Additional cable lengths available for $1.50 per foot*	$54.00	1	$54.00
Sensors and Accessories					
11	5600-0311-MS	Temperature/Humidity Sensor with PRT temperature, 15ft cable with MS connector	$1 210.00	1	$1 210.00
12	5600-0021-2	Radiation Shield, AT/RH for sensors 0.5 to 1" diameter (5600-0311,-0313)	$221.00	1	$221.00
13	5600-0425-2-MS	Rain Gauge, Tipping Bucket, Stainless Steel, 0.2mm with 18m cable and MS connector	$975.00	1	$975.00
14	5600-0201	Wind Speed/Direction (WS/WD) Sensor, Prop Vane	$1 307.00	1	$1 307.00
15	6411-1151-1-MS	Cable Assy WS/WD, 30ft with MS connector	$60.00	1	$60.00
16	5600-0120-1	Pressure Sensor, Barometric, RS-232 and SDI-12 outputs	$889.00	1	$889.00
17	5600-0601	Pyranometer, WMO First Class, 33 ft. Cable	$2 010.00	1	$2 010.00
Tower and Mounting Hardware					
18	5600-0250-1	Tower, Galvanized Steel, Guyed 30ft with Hinged Base including Lightning Protection and Grounding	$1 559.00	1	$1 559.00
19	6211-1012-1	Enclosure Mounting Hardware	$191.00	1	$191.00
20	2271-1082-1	Wind Sensor to Tower Mounting Hardware	$72.00	1	$72.00
21	6211-1024-1	Mounting Kit, RG Tipping Bucket to 2" Pipe	$72.00	1	$72.00
Base Station Software and Sevices					
22	9300-0000-3	XConnect Lite - Includes XC Setput, XC Desktop, XC Rtu, XC RTD (Real-Time Display). Output options restricted to ASCII log files or Excel log files.	$895.00	1	$895.00
23	Special	Radio Modem, LOS, Base Station	$1 500.00	1	$1 500.00
24	Special	Alarm Notification Software	$1 500.00	1	$1 500.00
25	Special	Factory Integration and Test	$500.00	1	$500.00
Computers					
26	Special	**HP Compaq Business Notebook nx 9010**	$1 500.00	1	$1 500.00

QUOTATION SUBTOTAL	***$25 613.00***
ESTIMATED SHIPPING	***$850.00***
QUOTATION TOTAL INCLUDING ESTIMATED SHIPPING	**$26 463.00**

Terms: Prepay or Letter of Credit
Delivery: 90 Days After Receipt of Order
Ship Point: F.O.B. ship point is origin, Sterling, VA.

Especificaciones técnicas del sistema

9. CONCLUSIONES

Una vez analizadas todas las condicionantes y características de la zona de trabajo a lo largo del tiempo que ha durado el presente estudio, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

Geología y tectónica:

- Las rocas existentes en el área de estudio son en su totalidad de origen volcánico, procedentes de los dos grandes volcanes que dominan la zona , La Laguna Seca del Pacayal y el Chaparrastique.

- Las rocas se pueden clasificar en dos grandes grupos según su explosividad: coladas y piroclastos.

- Existen depósitos de piroclastos en las partes bajas de los volcanes retrabajados por la acción del agua. Son depósitos de tipo lahárico o de flujos hiperconcentrados donde el agua es el agente principal de transporte. Dan lugar a capas de diferente espesor compuestas por tamaños de grano muy diversos. Suelen presentar estructuras internas de flujo.

- Desde el punto de vista tectónico existe una falla importante que pasa por la collada existente entre los dos volcanes. El Chaparrastique presenta una fractura suroeste-noroeste, relacionada con la falla que atraviesa los volcanes de Santa Ana, San Salvador. Ircuapa, San Vicente y Tecapa.

- El Chaparrastique presenta, además, grietas radiales con diferentes rumbos, que son las que han definido el trazado preferente de las coladas de lava que han sido emitidas por el volcán.

Geomorfología:

- Está caracterizada por la presencia de los volcanes Laguna Seca del Pacayal y Chaparrastique, con unas alturas de 1315 y 2130 msnm respectivamente. Existe una elevación menor denominada cerro de Chambala con 732 m de altitud.

- Se han definido varias unidades geomorfológicas, todas ellas relacionadas con la presencia de los conos volcánicos. Éstas son:

    - Colinas aisladas
    - Relieve suave
    - Deslizamientos

- Quebradas
- Llanura
- Cráter o caldera
- Ladera alta del volcán
- Ladera media del volcán
- Ladera baja del volcán

- En general, se trata de un relieve joven que está siendo desmantelado por la acción de los procesos externos, siendo los agentes más importantes el agua de lluvia que arrastra los sedimentos sueltos y la gravedad que provoca, en combinación con el agua, movimientos gravitatorios que bajan el material hacia las zonas más deprimidas.

Hidrografía.

- La red de drenaje del área estudiada está formada por quebradas, lechos fluviales que no transportan agua todo el año, sólo en las épocas lluviosas.

- Esta red de quebradas tiene una morfología, en su conjunto, radial, si bien cada una de ellas individualizada es generalmente lineal.

- Las quebradas presentan una fuerte pendiente, por lo que tienen un fuerte potencial erosivo y de transporte, pudiendo transportar gran cantidad de sedimento en suspensión y fragmentos de rocas que pueden llegar a tener dimensiones métricas.

Usos del suelo:

- Los usos de suelo observados en el área de estudio se pueden agrupar en cultivos estacionales, cultivos permanente, potrero o monte bajo y zona desnuda de vegetación

- Los cultivos estacionales se desarrollan hasta cotas de 800 msnm, incluso en laderas con fuertes pendientes.

- Los cultivos permanentes y bosques se sitúan en la parte alta del volcán Laguna Seca del Pacayal, donde se conserva una pequeña mancha de bosque autóctono en las laderas internas de su caldera. El cultivo permanente que existe en la zona es el del café.

- Las zonas sin vegetación corresponden a la parte alta del volcán Chaparrastique, donde se encuentra material procedente de las últimas erupciones del volcán.

Riegos geológicos:

- Se han identificado en la zona de estudio dos tipos de riesgos geológicos: por inundaciones y por movimientos de ladera.

- Las áreas identificadas con problemas de avenidas se sitúan en los cruces de las quebradas con las calles, como pasa en la de Piedra Azul. También se originan problemas en las poblaciones de San Rafael Oriente y El tránsito en las zonas aledañas a la quebrada.

- Las avenidas observadas ocuparon el cauce actual de la quebrada, alcanzando una altura en El Tránsito de 0’5 m. Esta avenida se desarrolló después de una lluvia intensa que dejó 81 mm en dos horas.

- Los lahares observados se han desarrollado dentro de las quebradas, con precipitaciones similares a las manejadas para las avenidas que ocurren en la parte baja de la quebrada. Se trata de volúmenes de material inferiores a 500 m^3.

- Los movimientos de ladera se restringen a los taludes que bordean las quebradas, añadiendo sedimentos al fondo de las mismas. Son movimientos que no sobrepasan los 10 m^3 de material. Se han identificado tres tipos: deslizamientos, desprendimientos y flujos

- En el mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera se observa como la parte alta del volcán Chaparrastique y las partes altas del cerro de Chambala presentan el grado más alto de susceptibilidad.

Sistema de alerta temprana

- El sistema de alerta temprana se ha diseñado con el objetivo de que sirva como medio de prevención del riesgo relacionado con las avenidas que ocurren en las quebradas.

- Una vez tenidos en cuenta los datos disponibles, las observaciones de campo y la bibliografía consultada se ha dado un umbral de disparo de la alerta de 40 mm/hora.

- La alarma debe ser dada por el centro receptor de la señal a toda la población, avisando a las poblaciones que se encuentran aguas debajo de la quebrada una vez que se haya tenido noticia de la misma.

- El sistema ha quedado instalado provisionalmente en San Jorge, en casa de un particular, a la espera que la Fundación San Jorge de Chambala se pueda hacer cargo de la misma.

- Se trata de un sistema de prevención que debe ser revisado constantemente mediante los datos obtenidos en la estación meteorológica que se ha instalado para cubrir tal necesidad. El umbral puede ser variado en función de los nuevos datos obtenidos

10. RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones y resultados obtenidos a lo largo de este estudio, se han realizado una serie de recomendaciones con el fin de mitigar los riesgos identificados, mejorar la calidad de vida de los habitantes y conservar los recursos naturales existentes en el área estudiada:

- Como paso indispensable se observa la necesidad de que se involucren las alcaldías en la gestión del riesgo, así como las ONG's locales con el fin de que haya una planificación y un trabajo coordinado para el beneficio de las comunidades.

- Evitar que existan casas construidas en lugares de alto riesgo como puede ser el lecho de las quebradas. Para ello la alcaldía se tiene que hacer cargo de la planificación territorial de su municipio.

- Se observa la necesidad de hacer una planificación conjunta de los municipio afectados por el recorrido de la quebrada de El Tránsito para abordar de una manera integral las actuaciones que se deberían realizar en la quebrada para evitar los problemas causados por las periódicas "correntadas" que tienen lugar todos los años y que afectan a todas ellas por igual.

- También se ve la necesidad de que se regule la extracción de arena de la quebrada. Esta actividad es, en principio, beneficiosa porque evita la colmatación de la misma, pero puede ser causante de problemas si se permite que estas extracciones se hagan al pie de las obras de protección (muros o gaviones) realizados en la quebrada. Esta regulación también sería un posible ingreso de dinero para las arcas de las alcaldías.

- Es necesario que se sigan haciendo las actividades de formación y capacitación a los agricultores en las técnicas de conservación de suelo tal y como se está realizando en el cerro de Chambala. De esta manera se evita, mediante barreras vivas o resumidero, que la actividad agrícola en pendientes elevadas permita la pérdida excesiva del mismo. De todas maneras se recomienda que se cultive en las zona con menos pendiente de la zona, siempre que sea posible.

- Buscar una alternativa a la agricultura de granos básicos en las laderas con más pendiente de los cerros Chambala y Laguna Seca del Pacayal. En este caso urge la reforestación mediante árboles frutales u otro tipo de vegetación arbórea que retenga el suelo y que facilite la infiltración del agua de lluvia, diminuyendo la escorrentía superficial.

- Uno de los problemas que se han encontrado a la hora de realizar el presente trabajo es la falta de datos meteorológicos, por lo que se recomienda que se apoye mediante capacitaciones y reuniones periódicas de formación e

información a aquellas personas que tienen a su cargo los pluviómetros instalados en la zona.

- El sistema de alerta temprana está concebido para que la población esté sobre aviso de los posibles riesgos provocados por lluvias de fuerte intensidad. Por este motivo es necesario que existan comités de emergencia que alerten a la población y estén capacitados para poder actuar en caso de emergencia. Se recomienda que las alcaldías afectadas por la quebrada de El Tránsito se hagan cargo de la formación y adiestramiento de estos comités, y de informar a la población en general de lo que es un sistema de alerta temprana y su importancia para la seguridad de las comunidades.

- La quebrada de El Tránsito, al atravesar varios municipios no se puede concebir su gestión como algo interno de cada alcaldía. Es necesario la formación de un comité que incluya representantes de cada alcaldía, de las organizaciones sociales y ONG's existentes en la zona con el fin de realizar un seguimiento de las obras realizadas a lo largo de la quebrada, y de observar la evolución de la misma después de la ocurrencia de "correntadas" provocadas por precipitaciones intensas.

- Debe darse solución al problema de las basuras. No se puede seguir vertiendo los deshechos de los tres pueblos en la quebrada, ya que causan riesgos en la salud pública y contaminan las aguas subterráneas, además de producir un impacto visual negativo.

- Se debería llevar un registro de todos los procesos naturales que tengan lugar en el área estudiada, haciendo fichas de los eventos observados, instalar linnímetros en la quebrada para medir su nivel y completar con nuevos pluviómetros los ya existentes en el área. Esta base de datos tendría que estar en manos de las alcaldías o comités de emergencia.

- Realizar un mantenimiento de las obras ya ejecutadas, para que sigan manteniendo su función.

BIBLIOGRAFIA

Aparicio Mijares, Francisco Javier (2001) “Fundamentos de hidrología de superficie”. Noriega Editores

Baxter, S. (1984) Léxico estratigráfico de El Salvador. Cel. El Salvador.

Blanco, F.A., Burgos, E.A. y Mejía, M. (2002) Estudio de amenazas por lahar en El Salvador: revisión de casos históricos y calibración de herramientas para la evaluación de amenaza. Trabajo de graduación. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Ferrer, M., González de Vallejo, L.I. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Garzón Heydt, M.G. (2000). “Apuntes de Procesos Morfogenéticos y Riesgos Geológicos Asociados”. Temas III, IV, V. Dpto. Geodinámica. Fac. Geología. U.C.M.

Geólogos del Mundo (2002). “Manejo integral de amenazas y vulnerabilidades en el municipio de San Miguel"

Geólogos del Mundo (2002). “Diagnosis e inventario de la susceptibilidad a las inestabilidades en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután”. El Salvador.

Geólogos del Mundo (2003). “Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos. Directrices para la ordenación territorial del Municipio de Nejapa”. El Salvador

González de Vallejo, L.I. et al (2001). Ingeniería Geológica. Ed. Prentice Hall.

Heymans, L.E. “La Fórmula Racional de Escorrentía. Determinación de la Intensidad Crítica de la Lluvia en la Estación Meteorológica del Aeropuerto de Ilopango”. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. Servicio de Conservación del Suelo. Unidad de Ordenamiento de Cuencas Hidrográficas.

Major, J.J.; Schilling, S.P.; Pullinger, C.R.; Escobar, C.D.; Chesner, C.A. and Howell M.M. “Determinación de zonas de riesgo por lahar en el volcán de San Miguel”

Ministerio de Medio Ambiente de España (1998) “Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión”. Ed. MUNDI-PRENSA

OIKOS Solidaridad, Solidaridad Internacional. (2002) “Reducción de la vulnerabilidad de la población de la subcuenca El Tránsito cuenca baja del río Grande de San Miguel” Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”

Senciales González, J.M. (1999). “Redes Fluviales. Metodología de Análisis”. Estudios y Ensayos 34. Universidad de Málaga.