



Diputació
Barcelona
xarxa de municipis

Gabinet de Relacions
Internacionals



CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

DIRECTRICES PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE NEJAPA

Memoria

Nejapa, agosto de 2003

Diana Ponce de León Gil
José Antonio de San Antonio Escribano
Roser Mañé Jané
Julia Seisdedos Santos



Diputació
Barcelona
xarxa de municipis

Gabinet de Relacions
Internacionals



Diana Ponce de León Gil
José Antonio de San Antonio Escribano
Roser Mañé Jané
Julia Seisdedos Santos

CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

DIRECTRICES PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE NEJAPA

Memoria

Coordinación del proyecto.-**Diana Ponce de León Gil**

Geología.- **José Antonio de San Antonio Escribano**

Hidrogeología.- **Roser Mañé Jané**

Apoyo voluntario en hidrología.- **Julia Seisdedos Santos**

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer, en primer lugar, al municipio de Nejapa y a los nejapenses, de los que ya nos sentimos un poco parte, su acogida y su cariño. De todos aquellos con los que hemos convivido, querríamos recordar a los técnicos de la oficina de proyectos con los que hemos trabajado y reído, y que tan pendientes han estado de nosotros: Nono, Daniel, Emilio, Carmen Elena, Don Chano, Adolfo, Santiago, Julio César, y especialmente a Romeo, gran motor del proyecto.

Queremos recordar, igualmente, al Área de Promoción Social, compañeros y guías incansables en los trabajos de campo, a todos ellos: Suyapa, Maritza Queta, Isabel, Andrés Manfredo, Chamba, Niña Blanca y especialmente a Mariano, nuestro guía de caminos, personas y naturaleza.

No menos importantes han sido los que a cualquier hora se han mostrado siempre disponibles y deseosos de ayudar en el transporte, las eternas dudas con la computadora, la cámara digital, preparación de las presentaciones, fotocopias... Gracias a Don Lucio, Sergio, Gris, Mario Vázquez, Carmina, Jeni, y a todos los miembros de la alcaldía.

Igualmente importantes han sido aquellos líderes comunales, Don Alejandro, Don Ramón, que nos han acompañado en el campo, y aquéllos que encontramos en nuestro trabajo por las comunidades y que tan amablemente nos atendieron y contestaron a nuestras preguntas, haciéndonos volver siempre cargados de limones, aguacates, mangos,... que siempre compartieron, como muchas otras cosas, con nosotros. A aquéllos que vinieron en su día libre a los talleres que se organizaron y que siempre se mostraron dispuestos a ayudar en un proyecto que es, sobretodo, suyo. De todos ellos hemos aprendido tanto...

Y cómo no mencionar a los que directamente nos acogieron en la que fue nuestra "casa": Roxana, Wilma, Naiara, Karen, Silvia; y en la que fue nuestra "oficina": Don Toño y los demás compañeros de "trabajo".

Y al alcalde de Nejapa, Don René Canjura, que siempre estuvo detrás de todas las iniciativas que animan la vida y el desarrollo de Nejapa.

A nuestros compañeros, maestros, asesores y amigos de la UCA, que nos ofrecieron su dedicación y conocimientos, además de tan buenos momentos, más allá de lo que era parte de su trabajo. A los Ingenieros Marroquín, Escalante, Cepeda y Burgos, y a las "chicas del Laboratorio de SIG", Ana, Laurita, Carmen Elena, Roxana y Jeni, o... cómo trabajar riendo.

Igualmente, queremos agradecer al SNET la transmisión de datos, así como su apoyo y asesoría en los trabajos. Concretamente, a Dolores Ferrer, de la familia de Geólogos del Mundo, que ha sido siempre nuestro enlace y apoyo, y a todos aquellos con los que hemos tenido oportunidad de compartir conocimientos y aprender. A los Licenciados e Ingenieros Elda de Godoy, Ana Daisy López, Celina, Mario Guevara, Griselda Marroquín, Carlos Pulinger, Luis García y Ricardo Zimmermann.

A ANDA, por facilitar documentación y datos relativos al proyecto, así como a sus técnicos con los que compartimos igualmente trabajo y conocimientos, a los Ingenieros Nelson y Acosta, y al Ingeniero Duarte, consultor de FIAS.

No podemos olvidar al Ingeniero Joaquín Mulas de la Peña del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), que a través de interminables correos electrónicos, resolvió dudas y aportó datos, siempre con presteza y sentido del humor.

A Medardo Lizano por las horas robadas al sueño en la ardua labor de la edición.

Y cómo no, a nuestros compañeros de Geólogos del Mundo, a los que trabajando desinteresadamente desde España nos han apoyado siempre, respaldándonos y resolviendo cuantos problemas y dudas surgían, a Roger, Marta, Juan Carlos, Yolanda, Ángel... Y a aquellos con los que en El Salvador hemos compartido trabajo, dificultades, buenos momentos y sobretodo ilusión, mucha ilusión, puesta en aquello que, en nuestra medida, podíamos aportar, uniendo nuestro esfuerzo al de otros, a Carol, Jesús, Cristina, Luis, Mónica, Carlos y especialmente a Juli, gran tejedor de Geólogos del Mundo en El Salvador.

Son tantas las personas que nos han ayudado, no sólo con el trabajo, sino también a hacernos sentir como en nuestra casa, que difícilmente podemos mencionar a todos y expresar aquello que nos han aportado. Para todos ellos y para cada uno de ellos, nuestro agradecimiento y el recuerdo imborrable que atesoramos.

PRESENTACIÓN

Debido a la constante amenaza de los eventos naturales bajo la que vive la República de El Salvador, la ordenación del territorio es una herramienta básica para poder hacerles frente y evitar, o paliar en la medida de lo posible, los efectos que sobre la población o sobre los bienes de la comunidad pueden tener dichos eventos.

Dentro de esta línea de trabajo, el municipio de Nejapa está ejecutando desde hace varios años programas y actuaciones en el campo de la gestión del territorio. En este sentido se han llevado a cabo múltiples actividades con entidades locales, nacionales e internacionales, elaborándose el "Plan de Desarrollo del Municipio 2000 – 2010". El propio crecimiento poblacional y socio-económico del municipio demanda una planificación para determinar cuáles son las áreas que deben seguir desarrollándose. Por otro lado, la necesidad de seguir trabajando en esta línea se ha visto intensificada debido a que actualmente se está construyendo el proyecto denominado "Anillo Periférico", que será una ronda de la capital, San

Salvador y pasará por el municipio de Nejapa, afectando a las zonas de recarga hídrica del municipio.

El proyecto "Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos. Directrices para la ordenación territorial del municipio de Nejapa", pretende seguir la línea de trabajo iniciada hace dos años por la alcaldía en colaboración con el ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, el Fondo de Cooperación del Gobierno Vasco y el equipo técnico de la UCA, profundizando en el conocimiento geológico, hidrogeológico y ambiental para comprender la dinámica de los procesos asociados al riesgo geológico y determinar la importancia de los sistemas acuíferos del municipio que abastecen a Nejapa y a gran parte de San Salvador.

El estudio geológico de todo el municipio, con especial atención a las zonas aledañas al volcán de San Salvador, analiza los diferentes factores que intervienen en los procesos de inestabilidad de las laderas, la respuesta sísmica del terreno y la dinámica de las quebradas y del río San Antonio con los puntos de inundación que pueden existir a lo largo del término municipal. Se ha realizado, además, un estudio hidrogeológico para caracterizar los acuíferos existentes en el área, y conocer la calidad y cantidad de las aguas subterráneas que tiene el municipio.

Geólogos del Mundo inicia este estudio en Febrero del presente año 2003, con la financiación de la Diputación de Barcelona y en colaboración con la Alcaldía de Nejapa y la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Se ha contado, además, con el apoyo del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) que aportaron diversa documentación y asesoría técnica.

En el desarrollo del estudio han participado también las comunidades del municipio, acompañando y ayudando a identificar los diferentes aspectos estudiados en este proyecto.

Se espera que los resultados del estudio, así como la metodología desarrollada, puedan servir a estas entidades y a aquellas instituciones que realicen estudios similares con posterioridad.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Objetivos.....	13
1.2. Componentes del estudio.....	14
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1. Preparación del proyecto.....	17
2.2. Trabajo de campo.....	18
2.3. Procesamiento de datos.....	19
2.3.1. Caracterización de las amenazas.....	19
2.3.2. Susceptibilidad a las inestabilidades de ladera.....	20
2.3.3. Peligrosidad por inestabilidades de ladera.....	20
2.3.4. Peligrosidad por avenidas e inundaciones.....	21
2.3.5. Respuesta sísmica del terreno.....	21
2.3.6. Caracterización hidrogeológica de las formaciones.....	22
2.3.7. Hidrodinámica.....	22
2.3.8. Balance hídrico.....	23
2.3.9. Hidroquímica.....	23
3. MARCO GEOGRÁFICO.....	25
3.1. Contexto geográfico.....	25
3.2. Situación político-administrativa.....	27
4. CARACTERIZACIÓN SOCIO-ECONÓMICA.....	30
4.1. Generalidades.....	31
4.2. Aspectos poblacionales.....	31
4.2.1. Tenencia de la tierra y actividades de la población.....	34
4.3. Aspectos sociales.....	36
4.3.1. Vivienda.....	36
4.3.2. Educación.....	36
4.3.3. Salud.....	37
4.3.4. Servicios y comunicaciones.....	37
4.3.5. Sistema vial y transporte.....	38
4.3.6. Aspectos culturales y religiosos.....	38
4.3.7. Modo de organización.....	38
5. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO.....	40
5.1. Climatología.....	40
5.1.1. El clima en El Salvador.....	40
5.1.2. El clima en el municipio de Nejapa.....	44
5.2. Vegetación y usos del suelo.....	45
5.2.1. Vegetación natural.....	46
5.2.1.1. Zonas bioclimáticas presentes en el área de estudio.....	46
5.2.2. Usos del suelo.....	47
5.2.2.1. Usos del suelo y manejo de los recursos.....	48
6. GEOLOGÍA.....	51
6.1. Marco geológico regional.....	51
6.1.1. Elementos estratigráficos.....	53
6.1.2. Historia geológica del Terciario-Cuaternario.....	54
6.2. Marco geológico local.....	55
6.3. Tectónica.....	62
6.3.1. Tectónica regional.....	62
6.3.2. Tectónica local.....	63
6.4. Geomorfología y relieve.....	64
6.4.1. Contexto regional.....	64

Con formato: Fuente: Sin
Negrita

Código de campo cambiado

6.4.2. Contexto local.....	66
6.4.2.1. Unidades geomorfológicas.....	68
7. HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL.....	71
7.1. Delimitación de la subcuenca hidrográfica.....	71
7.2. Morfología de la red de drenaje. Caracteres cualitativos de la red de drenaje.....	72
7.3. Morfometría de la red de drenaje. Caracteres cuantitativos de la red de drenaje.....	78
7.4. Interpretación.....	85
8. ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS.....	86
8.1. Análisis de Inundaciones.....	86
8.1.1. Caracterización de la Amenaza.....	86
8.1.2. Análisis de la peligrosidad.....	91
8.1.2.1. Análisis de precipitaciones.....	92
8.1.2.2. Estudio hidrometeorológico.....	99
8.1.2.3. Modelo hidrológico e hidráulico propuesto.....	106
8.2. Análisis de inestabilidades de ladera.....	108
8.2.1. Caracterización de la Amenaza.....	110
8.2.1.1. Deslizamientos.....	110
8.2.1.2. Desprendimientos.....	112
8.2.1.3. Rodamientos.....	117
8.2.1.4. Flujos.....	119
8.2.2.1. Mapas temáticos.....	120
8.2.2.2. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera.....	122
8.2.2.3. Mapa de áreas de inundación por lahares.....	137
8.2.3. Análisis de la peligrosidad por inestabilidades.....	141
8.2.3.1. Sismicidad.....	141
8.2.3.2. Comportamiento hídrico.....	142
8.2.3.3. Grado de peligrosidad.....	143
8.2.3.4. Sistema de alerta temprana.....	152
8.3. Análisis de la sismicidad.....	154
8.3.1. Metodología.....	155
8.3.2. Marco tectónico y sísmico regional.....	155
8.3.2.1. Marco tectónico.....	156
8.3.2.2. Marco sísmico.....	157
8.3.3. Historia sísmica.....	158
8.3.4. Macrozonación sísmica.....	162
8.3.5. Microzonación sísmica.....	166
8.3.5.1. Metodología.....	167
8.3.5.2. Definición y valoración de los factores de amplificación.....	168
8.3.5.3. Amplificación esperable.....	171
8.3.5.4. Riesgos geológicos asociados.....	172
8.3.6. Vulnerabilidad de las edificaciones.....	174
9. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	179
9.1. Formaciones Hidrogeológicas.....	179
9.1.1. Estratigrafía.....	179
9.1.1.1. Columnas litológicas.....	181
9.1.2. Parámetros hidrogeológicos.....	181
9.1.2.1. Datos de pruebas de aforo.....	182
9.1.2.2. Comentarios sobre las pruebas de aforo.....	185
9.1.3. Unidades hidrogeológicas.....	186
9.1.4. Geofísica.....	188
9.1.4.1. Interpretación de cortes de resistividad eléctrica.....	188
9.1.4.2. Conclusiones de los cortes geoelectrónicos.....	192
9.2. Hidrodinámica.....	193
9.2.1. Inventario de puntos de agua.....	193

9.2.2. Hidrodinámica del acuífero central de Nejapa	196
9.2.3. Hidrodinámica del acuífero de la zona norte	199
9.3. Balance hídrico	203
9.3.1. Límites del acuífero y condiciones de contorno	203
9.3.2. Extracción de agua para abastecimiento urbano e industria	204
9.3.3. Pérdidas en red de abastecimiento	204
9.3.4. Infiltración por precipitación. Balance hídrico	205
9.3.4.1. Índice de infiltración	206
9.3.4.2. Precipitación efectiva	207
9.3.4.3. Evapotranspiración	209
9.3.4.4. Contenido de humedad del suelo	210
9.3.4.5. Cálculo de la recarga	210
9.3.5. Salida por límite de caudal constante	212
9.3.8. Discusión sobre el balance	215
9.4. HIDROQUÍMICA	217
9.4.1. Composición general del agua subterránea	217
9.4.2. Hidroquímica de las aguas subterráneas del municipio de Nejapa	218
9.4.2.1. Características físico-químicas del agua subterránea de Nejapa	219
9.4.2.2. Características bacteriológicas del agua subterránea de Nejapa	224
9.4.2.3. Potabilidad del agua	224
9.4.3. Calidad de las aguas superficiales	227
9.4.4. Interpretación	228
10. CONCLUSIONES	230
10.1. Geología y tectónica local	230
10.2. Geomorfología local	231
10.3. Hidrografía	233
10.4. Amenaza por movimientos de ladera	234
10.5. Amenaza por inundación	235
10.6. Amenaza sísmica	236
10.7. Caracterización de los recursos hídricos	237
11. RECOMENDACIONES	240
11.1. Planificación territorial	241
11.2. Actuaciones sobre el terreno	243
11.3. Actuaciones de seguimiento	245
11.3.1. Respecto a los riesgos geológicos	246
11.3.2. Respecto a los recursos hídricos	247
BIBLIOGRAFÍA	249

Eliminado: ¶
¶

1. INTRODUCCIÓN

En la república de El Salvador, la intensa actividad eruptiva ha dado lugar a la formación de numerosos edificios volcánicos, la mayoría de ellos con laderas inestables, formados por materiales volcánicos poco consolidados y sometidos a la continua acción erosiva de los agentes geológicos externos, especialmente precipitaciones durante el período de lluvias y agentes geológicos internos como la continua sismicidad que afecta a todo el país. Esto da lugar a un terreno altamente vulnerable a la erosión, en el que el fuerte control tectónico favorece la incisión de la red de drenaje y la ocurrencia de movimientos gravitatorios.

Las amenazas geológicas desencadenadas por lluvias y sismos son principalmente las inestabilidades, a las que se asocian la ocurrencia de avenidas e inundaciones.

El municipio de Nejapa está tachonado por numerosos edificios volcánicos, siendo en su mayor parte de pequeño tamaño. Sólo cabe destacar que el sur del municipio llega hasta la cima del Boquerón (volcán de San Salvador), único edificio volcánico de importancia y que está considerado activo, ya que presenta emisiones de gases y actividad sísmica. El límite lateral de esta zona coincide con las dos quebradas de mayor importancia que drenan el volcán en el término municipal, la Quebradona (o El Ranchón o Cangrejera) y el Aguacatón (o Santa Cristina). Como todas las que lo surcan, estas quebradas tienen un comportamiento torrencial, siendo activas solamente durante la estación lluviosa. Esta zona está completamente vegetada por plantaciones de café, lo que contribuye a su estabilidad.

El resto de los volcanes se consideran inactivos. El más importante de ellos es el Cerro de Nejapa, bastante desmantelado y afectado por procesos erosivos debido a la escasa cobertura vegetal que presenta, cultivándose en sus laderas granos básicos, a pesar de su pronunciada inclinación. Existen otros dos edificios volcánicos, que serían los cerros Ojo de Agua y Los Llanos, en los que se produce caña, café o madera.

En el término municipal se encuentran, además, tres conos de escorias, también inactivos, siendo algunos de ellos aprovechados para la extracción de balastre, material de relleno para la construcción. Son los llamados cerros La Tabla, Mulunga y Tutultepeque. En ellos existen, además, plantaciones de teca y cultivo de granos básicos.

Debido a su estado de deforestación y al cultivo de granos básicos en las laderas del mismo, es en el cerro de Nejapa donde se presentan con mayor incidencia los procesos de erosión de suelo, evidenciándose, además, ciertas inestabilidades, como rodamiento de bloques. Estos procesos se dan principalmente, en las laderas con mayor pendiente, donde el suelo es lavado y arrastrado hasta las quebradas que conducen la escorrentía superficial hacia el río San Antonio.

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, así como de la respuesta sísmica del terreno. Dicho análisis incluye una caracterización de las amenazas, así como una determinación de la susceptibilidad y peligrosidad. La elaboración de este estudio se ha basado en observaciones de campo, fotointerpretación, análisis de datos disponibles de precipitaciones, sismos y eventos ocurridos en la zona.

Debido a la falta de registro histórico, a su tamaño y a que está a escasa distancia de San Salvador, pocos de los sucesos ocurridos en el área de estudio quedan reflejados. No obstante, se han tomado los datos de los eventos que afectaron a San Salvador del Catálogo de Desastres, Accidentes y Ecología (1915-1990), considerando que también pudieron afectar al municipio de Nejapa debido a su proximidad. Dicha recopilación de eventos puede observarse en la Tabla 1.1.

Por otro lado, se ha realizado la caracterización de los recursos hídricos del municipio que comprende el estudio de las propiedades hidrogeológicas de los materiales, la hidrodinámica de los acuíferos, su balance y las características hidroquímicas de los mismos. Para la elaboración de dicho estudio se ha partido del análisis y recopilación de diversa documentación, así como del trabajo de campo y análisis químicos.

El proyecto surgió ante la necesidad del municipio de ordenar y planificar el uso de su territorio, anticipándose a problemas que pueden darse en el futuro debidos a: inmigración descontrolada, crecimiento urbano y rural desordenado, demanda de viviendas y otros servicios de infraestructura, presión sobre recursos ambientales importantes como el agua y el bosque cafetero, y a un posible desarrollo industrial contaminante y no planificado.

Tabla 1.1.- Desastres naturales ocurridos en el entorno de San Salvador (tomados del Catálogo de Desastres, Accidentes y Ecología, 1915-1990).

Fecha	Descripción
07 – 06 – 1917	Terremoto en San Salvador
14 – 12 – 1917	Temblores en San Salvador
04 – 01 – 1918	Temblores en San Salvador, Santa Ana y Ahuachapán
19 – 06 – 1918	Ciclón en San Salvador
28 – 04 – 1919	Fuerte terremoto afecta a la ciudad de San Salvador
08 – 08 – 1919	El volcán de San Salvador arroja humareda
05 – 12 – 1919	Alarmantes temblores en San Salvador
23 – 09 – 1921	Se eleva el nivel del Acelhuate
12 – 06 – 1922	Inundación en San Salvador. Solicitan remover el curso del río Acelhuate
13 – 06 – 1922	Ríos Acelhuate y Arenal causan 100 muertos en Candelaria, La Vega y S Jacinto
17 – 06 – 1922	Río Acelhuate arrastra cadáveres hasta Apopa
18 – 02 – 1923	Fuerte sismo en San Salvador
08 – 01 – 1924	Volcán de San Salvador arroja densas columnas de humo
30 – 09 – 1925	Alarma por la crecida del Acelhuate
02 – 06 – 1926	Fuerte tormenta en San Salvador
27 – 07 – 1926	Tempestad provoca serios daños en San Salvador
22 – 08 – 1929	Temor en San Salvador por los fuertes temblores registrados en los últimos días
25 – 08 – 1929	Se registran lluvias huracanadas en San Salvador
08 – 08 – 1932	Se reporta temporal en San Salvador
08 – 04 – 1932	Temblor en todo el país provoca derrumbes en carreteras
21 – 07 – 1945	Daños en carreteras por lluvias
08 – 10 – 1946	Lluvia de ceniza volcánica en Sonsonete, La libertad y San Salvador
30 – 09 – 1949	Fuerte temporal provoca derrumbe y muerte de una persona en San Salvador
05 – 10 – 1950	Temporal hace crecer el Acelhuate y derriba una casa
24 – 10 – 1950	Se reportan temblores en la capital
16 – 10 – 1952	La crecida del Acelhuate por lluvias provoca varios muertos
18 – 09 – 1955	Fuertes lluvias provocan derrumbes
29 – 09 – 1955	San Salvador afectado por inundaciones
11 – 08 – 1958	Huracán azotó San Salvador
18 – 09 – 1959	Fuerte sismo provoca el pánico en la capital
26 – 10 – 1960	Fuerte temporal provoca desborde de ríos, derrumbes y hundimientos
20 – 06 – 1963	Se sintió un sismo en San Salvador
05 – 08 – 1963	Ayer se sintieron fuertes sismos en San Salvador
16 – 06 – 1964	Ayer se registró un sismo en la capital y en la zona sur del país
09 – 08 – 1964	Fuerte sismo en la capital y sus alrededores
13 – 01 – 1965	Se registra actividad sísmica en San Salvador
05 – 02 – 1965	Se han sentido 400 sismos durante las últimas 36 horas en la capital
15 – 02 – 1965	Se sienten dos sismos de regular intensidad en San Salvador
01 – 03 – 1965	Ayer se sintió un sismo de 6'5 grados en San Salvador
03 – 05 – 1965	Terremoto de 7'5 grados conmueve San Salvador y municipios aledaños
05 – 04 – 1966	Se sintió temblor grado 5'6 en San Salvador
Fecha	Descripción
14 – 11 – 1966	Temblor en San Salvador

26 – 09 – 1965	Temporal causa daños en carreteras y vías de comunicación
03 – 09 – 1968	Mueren 14 personas por lluvias torrenciales en San Salvador
21 – 09 – 1974	Derrumbes, desbordes e inundaciones por huracán Fifi
01 – 09 – 1986	Fuertes correntadas en San Salvador y su periferia
13 – 10 – 1986	Devastador terremoto en San Salvador
07 – 11 – 1986	Lluvias y temblores menores acrecientan efectos del terremoto
22 – 12 – 1986	Continúa actividad sísmica en San Salvador
29 – 08 – 1988	Inundaciones, desbordes y derrumbamientos en todo el país

En este sentido, los objetivos del presente estudio, así como los principales ejes entorno a los que ha girado el trabajo para lograr los objetivos, son los que siguen a continuación.

1.1. 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, como son los sismos, las inestabilidades de ladera, la formación 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, así como una cartografía de respuesta sísmica del terreno 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.

Por otro lado, se pretende ampliar el conocimiento sobre los recursos hídricos del municipio para una mejor gestión y conservación de los mismos.

Objetivo general

Facilitar a la alcaldía, las bases necesarias para el desarrollo de una política de ordenación territorial, prevención y mitigación de los riesgos geológicos presentes en el municipio, así como un mayor conocimiento de la hidrogeología del mismo para una mejor gestión de sus recursos hídricos.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización y dimensionamiento de los riesgos geológicos para una mejor gestión del territorio, a través de una cartografía geoambiental integrada en el SIG municipal.
- Estudiar el sistema hidrológico del municipio para una mejor gestión y conservación de los recursos hídricos.
- Formar e informar a los técnicos del municipio y a las comunidades afectadas por las amenazas geológicas caracterizadas en la gestión local del riesgo.
- Recomendar las acciones especiales, inmediatas o específicas para la reducción del riesgo y la optimización del recurso hídrico.

1.2. 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 cartografías 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, así como en la respuesta sísmica del terreno.

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

Análisis y cartografía de la respuesta sísmica del terreno 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 periodos de retorno.

Estudio hidrogeológico, con el fin de caracterizar los recursos hídricos del municipio, en cuanto a su dinámica, estado físico-químico y potencial explotación.

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. Levantamiento litológico en campo.
7. Inventario de puntos de agua.
8. Toma de muestras de agua.
9. Recopilación de información acerca de eventos anteriores proporcionada por la población
10. Realización de una base de datos de inestabilidades.
11. Análisis de la morfografía de las redes de drenaje.
12. Análisis de las amenazas presentes.
13. Interpretación de datos, ensayos y sondeos eléctricos verticales para una caracterización hidrogeológica de las formaciones.
14. Análisis de la hidrodinámica de los acuíferos presentes en el municipio.
15. Cálculo del balance hídrico del acuífero principal.
16. Caracterización química y bacteriológica de las aguas.
17. Realización de mapas de isopiezas.
18. Realización de cartografías temáticas.
19. Realización de mapa de susceptibilidad por inestabilidades de ladera.
20. Modelización del comportamiento de los posibles lahares.

21. Análisis de la peligrosidad por inestabilidades de ladera. Aplicación del método de Mora y Varhson.
22. Realización del mapa de respuesta sísmica del terreno.
23. Análisis de las precipitaciones.
24. Estudio hidrometeorológico.
25. Modelización de las avenidas mediante HEC-Ras.
26. Realización de un mapa de áreas inundables.
27. Obtención de conclusiones y recomendaciones.
28. 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.

En la preparación del proyecto intervinieron ambas contrapartes, UCA (Universidad Centroamericana, José Simeón Cañas) y Alcaldía de Nejapa, facilitando y gestionando la obtención de recursos materiales y humanos, así como proporcionando numerosa documentación. De la misma forma, se organiza el trabajo de campo con el Área de Promoción Social de la Alcaldía. Por otro lado, se firma un convenio con el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) de intercambio de información, y se establecen contactos con ANDA (Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados) para tener acceso a sus bases de datos.

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, datos sísmicos, 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, puntos de agua, y se definió toda la información que iba a ser necesario recopilar o desarrollar para llegar a la caracterización de los riesgos geológicos y los recursos hídricos del municipio.

2.2. Trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se han recogido los datos necesarios para elaborar algunas de las cartografías temáticas, como son el mapa litológico, geomorfológico, de procesos activos y vegetación. 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.

En este sentido, se han tomado cuantos datos han sido posibles para caracterizar los riesgos geológicos presentes en el municipio, 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 en el municipio, prestando 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 desarrollo, grado de equilibrio, composición litológica y estado de alteración, existencia o no de cobertura 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 por parte de los técnicos de la alcaldía.

Por otro lado, las quebradas estudiadas con mayor detalle son aquellas situadas en la ladera del volcán de San Salvador, ya son las más desarrolladas y las que en épocas de lluvia pueden acarrear un mayor volumen de material.

Para la caracterización de las 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. De la misma forma, se ha prestado atención a los puentes y a su estado de conservación y mantenimiento.

Se ha realizado, además, un inventario de puntos de agua para caracterizar hidrodinámicamente los acuíferos presentes, así como la toma de muestras para obtener una identificación química y bacteriológica de las aguas, y acercarse a una mejor caracterización de los recursos hídricos del municipio.

Por último, se ha realizado también un inventario fotográfico en el que se refleja el estado general de todo el municipio de Nejapa.

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, inundaciones o sismicidad. 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, respuesta sísmica del terreno 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 periodos de retorno y a la determinación junto con los trabajos de campo de las 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 lo hacían de la misma manera regular durante todo el tiempo geológico, es decir, los sucesos geológicos del pasado pueden ser explicados de acuerdo con los fenómenos y las fuerzas observables actualmente, el presente es la clave del pasado (Hutton, J., s. XVIII).

Por otro lado, a partir del análisis de la información hidrogeológica recopilada en diversa documentación, y de aquella recogida en campo y procedente de ensayos, se han descrito hidrogeológicamente las formaciones, además de caracterizar los distintos acuíferos desde el punto de vista hidrodinámico, calcular el balance del acuífero principal y definir las características hidrogeoquímicas y bacteriológicas de las aguas.

2.3.1. Caracterización de las amenazas

Tras las observaciones y datos obtenidos en 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.

Por otro lado, y debido a la potencial amenaza que representa el volcán de San Salvador como generador de lahares, se ha modelizado el posible comportamiento de éstos en las dos quebradas principales mediante el programa LaharZ.

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 o su hábitat, en definitiva para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos o la economía de una comunidad (UGSS,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 municipio de Nejapa, se debería establecer el periodo 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 las inestabilidades, y obtener el tiempo de retorno de dichas intensidades y magnitudes. Debido a la dificultad que supone establecer estos rangos y periodos de retorno combinados para ambos factores, y a la escasez de registros disponibles, no se ha elaborado el mapa de peligrosidad.

No obstante, se ha empleado el método de Mora y Varhson (1993) como aproximación a un estudio de peligrosidad, dado que este método tiene en cuenta factores desencadenantes como las precipitaciones y los sismos, principales generadores de las

inestabilidades de ladera en el municipio de Nejapa. Dicho método no tiene en cuenta, sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de tales fenómenos, ni sus tiempos de recurrencia, considerando, en cambio, los máximos eventos registrados, por lo que podría tomarse como una evaluación de la peligrosidad para un máximo periodo de retorno dentro del registro histórico.

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 precipitación estudiados, se han obtenido los principales caudales asociados a estas lluvias para distintos periodos de retorno. Para ello, se ha empleado un método de precipitación-escorrentía de uso común, el método racional modificado por Temez en 1999. Partiendo de los caudales, se ha modelizado el comportamiento del río San Antonio mediante el programa HEC-Ras desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 1997). Esta aplicación permite el cálculo de áreas inundadas, anchura del 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 inundables 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. De esta manera, la información complementaria aportada por todos ellos ha permitido definir cuáles son las áreas más susceptibles de sufrir inundaciones. Sin embargo, a pesar de contar con un estudio probabilístico que aporta los caudales esperados para distintos periodos de retorno, no se han podido definir cartográficamente las zonas inundables para cada uno de estos periodos debido a que no se ha podido disponer de una topografía a escala más detallada, necesaria para diferenciar las áreas de inundación en función del tiempo considerado.

2.3.5. Respuesta sísmica del terreno

La respuesta sísmica del terreno determina el grado de amplificación que sufrirán las ondas sísmicas a su paso por distintos materiales, incrementando o no el valor de la Intensidad del terremoto en la zona considerada.

Para elaborar el mapa de respuesta sísmica del terreno se han caracterizado y cartografiado aquellos factores influyentes en la misma, como son el factor litológico, topográfico y geomorfológico, igualmente se ha considerado el contenido en agua, aunque no cuantitativamente. La integración de dichas cartografías mediante SIG, previa asignación de un peso a cada factor basado en las normativas existentes, ha dado lugar al mapa de respuesta sísmica del terreno.

Posteriormente, se han cruzado los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera y de respuesta sísmica del terreno, para identificar las zonas en las que la amplificación sísmica generada por las características del terreno incidirá en mayor medida en la inestabilidad de laderas.

Por otro lado, se ha clasificado la tipología de edificaciones presentes en el municipio para identificar el grado de vulnerabilidad de éstas según la EMS (1998), ubicándolas sobre el mapa de respuesta sísmica del terreno.

2.3.6. Caracterización hidrogeológica de las formaciones

A partir de los datos recopilados de columnas de sondeos de los pozos, cortes geológicos, ensayos realizados en pozos y sondeos eléctricos verticales (SEV) se llega a una interpretación de la estratigrafía de la zona central del municipio, que es de donde se dispone de información, y del comportamiento hidrogeológico de las formaciones presentes en el área de estudio.

2.3.7. Hidrodinámica

A partir de los puntos de agua recopilados o inventariados en campo, de las medidas de los niveles de agua obtenidas en bibliografía y de algunos mapas de isopiezas, se ha interpretado la dinámica del acuífero central de Nejapa (profundidad del agua, dirección del flujo natural, influencia de los pozos). No obstante, dichas interpretaciones se ven limitadas por la antigüedad de las medidas de los niveles de agua, que no han podido ser actualizadas.

Se ha interpretado, además, la dinámica del acuífero del norte, partiendo de las medidas en pozos excavados y nacimientos de agua.

2.3.8. Balance hídrico

Para calcular el balance hídrico es necesario definir, en primer lugar, los límites del acuífero. Posteriormente deberán calcularse las entradas y salidas de agua. Entradas al acuífero como la infiltración y las pérdidas en la red de abastecimiento. Salidas como la extracción para abastecimiento urbano e industria, salida al río y salida por el límite de caudal constante.

Las salidas al río y a otro acuífero se han calculado a partir de la piezometría. Las salidas por bombeos se han obtenido a partir de la información existente sobre los caudales de explotación en los pozos del municipio.

Por otro lado, el cálculo de la infiltración por precipitación se ha basado en el método usado por Duarte (1998). Para la obtención de este parámetro es necesario el índice de infiltración, que se ha obtenido, en parte, a partir de valores proporcionados por ANDA-PNUD (1972) y, en parte, mediante su cálculo a partir de la capacidad de infiltración procedente de valores obtenidos por Duarte (1998) con el método Porchet. El producto del índice de infiltración y las precipitaciones medias mensuales, proporcionarán el valor de la precipitación efectiva. Este valor es necesario junto con los valores de evapotranspiración (proporcionados por las estaciones meteorológicas) y contenido en humedad del suelo para calcular la recarga del acuífero, basándose en el método de Penmann y Grindley.

A partir de todos los parámetros calculados, se realizará el balance de masas final, igualando las entradas y las salidas, puesto que en un año hidrológico el balance es nulo.

2.3.9. Hidroquímica

El estudio de calidad de aguas subterráneas en Nejapa se ha basado en los análisis de aguas recopilados, así como en los análisis efectuados para este proyecto a partir del muestreo de algunos puntos de agua. Dicho estudio identifica, por un lado, los rasgos físico-químicos del agua y, por otro, sus características bacteriológicas. A partir de esta caracterización se analiza la potabilidad del agua, tanto desde el punto de vista físico-químico, como bacteriológico, en base a algunas reglamentaciones sobre aguas potables existentes (OMS, norma española y salvadoreña).

Por otro lado, se interpreta también la calidad de las aguas superficiales a partir de análisis recopilados.

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 municipio de Nejapa en el 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	13° 9'N / 14° 26'N
Longitud	87° 43'E / 90° 08'E

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

El país está dividido en 14 departamentos, situándose el municipio de Nejapa en el departamento de San Salvador. La ubicación geográfica del municipio dentro del país puede verse en la Figura 3.1.



Figura 3.1.- Localización geográfica del área de estudio.

El municipio de Nejapa, con una extensión de 82.82 km², se ubica a 21 km al norte del área metropolitana de San Salvador (Figura 3.2), perteneciendo al distrito de Tonacatepeque y al departamento de San Salvador. Territorialmente limita al norte con el Municipio de Quezaltepeque (departamento de La Libertad) y con municipios de Guazapa y Aguijares (departamento de San Salvador), al este con los municipios de Guazapa y Apopa (departamento de San Salvador), al sur con los municipios de Mejicanos, Nueva San Salvador y San Salvador (departamento de San Salvador), y al oeste con el municipio de Quezaltepeque (departamento de La Libertad).

Está comprendido dentro de un área definida aproximadamente por las siguientes coordenadas geográficas:

N 13° 55' 30"	N 13° 55' 30"	N 13° 44' 00"	N 13° 44' 00"
W 89° 17' 00"	W 89° 10' 30"	W 89° 10' 30"	W 89° 17' 00"

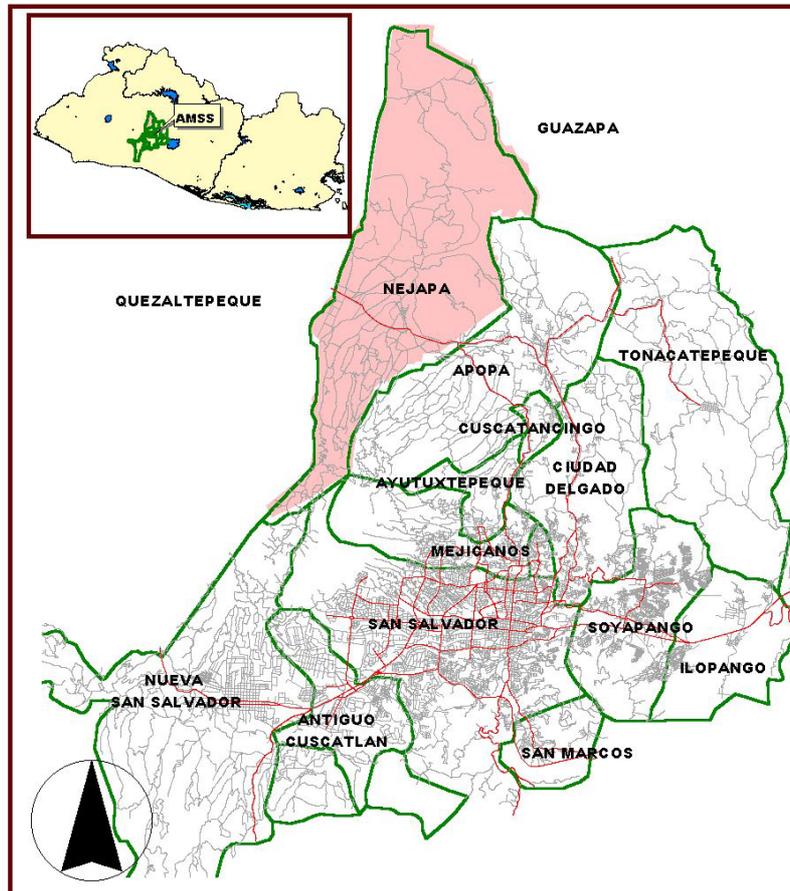


Figura 3.2.- Ubicación del municipio de Nejapa dentro del Área Metropolitana de San Salvador (tomado de UCA, 2001).

3.2. Situación político-administrativa

Los 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.

El municipio de Nejapa, situado en el Departamento de San Salvador, se encuentra dividido en ocho cantones: Tutultepeque, Bonete, Camotepeque, Galera Quemada, Conacaste, Aldea Mercedes, El Salitre y San Jerónimo Los Planes (Figura 3.3). La cabecera del municipio recibe su mismo nombre y constituye el casco urbano. La extensión de los cantones puede observarse en la Tabla 3.1.

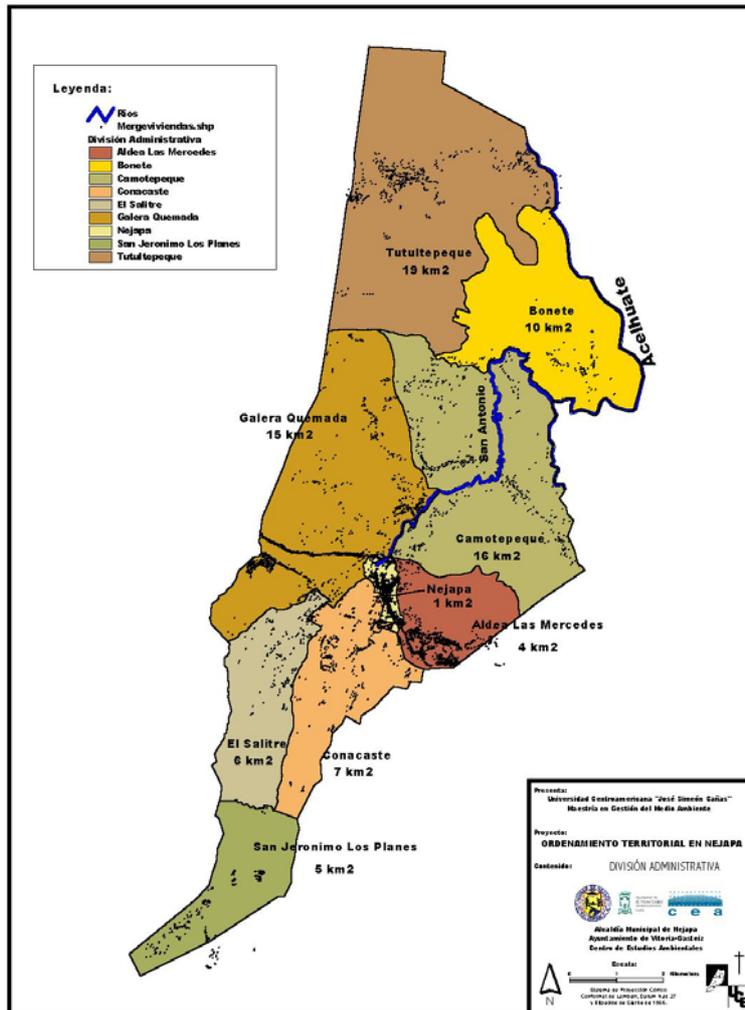


Figura 3.3.- División administrativa del municipio de Nejapa (tomado de la UCA, 2001).

Tabla 3.1. - Extensión en m² de los cantones de Nejapa (UCA, 2001).

CANTONES	EXTENSION (m²)
Tutultepeque	19.282.076'00
Bonete	9.972.268'00
Galera Quemada	14.888.601'00
Camotepeque	15.532.647'00
Nejapa	765.884'56
Aldea Las Mercedes	4.325.698'00
Conacaste	6.708.306'00
El Salitre	6.070.103'50
San Jerónimo Los planes	5.278.545'00
TOTAL	82.824.129'06

4. CARACTERIZACIÓN SOCIO-ECONÓMICA

Los riesgos geológicos, tales como sismicidad, inestabilidades gravitatorias o inundaciones, suponen una amenaza potencial para los bienes materiales (viviendas e infraestructuras) y las personas que viven en aquellos lugares con mayor probabilidad de que estos procesos ocurran. Por este motivo, es fundamental considerar el factor socio-económico en todo estudio geoambiental, analizando sus características para conocer el grado de vulnerabilidad frente a estos procesos y poder plantear las actuaciones más adecuadas para su tratamiento y protección.

Por otro lado, aunque la problemática asociada a dichos procesos sólo afecte directamente a determinadas áreas o a parte de la población, las consecuencias de los mismos pueden afectar a la totalidad del municipio y de forma general a infraestructuras de interés nacional.

Otro de los factores a tener en cuenta en la evaluación de los riesgos naturales, es el factor antrópico. El hombre interviene de una manera importante en estos procesos, ya que los usos del suelo inadecuados pueden constituir un factor agravante o desencadenante de los mismos.

La descripción de las características poblacionales y socio-económicas del área de estudio se ha basado en la información aportada por recientes trabajos elaborados para el municipio: "Ordenación Territorial de Nejapa" (2001) y "Estudio de Manejo de los Recursos Naturales del Municipio de Nejapa" (2001). La información existente se completó con datos de campo tomados paralelamente a la realización de los estudios geológicos.

4.1. Generalidades

Como se detalla en el Capítulo 3, el municipio de Nejapa tiene una extensión de 82.82 Km². Desde el punto de vista geográfico, se caracteriza por ser, en general, un territorio llano tachonado con una serie de elevaciones como son el Volcán de San Salvador, Cerro de Nejapa, Cerro La Tabla, Cerro Las Mesas, Cerro Ojo de Agua, Cerro de Tutultepeque y Cerro Picudo. La zona norte se encuentra elevada con respecto a la central debido a una falla que atraviesa el municipio con dirección aproximada E-W.

Sólo una franja estrecha alrededor de la carretera de Apopa a Quezaltepeque y el núcleo del pueblo de Nejapa, está considerada como zona urbana o suburbana, donde se sitúa toda la zona industrial del municipio. El resto es eminentemente agrícola, basando su economía en el cultivo del café en las zonas más elevadas y la caña de azúcar en las zonas llanas del municipio.

El municipio se caracteriza, por tanto, por una mayor extensión de territorio de naturaleza rural, con gran predominio de la actividad agrícola. El núcleo urbano ocupa, aproximadamente, un 3.6% de la superficie del municipio, ubicándose las áreas rurales en las afueras de los núcleos con un grado de dispersión mayor.

4.2. Aspectos poblacionales

El municipio de Nejapa tiene una tasa de crecimiento demográfico estimada en un 2.42%, colocándose como una de las más altas del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

En 1999, Nejapa llegó a tener, aproximadamente, 30.044 habitantes, mientras que en 1996 contaba únicamente con una total de 20.791.

En 1996, el 49.1% de la población era mayor de 18 años, y el 45'11% se clasificaba dentro del rango de población económicamente activa, demostrando los altos niveles de población joven y en edad de trabajar existentes en el municipio.

La dinámica demográfica del municipio de Nejapa es bastante regular en lo que a su distribución territorial se refiere, presentando características propias de incrementos en los

niveles poblacionales en las cercanías del casco urbano, generados, sobre todo, por nuevos proyectos habitacionales y gente procedente de otros municipios. Con relación a esto último, hay que destacar, que en 1996, la tercera parte de la población declaró que había nacido fuera del municipio, lo que indica el elevado índice de migración hacia el mismo.

El municipio de Nejapa está conformado por un total de 78 comunidades, distribuyéndose su población como se indica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Distribución de la población por cantones (tomado de UCA, 2001).

	CANTÓN	NOMBRE	TIPO	FAMILIAS	HABITANTES
1	Casco Urbano	Colonia Macance	Urbana	48	239
2		Barrio El Centro	Urbana	208	1.036
3		Col. San Felipe	Urbana	62	309
4		Barrio El Calvario	Urbana	121	603
5		Barrio Concepción	Urbana	218	1.086
6		Barrio El Rosario	Urbana	307	1.529
7		La Estación	Urbana	71	354
8		Barrio San Antonio	Urbana	63	314
9		Col. San Blas	Urbana	35	174
10		Col. Orantes	Urbana	15	75
11		Res. Las Mercedes	Urbana	40	199
12		Pasaje Vista Hermosa	Urbana	15	75
13	Aldea Mercedes	Sector 85	Rural	17	91
14		Cuesta blanca	Suburbana	123	658
15		Col. Suchinanguito	Suburbana	95	508
16		Los Angelitos	Suburbana	80	428
17		El Cidral	Suburbana	154	824
18		El Llanito	Suburbana	23	123
19		Aldea Mercedes	Urbana	211	1.129
20		Lot. Los Osunas	Suburbana	15	80
21		Col. La Esperanza	Suburbana	20	107
22		Col. San Luis	Suburbana	14	75
23		Col. Los Tejadas	Suburbana	25	134
24		Col. San Jorge	Suburbana	20	107
25		Col. Los Ramos	Suburbana	23	123
26		Col. El Pitarrio	Suburbana	40	214
27		Col. El Nance	Suburbana	30	161
TOTAL ZONA CASCO				2.093	10.755
32	Galera Quemada	Calle Vieja Sector 2	Suburbana	156	835
33		Las Mesas	Rural	60	321
34		La Granaj	Suburbana	62	332
35		El Cambio	Suburbana	322	1.723

	CANTÓN	NOMBRE	TIPO	FAMILIAS	HABITANTES
36	Galera Quemada	Calle Vieja Sector 3	Suburbana	126	674
37		El Jabalí 1	Suburbana	103	551
38		Lot. Las Américas	Suburbana	98	524
39		Calle Vieja Sector 1	Suburbana	148	792
40		El Jabalí 2	Suburbana	126	674
43	Camotepeque	El Llano	Rural	62	379
44		Mapilapa	Rural	134	820
45		La Tabla	Rural	22	135
46		Las Vegas	Rural	26	159
47		Las Marías	Rural	70	428
48		El Atonal	Rural	63	386
49		Barba Rubia	Rural	80	490
50		Joya Galana	Rural	26	159
51		La Portada	Rural	94	575
52		Los Naranjos	Rural	65	398
53		Las Mariñas	Rural	20	122
54		Las Veguitas	Rural	17	104
55		El Chorizo	Rural	14	86
56		El Junquillo	Rural	10	61
57		El Sunza	Rural	10	61
TOTAL ZONA INTERMEDIA				1.914	10.789
28	El Salitre	La Adelaida	Rural	10	61
29		La Escuela	Rural	55	337
30		La Ermita	Rural	32	196
31		Nuevo Ferrocarril	Suburbana	220	1.346
58		El Pacayal	Rural	60	367
59	San Jerónimo	La Escuela	Rural	80	490
60		Cajamarca	Rural	39	239
61	Conacaste	El Castaño	Rural	86	526
62		Las Mercedes	Suburbana	46	246
63		Castañito	Rural	53	284
64		Los Moranes	Suburbana	18	96
65		El Angelito	Suburbana	48	257
66		El Chorizo	Suburbana	15	80
67		Lot. Los Ortiz	Suburbana	20	122
68		Lot. San José	Suburbana	20	122
69	Col. Los Esquiveles	Suburbana	10	53	
TOTAL ZONA SUR				812	4.822
41	El Bonete	El Bonete	Rural	100	612
42		El Relámpago	Rural	20	122
70	Tutultepeque	El Chirrinál	Rural	107	655

	CANTÓN	NOMBRE	TIPO	FAMILIAS	HABITANTES
71	Tutultepeque	Casco Hacienda	Rural	151	924
72		El Puerto	Rural	57	349
73		El Mojón	Rural	17	104
74	Tutultepeque	San Luis	Rural	98	600
75		Las Vegas	Rural	15	92
76		El Gramal	Rural	10	61
77		Ceiba Arrozal	Rural	16	98
78		El Cabral	Rural	10	61
TOTAL ZONA NORTE				601	3.678
TOTAL DE NEJAPA				5.420	30.044

4.2.1. Tenencia de la tierra y actividades de la población

Económicamente, Nejapa se caracteriza por el predominio de actividades agrícolas aglutinadas en cooperativas, las cuales son propietarias en su conjunto de 39.69 Km² de suelo (51% del territorio municipal). La mayor parte de cooperativas están ubicadas en la zona norte e intermedia del municipio. Estas cooperativas responden de la mayor parte de la producción de caña de azúcar, y una parte importante de café y granos básicos.

Los grandes propietarios tienen sus tierras en la ladera del volcán y en el medio oeste del centro del municipio, representando el 37% de la tierra. Se considera un gran propietario aquél que posee una extensión territorial superior a 10 manzanas. Es en la zona sur, en las faldas del volcán de San Salvador, donde las actividades económicas están relacionadas principalmente con la producción de café.

Sólo el 1% pertenece a pequeños propietarios, situándose éstos en la ladera del volcán, entre las tierras pertenecientes a los grandes propietarios de plantaciones de café.

Las principales actividades de la población en el casco urbano son las comerciales y de servicios (30%), siguiendo en importancia, las familias que viven principalmente de la agricultura.

En la Tabla 4.2 y Figura 4.1 pueden verse la distribución de la tenencia de la tierra.

Tabla 4.2.- Distribución de la tenencia de la tierra según la zona geográfica (UCA, 2001).

Tenencia	Zona Norte	Zona Central	Zona Sur	Total
Casco Urbano	0.00	1.13	0.00	1.13
Cooperativa	34.23	5.46	0.00	39.69
Ex-Cooperativa	1.30	0.00	0.00	1.30
Grandes propietarios	13.28	12.80	9.41	35.49
Pequeños propietario	0.07	0.41	0.28	0.76
Total	48.88	19.80	9.69	78.37

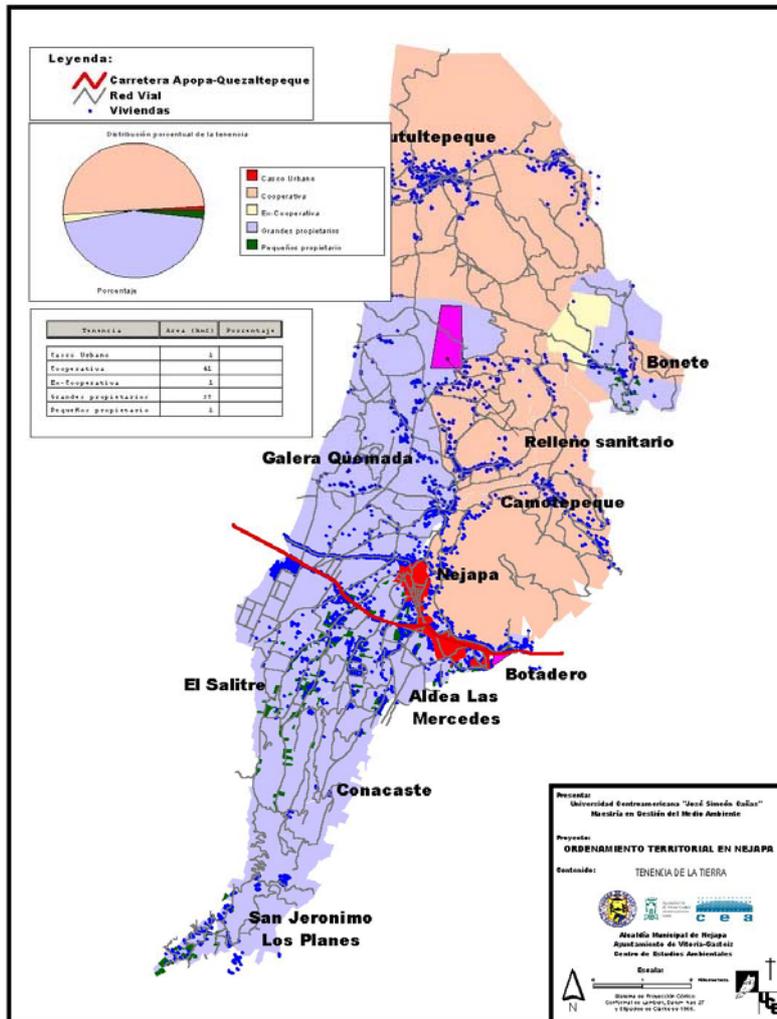


Figura 4.1.- Mapa de tenencia de la tierra en Nejapa (tomado de UCA, 2001).

4.3. Aspectos sociales

En el siguiente apartado se realiza una caracterización de diversos aspectos como vivienda, educación, salud, servicios y comunicación, sistema vial y transporte, aspectos culturales y religiosos, y modo de organización.

4.3.1. Vivienda

La mayor parte de la población tiene vivienda propia, tanto en las áreas rurales como en las áreas urbanas. Los tipos de vivienda que predominan son las de paredes de bahareque y adobe, techos de lámina o teja y suelos de tierra. En los últimos años, se ha incrementado el uso del ladrillo o bloque especialmente en las áreas urbanas.

En el casco urbano, el 70% de las viviendas son de adobe, el 10% de bahareque y el 20% ya presenta un diseño sismorresistente. En cambio, en la zona rural el 95% de las viviendas son de adobe y bahareque, mayoritariamente de adobe.

El número de personas que viven en una casa varía de 5 a 15, por lo que se presentan problemas de hacinamiento en la mayoría de las casas del municipio, sobre todo en las zonas rurales.

4.3.2. Educación

El municipio cuenta con 19 escuelas repartidas por todo su territorio. También existen dos guarderías públicas y un instituto situado en el casco urbano del pueblo. No obstante, la cobertura de la población en edad escolar es limitada. Muchos de los niños no van a la escuela o lo hacen irregularmente debido a la necesidad que tienen las familias de contar con sus ingresos para poder sobrevivir. A esto hay que añadir la problemática del acceso a los centros educativos por parte del alumnado, que en ocasiones debe recorrer grandes distancias a pie para llegar a las escuelas.

En general, las infraestructuras se encuentran en buen estado, si bien algunas de las situadas en el occidente del municipio están en condiciones deficientes, aunque las principales deficiencias detectadas por la UCA (2001) fueron la falta de equipos y materiales, y la asignación de profesorado.

4.3.3. Salud

Las enfermedades que afectan de manera más usual a la población son las respiratorias y gastrointestinales (gripes y diarreas). La población infantil es la más acosada por estas últimas, debido en ocasiones a la calidad del agua consumida y a las condiciones higiénicas de las viviendas, mayoritariamente con suelos de tierra.

Los servicios de salud pública, tal como ocurre con los educativos, se concentran en los cascos urbanos y son deficientes en las áreas rurales, con lo cual las personas que viven en los cantones tienen que recorrer grandes distancias a pie para acceder a dichos servicios.

En concreto, en el municipio existen tres dispensarios municipales, situados en las zonas rurales, donde se pasa consulta una vez a la semana, siempre y cuando las condiciones climatológicas y la disponibilidad de vehículos lo permita. En el centro urbano existe una clínica municipal abierta durante toda la semana con los servicios básicos de asistencia primaria y un consultorio del ISSS.

4.3.4. Servicios y comunicaciones

En cuanto a la cobertura de servicios, dos son los puntos críticos: agua potable y aguas negras. Lo contradictorio es que, siendo Nejapa un municipio con abundancia en recursos hídricos, una gran parte de su población carece del servicio de agua potable. En el radio urbano, la fuente primaria de abastecimiento de agua son dos tanques de captación que sólo tienen capacidad para atender la demanda de la zona urbana, dejando fuera prácticamente a toda la población ubicada en la zona semi-urbana (franja de 4 km a lo largo de la carretera Apopa-Quezaltepeque). En la zona norte y sur no se cuenta con este servicio. No obstante, estas zonas son abastecidas con agua potable por medio de cantareras situadas en puntos estratégicos, de manera que puedan llegar a todas las familias que viven en ellas. Estos vecinos se valen de mangueras que, conectadas a los chorros de las cantareras, les permiten tener un abastecimiento regular de agua.

En cuanto a las aguas servidas, únicamente en la zona urbana se cuenta con la red de aguas negras, que son tratadas antes de su vertido al río San Antonio en la planta depuradora del municipio. El resto de los habitantes del municipio utilizan letrinas aboneras y fosas sépticas, o no cuentan con ningún sistema de vertido de aguas residuales.

El 85% de los habitantes del municipio poseen energía eléctrica, siendo los cantones del norte y sur del mismo donde existe, hasta el momento un déficit de este servicio. En concreto, en los cantones de Joya Galana, Tutultepeque y San Jerónimo Los Planes.

El servicio de telefonía se encuentra básicamente en el casco urbano, que posee varios puntos donde existe teléfono público. En la zona rural, algunas familias tienen teléfono en sus casas, pero es una pequeña minoría.

4.3.5. Sistema vial y transporte

El municipio de Nejapa cuenta con dos carreteras importantes que lo atraviesan. Por una parte está la vía que une Apopa con Quezaltepeque, hasta hace poco la única vía asfaltada, y por otra, la circunvalación que une el municipio con San Salvador.

Articuladas a la vía que une Apopa con Quezaltepeque, existe un conjunto de calles de tierra que comunican el casco urbano con los principales núcleos habitacionales del municipio; sin embargo, las comunidades rurales de la zona norte (cantón Tutultepeque) y sur (San Jerónimo Los Planes) del municipio, carecen de comunicación directa con la cabecera municipal, de manera que el acceso a estos cantones es más fácil desde otros municipios. Por ejemplo, Tutultepeque con el municipio de Guazapa y San Jerónimo Los Planes con el municipio de Nueva San Salvador (Santa Tecla).

4.3.6. Aspectos culturales y religiosos

La población del municipio no presenta en la actualidad rasgos de culturas indígenas, sino que mayoritariamente, los actos culturales que se celebran en el área son de tradición colonial y están relacionadas con celebraciones religiosas. En el municipio se encuentra presente la Iglesia Católica, la Iglesia Evangélica, los Testigos de Jehová y los Mormones.

4.3.7. Modo de organización

El nivel de organización de la población local está basado en la formación de juntas directivas compuestas por un presidente, un secretario, un síndico, un tesorero y los vocales. Estas juntas tienen una personalidad jurídica que les permite funcionar dentro de ADESCO (Asociación de Desarrollo Comunal), lo que les habilita para acceder a fondos y programas para el desarrollo comunitario. Su función es la de obtener mejoras para la comunidad, planteando y gestionando proyectos propios. La alcaldía tiene relación con las mismas mediante los promotores sociales, que hacen la función de nexo entre las juntas y la alcaldía.

5. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

5.1. Climatología

5.1.1. 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 aproximando 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 5.1).

Tabla 5.1.- 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

Con el fin de comprender con mayor claridad el estudio hidrometeorológico que se realiza en el Capítulo 10 se ha hecho un resumen de los principales acontecimientos climáticos que tienen lugar en cada mes del año.

Enero

Es el mes más frío del año. Los vientos boreales, "Nortes", que hacen su aparición en los últimos días de octubre, al debilitarse temporalmente, son causa de que, al día siguiente, se produzcan las temperaturas más bajas del año. Estos enfriamientos extremos llamados "heladas" son causa de que los cultivos de café sufran cuantiosos daños en esta época.

En la capital, San Salvador, la temperatura ha llegado a alcanzar valores de hasta 8°C. En general, durante el día, el tiempo es predominantemente soleado y fresco, tornándose más frío durante la noche.

Febrero

Después de haberse alcanzado los valores mínimos de temperatura en enero, durante este mes se inicia un gradual ascenso de la misma. Los vientos "Nortes" son menos frecuentes y los últimos días de febrero marcan el inicio de la segunda parte de la estación seca, que prevalecerá durante los meses de marzo y abril. Este segundo tramo de la estación seca tiene en común con el primero (de noviembre a enero), la ausencia casi absoluta de lluvias, pero se diferencia en su comportamiento térmico, ya que los días comienzan a ser un poco más calurosos durante las horas de mayor insolación y las noches son cada vez menos frías.

Marzo

Lo característico de este mes es el alto grado de turbidez de la atmósfera, producto de la influencia de la inversión de los Alisios (capa bloqueante entre los 2.000 y 3.000 metros de

altitud) que permite, por debajo de ella, la concentración de bruma seca, polvo y humo. El humo procede principalmente de las “quemadas” que, anticipándose a la ya próxima estación lluviosa, realizan los agricultores como preparación de la tierra para el cultivo. La concentración de bruma llega a tales extremos que el Sol se muestra frecuentemente como un disco de color rosado.

Abril

En la segunda mitad de este mes comienza, en la mayor parte del país, la transición de la estación seca a la lluviosa. El desarrollo de la nubosidad, ausente durante los meses anteriores, empieza a manifestarse, principalmente en las horas anteriores al mediodía. Los primeros relámpagos en el norte durante la noche, señalan el inicio de esta transición. Normalmente, el mes registra de 4 a 5 días con lluvia. La variabilidad de las cantidades de lluvia caída durante el mes es muy grande, ya que ha habido años donde no se ha registrado ninguna precipitación y otros en los que se han alcanzado hasta 525 mm.

Mayo

Comienza la estación lluviosa asociada a las “Ondas de los Estes”, zonas de fuerte inestabilidad que se trasladan de este a oeste atravesando el país y generando tormentas eléctricas y lluvias en forma de chubascos y aguaceros. La estación lluviosa comienza en la región suroriental dos o tres semanas más tarde que en la zona central y noroccidental. Esto tiene que ver con la disposición de los sistemas montañosos, que favorecen las lluvias por el ascenso orográfico en las dos últimas regiones. En los primeros quince días del mes, las Ondas de los Estes aún no se presentan perfectamente definidas y toda la lluvia, en este período, es marcadamente orográfica.

Junio

En junio se produce el primer máximo de actividad lluviosa. Las lluvias, que en mayo son atribuibles a la influencia de las Ondas de los Estes, en junio se ven incrementadas por el fenómeno de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ZCIT efectúa su primera incursión en este mes, propiciando las situaciones atmosféricas llamadas “temporal”, caracterizadas por lluvias no tan intensas, pero de carácter intermitente, teniendo lugar a cualquier hora del día. Dichas lluvias se presentan asociadas a nubes opacas, de tipo estratiforme, cuya base se ubica a muy poca distancia del suelo (hasta 300 metros). Las situaciones de temporal pueden tener una duración de hasta 6 días.

Julio

Las lluvias, en este mes, comienzan a ser menos frecuentes durante las horas diurnas, concentrándose preferentemente en las horas nocturnas.

En la mayor parte del país, las cantidades de precipitación son generalmente menores a las registradas durante el mes de junio, debido aparentemente al alejamiento de la Zona de Convergencia Intertropical.

Por el contrario, a partir de la segunda semana de julio se manifiestan frecuentemente “canículas”, que son periodos de días soleados, sofocantes y sin registros de actividad lluviosa. La citada interrupción, también típica de otros países situados más hacia el Ecuador, contribuye a la reducción de las precipitaciones observadas en julio.

Agosto

En agosto las lluvias continúan concentrándose en las horas nocturnas y se considera normal también que las “canículas” hagan acto de presencia en el transcurso de dicho mes. Al igual que en julio, el régimen de lluvias está regulado por la presencia y paso de las Ondas de los Estes sobre el país y por las canículas.

Septiembre

Este mes es normalmente el más copioso del año. De nuevo las Ondas de los Estes y la Zona de Convergencia Intertropical se combinan para favorecer la presencia de lluvias a cualquier hora del día. El hecho de que septiembre sea más copioso que junio (mes en el que se produce otro máximo de lluvia), puede deberse a que la ZCIT se encuentra mucho más cerca en septiembre que en junio. Esto permite que alcance con más facilidad la región costera del Pacífico y, por tanto, proporcione precipitaciones de mayor amplitud, manifestándose así los “temporales”. Las grandes cantidades de precipitación son la causa del desbordamiento de los ríos con las consecuentes inundaciones que afectan principalmente a toda la zona costera del país.

Octubre

En el mes de octubre se inicia la transición de la estación lluviosa a la seca. La forma en que se inicia dicha transición viene explicada por la primera incursión de una célula de alta presión procedente de América del Norte. El sistema de circulación asociado a dicha célula, que permita el transporte de una masa de aire frío y seco hacia nuestras latitudes, determina que sobre El Salvador se inicien los primeros Nortes con intensidades débiles a moderadas

(de 10 a 30 km/h). Dichos sistemas de alta presión anulan la actividad lluviosa, ya que restringen, por efecto de la circulación, la génesis de las Ondas de los Estes, secando el aire e impidiendo los procesos de condensación y formación de nubes.

Noviembre

La estación seca, propiamente dicha, suele comenzar en la mayor parte del país en los primeros días de noviembre, atrasándose hasta unos 15 días en el extremo oriente del país y en el Golfo de Fonseca. Los “Nortes”, que normalmente caracterizan los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, pueden soplar hasta 15 días o más, sin interrupción, alcanzando velocidades de más de 100 km/h en las zonas montañosas.

Este mes marca el inicio de la primera parte de la estación seca (de noviembre a enero), que se caracteriza por la ausencia casi absoluta de lluvias y por la disminución paulatina de la temperatura, empezando a ser los días cada vez más frescos.

Diciembre

Este mes se caracteriza por cielos completamente despejados, ambiente muy fresco y agradable. Los “Nortes” continúan manifestándose de moderados a fuertes. Muy raramente se producen chubascos aislados (una o dos veces al mes), y su ocurrencia se atribuye a las influencias de frentes envejecidos que arriban al país de forma discreta.

5.1.2. El clima en el municipio de Nejapa

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

Sabana tropical caliente o Tierra caliente

Corresponde a la mayor parte del municipio. Agrupa las zonas situadas entre los 200 y 800 m de altura sobre el nivel del mar, abarcando el área comprendida desde la desembocadura del río San Antonio en el Acelhuate a las faldas del volcán de San Salvador, incluyendo el Cerro de Nejapa hasta los 800 m.

Las temperaturas medias mensuales oscilan entre 22 y 28°C, con una precipitación media anual de 1600 a 1700 mm.

Corresponde principalmente a los cantones de Tutultepeque, Galera Quemada, El Bonete, Camotepeque, Nejapa y Aldea de las Mercedes.

Sabana tropical calurosa o Tierra templada

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

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

Comprende aproximadamente los cantones de El Salitre y Conacaste.

Clima tropical de las alturas o Tierra Templada

Este clima afecta a las elevaciones de 1200 a 1800 m. Dentro del área de estudio correspondería a las zonas más altas del volcán de San Salvador.

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

El área definida comprende el volcán de San Salvador, San Jerónimo Los Planes y San Juan los Planes.

5.2. Vegetación y usos del suelo

La vegetación es un factor fundamental dentro de la conservación de los suelos. Directamente ejerce un efecto de sujeción del mismo por medio de las raíces. También evita que la lluvia incida directamente sobre el suelo y ponga en suspensión los elementos del mismo, llevándoselos del lugar; es decir, evita la acción erosiva del agua. Otro aspecto importante a considerar de la vegetación es que aumenta la capacidad de infiltración del agua hacia zonas profundas del suelo, aumentando los aportes de agua a los acuíferos subterráneos. Esto es así porque disminuye la escorrentía superficial y la velocidad con la que el agua se desplaza por la superficie.

5.2.1. Vegetación natural

La vegetación en sí misma no se considera un factor condicionante principal en los procesos de inestabilidad gravitatoria. No obstante, va a tener cierta incidencia al ser un elemento protector del suelo y un condicionante hidrológico de la zona. Por ello, es importante conocer la vegetación existente en un área, desde el punto de vista de las especies y forma de ocupar la superficie.

5.2.1.1. Zonas bioclimáticas presentes en el área de estudio

La República de El Salvador está situada en la región bioclimática de los bosques húmedos subtropicales, dentro de la cual pueden establecerse diferentes zonas atendiendo a variaciones altitudinales:

- Bosque muy húmedo subtropical (Bmh-ST)
- Bosque muy húmedo montano bajo (Bmh-MB)
- Bosque muy húmedo montano (Bmh-M)

Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, la principal zona de vida del municipio de Nejapa es el Bosque Húmedo Sub-tropical con temperatura del aire media anual menor a los 24°C. Sin embargo, en las regiones que abarcan las lomas El Quebracho, El Espino (Cantón Tutultepeque) y las Mesas (Tutultepeque), los cerros Ojo de Agua (Cantón Galera Quemada) y Nejapa (Aldea Mercedes y Camotepeque), y la mayor parte de los cantones Conacaste, El Salitre y San Jerónimo Los Planes, la zona de vida corresponde al bosque húmedo tropical, en transición al Sub-tropical, con biotemperaturas también inferiores a los 24°C. Una pequeña parte del municipio, en el sur de San Jerónimo Los Planes, corresponde a una zona de vida de bosque muy húmedo Sub-tropical.

Las especies arbóreas más notables existentes en el área de estudio son: conacaste, castaño, amate, morro, madrecaao, nance, roble, níspero, ojushte, tambor, capulín de monte, mulo, zopilocuavo, chaparro, volador, cedro, ceiba, copino, nacaspilos, café, copalchi, mango, aguacate, izote, limón, naranja, aguacate, marañón, mamón, Chaquito, eucalipto, laurel, guarumo, guachapilín, canelillo, pepenance y crotolaria.

5.2.2. Usos del suelo

Antes de describir los usos del suelo en el municipio de Nejapa, se describirán los diferentes tipos de suelos que se encuentran dentro del municipio.

Los suelos que predominan se agrupan en las clases II, III, IV, VI, VII y VIII. Según las aptitudes de los suelos para el cultivo, las tierras de esta zona se clasifican en dos tipos generales: adecuadas para cultivos intensivos, bosques, praderas y otros (clases II, III y IV) y tierras de uso limitado y, generalmente, no adecuadas para cultivos intensivos (clases VI, VII y VIII). A medida que aumenta el número que identifica a cada clase de tierra, disminuye su vocación de uso agrícola y aumenta su vulnerabilidad al no ser utilizada bajo una permanente cubierta forestal (Tabla 5.2).

En el municipio de Nejapa, las tierras corresponden principalmente a las clases III, VI y VII, siendo las dos últimas las que ocupan aproximadamente la mitad del área total y que constituyen tierras con limitaciones muy severas para la implementación de cultivos agrícolas. La otra mitad es ocupada por tierras que tienen vocación agrícola (clases II, III y IV), con diferentes grados de facilidad en la aplicación de prácticas de manejo y conservación, y con diferentes limitaciones para su uso agrícola.

Tabla 5.2.- Clases de suelo y aptitudes para el cultivo (tomado de UCA, 2001).

CLASE	DESCRIPCIÓN
II	Son tierras que requieren prácticas cuidadosas de manejo y moderadas prácticas de conservación, fáciles de aplicar. Sus limitaciones de uso son pocas. Permiten los cultivos de una gran diversidad de productos transitorios, semipermanentes, o perennes, requiriendo prácticas de manejo de más cuidado que los de la clase I, que son fáciles de aplicar, como es el caso cuando se hace necesario prevenir o controlar la erosión, si es que hay susceptibilidad; construir avenamientos en las áreas de drenaje moderado, lo cual beneficia al cultivo de plantas arbóreas, recoger las pocas piedras, y hacer las demás prácticas agronómicas usuales
III	Tierras que tienen algunas limitaciones para los cultivos intensivos y requieren prácticas y obras especiales de conservación, algo difíciles y costosas de aplicar. En esta clase ya se presentan problemas de erosiones moderadas en suelos muy profundos a profundos, de relieves planos a ligeramente planos, o moderadamente inclinados.
IV	Estas tierras tienen severas limitaciones que restringen la elección de plantas. Requieren cuidadosas prácticas y obras de manejo y conservación, las cuales a veces son difíciles y costosas de aplicar y mantener. Limitan la explotación económica a gran número de cultivos. Sin embargo, aplicando medidas muy rigurosas como manejo y conservación de suelos, se espera que ofrezcan rendimientos más altos. Igualmente, el control adecuado de inundaciones de tipo moderado permitirá alejar los riesgos de los cultivos y otras explotaciones agropecuarias sensibles a ese tipo de limitaciones.
VI	Son tierras con limitaciones muy severas que hacen inadecuado su uso para cultivos permanentes como frutales, bosques y pradera. Se requiere usar cuidadosas medidas de conservación y manejo. Las malas características que ofrece esta clase, en razón de las severas

CLASE	DESCRIPCIÓN
VI	limitaciones, impone la necesidad de manejar y conservar los suelos con normas muy estrictas. Preferentemente, deberán ser áreas en donde se debe incrementar la vegetación permanente. Si es de pasto, por ningún motivo deberá haber sobrepastoreo, ya que esta práctica tiende a precipitar la erosión. Aquellas áreas donde la profundidad efectiva, la pendiente, la pedregosidad y/o jocosidad superficial y textura, permitan la construcción económica de terrazas, podrán dedicarse a cultivos de semipermanentes o cultivos permanentes. Los suelos de esta clase siempre deberán tener una cubierta protectora para evitar que se agudicen los problemas erosivos.
VII	Son tierras con limitaciones muy severas que las hacen inadecuadas para cultivos. Son aptas para vegetación permanente como bosque y pradera, los cuales requieren de un manejo muy cuidadoso. Estas tierras tienen limitaciones permanentes, pues, en general, son pendientes muy abruptas y suelo muy superficiales. Debido a las limitaciones tan graves que presenta esta clase, su uso se limita principalmente a la vegetación permanente y, en las áreas de pendientes menos abruptas y potreros, con muy cuidadoso manejo. En general, los suelos de esta clase requieren prácticas de manejo muy especiales en relación con la conservación de las cuencas hidrográficas y protección de la vida silvestre.
VIII	Tierras que no son aptas para el uso agrícola, y únicamente lo son para la vegetación permanente con fines de protección silvestre y de recreo.

5.2.2.1. Usos del suelo y manejo de los recursos

Las características topográficas y edafológicas existentes en el área de estudio son las que van a condicionar el uso que se le pueda dar al suelo dentro del territorio municipal.

El uso actual del suelo en Nejapa está caracterizado por la agricultura de granos básicos y caña, que representa el 60% de su uso. El 25% se utiliza para plantaciones de café y el 10% para vivienda. En la Tabla 5.3 se hace una distribución pormenorizada del uso del suelo en todo el municipio y el porcentaje que representa.

En el Mapa de Usos de suelo (Mapa 1, Anexo 1), realizado a partir de talleres de recopilación de información y observaciones de campo, se puede observar la distribución de los distintos tipos de vegetación existente en el municipio. Se observa que en la ladera del volcán y en los cerros Picudo y Ojo de Agua, así como en una pequeña mancha en el este de El Bonete y en Tutultepeque, se practica el cultivo del café, caracterizado por ser permanente y utilizar árboles para dar sombra al arbusto, lo que produce una cobertura vegetal que protege el suelo de los impactos directos de las gotas de agua. Igualmente, facilita la infiltración del agua de lluvia, favoreciendo la recarga de los acuíferos subterráneos.

Tabla 5.3.- Usos del suelo en el municipio de Nejapa (tomado de UCA, 2001).

Uso de Suelo	Area (Km ²)	Porcentaje
Baldío	0.15	0
Bosque Natural	3.29	3.66
Botadero	0.05	0
Café	18.53	23.17
Caña y Granos Básicos	46.51	57.32
Comercial	0.01	0
Frutales	1.96	2.44
Industrial	0.47	0
Industrial Artesanal	0.02	0
Institucional	0.48	0
Otro	1.2	1.22
Vivienda	8.9	10.98
Vivienda Proyectada	0.35	0
Zona Urbana	0.79	1.22

Sólo una pequeña parte del municipio conserva parte del bosque original. Éste se encuentra principalmente en el cerro Picudo y algunas zonas de fondo de quebrada, que por su mala accesibilidad y tipo de terreno no han sido utilizadas para el cultivo. Así mismo, en el Cerro Ojo de Agua, y en el Cerro de Nejapa, se ha podido observar cómo la vegetación natural va invadiendo los cultivos de café abandonados.

En los cerros de Tutultepeque, Mulunga, La Tabla y Las Mesas se encuentra un cultivo arbóreo de teca. Son plantaciones realizadas en zonas de altas pendientes y con una morfología lineal.

En las zonas llanas del municipio se cultiva la caña de azúcar, situándose, en general, en una franja que recorre de sur a norte la parte central del municipio y que comienza en la base del volcán de San Salvador y acaba en Tutultepeque. Se trata de un cultivo en línea, que deja al suelo relativamente desprotegido después de la corta del mismo. A esto, hay que añadirle la costumbre de quemar la caña antes de su corta.

Debido a la presión demográfica existente en el municipio, se ha observado que el cultivo de los granos básicos se realiza en zonas de muy alta pendiente. El ejemplo más ilustrativo se puede encontrar en el cerro de Nejapa, donde se está trabajando el terreno de las laderas con una fuerte pendiente, para cultivarlo. Esto provoca una desprotección del suelo que, durante la época de lluvias, se traduce en el lavado y arrastre del material hacia el fondo de los valles, y en el consiguiente descalce de los bloques de basalto-andesita englobados en el mismo y que pueden llegar a rodar ladera abajo.

Sólo unas pequeñas áreas en el norte del municipio se pueden considerar como zonas de matorral o potreros. Se ha observado que suelen utilizarse como pasto para el ganado, si bien no soportan una presión grande en cuanto al número de cabezas que hacen uso del mismo.

6. GEOLOGÍA

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.

6.1. 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.

6.1.1. 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 6.1 se muestran las diferentes unidades litológicas (Baxter, 1984).

Tabla 6.1.- 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

Con formato: Fuente: 9 pt

6.1.2. 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.

6.2. Marco geológico local

La geología del municipio de Nejapa, 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 que aparecen diseminados por todo el territorio.

El trabajo realizado en el municipio de Nejapa 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 2, Anexo 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 agrupación diferente de los materiales, teniendo en cuenta los criterios que posteriormente se aplicarán para la realización de mapas relacionados con los riesgos geológicos y su posterior uso para la ordenación del territorio por parte de la municipalidad.

Cuaternario

Los materiales cuaternarios son aquellos que han sido acumulados por movimientos de ladera, procesos fluviales y procesos torrenciales.

El único depósito cartografiable generado por un movimiento de ladera se encuentra en el área de Las Marías. Se trata de un antiguo deslizamiento de pequeñas dimensiones que afecta a dicha localidad y se encuentra estabilizado en estos momentos. Existen otros movimientos de ladera cartografiables, evidenciados por antiguas cicatrices, de los que, sin

embargo, no quedan restos de sus depósitos, por lo que no han sido representados en este mapa.

Dentro de los procesos aluviales se ha podido identificar una pequeña llanura de inundación del río Acelhuate en la localidad de Las Vegas. Sin embargo, no existe un buen afloramiento en la zona que permita describir con exactitud la composición y textura de la misma. Se trata de una tierra vegetal de color blanquecino en superficie y gris oscuro en profundidad, que actualmente es cultivada con caña. Se observa un tamaño de grano limo-arenoso muy fino, no hallándose clastos de tamaños superiores.

Como resultado de los procesos torrenciales, se encuentra un gran abanico aluvial en Camotepeque procedente del Cerro de Nejapa y que en la actualidad es atravesado por la quebrada Las Conchas. Actualmente está estabilizado por la vegetación y sobre él se asienta la población y se cultiva.

En las afueras de Nejapa, hacia el norte, en el lugar del Sunza, se ha podido distinguir un depósito formado por varios abanicos aluviales que se unen para dar un único depósito que se extiende desde la quebrada Agua Zarca hasta dos quebradas más al norte de ésta. Sobre él se ha instalado la población y se realizan actividades agrícolas, encontrándose estable en estos momentos

En general, se trata de depósitos en forma de abanico pertenecientes a conos de deyección que se encuentran al pie del Cerro de Nejapa. Son depósitos constituidos por materiales heterométricos, compuestos por bloques de basalto-andesita de diverso tamaño, desde grava a métrico, englobados en una matriz limo-arenosa de color marrón oscuro.

En el tramo medio-bajo de las quebradas se han podido observar barras en su lecho.



Fotografía 6.1.- Aspecto de los basaltos-andesitas en superficie

Son depósitos constituidos por material de tamaño de grano arena gruesa y grava, de color gris medio. Estas barras aparecen tanto en la parte central como en el lateral del cauce, con unas dimensiones de unos 5 m de largo, 2 m de ancho y 0'5 m de alto. Dentro de las mismas se pueden observar secuencias de depósito, correspondientes al material que dejan las aguas en cada evento, dado el carácter discontinuo de la dinámica torrencial.

Basaltos-andesitas

Pertenece a lo que viene definido en el léxico estratigráfico como formación Cuscatlán. Concretamente, al miembro C3 (Baxter, 1984), que viene definido por rocas efusivas de tipo andesítico y basáltico. Se les atribuye una edad Plio-Pleistoceno.

Estas rocas se han encontrado principalmente hacia el norte del resalte que aparece en la parte media del municipio, así como en las zonas altas, en el cerro Las Mesas y Ojo de Agua.



Fotografía 6.2.- Perfil de alteración de los basaltos-andesitas.

Estos materiales afloran en superficie en forma de bolos de basalto-andesita aislados (Fotografía 6.1). En la parte norte del municipio, al norte del Cerro de Tutultepeque y abarcando el Cerro Picudo, dicha formación aparece con una intensa alteración exógena manifestada en forma de una exfoliación concéntrica, que le da un aspecto de “capas de cebolla” (Fotografía 6.2).

Basaltos-andesitas con piroclastos

Corresponden a la formación San Salvador, concretamente al miembro S5'a definido por Baxter (1984), formado por rocas efusivas básicas-intermedias, intercaladas con capas de piroclastos, lo que le da el aspecto típico de un estratovolcán. Su edad es Pleistoceno Superior o Reciente.

Se trata de coladas de basalto-andesita de gran continuidad lateral, alternadas con capas de piroclastos (Fotografía 6.3). Estos basaltos se encuentran fracturados, si bien no se identifican familias claras de discontinuidades, pareciendo



Fotografía 6.3.- Alternancia de coladas de lava-andesita y piroclastos.

disponerse al azar. Dichas fracturas presentan una baja continuidad, encontrándose cerradas o con una abertura mínima y rellenas de limo, no observándose alteración en las mismas. La mayor parte de estas discontinuidades se presentan húmedas e incluso con un cierto flujo, especialmente tras los eventos lluviosos. La fracturación observada en estos materiales presenta las características que se describen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Características de la fracturación presentada por las capas de basaltos-andesita de la formación San Salvador.

SITUACIÓN	MATERIAL	DIRECCIÓN	COMENTARIOS
N 13° 46' 09.1" W 89° 14' 45.7"	Basalto - Andesita	N 20 E N 90 E	Roca sana con matriz muy resistente, masiva. Fracturación abierta con una continuidad baja a muy baja. Juntas rellenas de limo húmedo.
N 13° 46' 09.2" W 89° 14' 45.2"	Basalto - Andesita	N 300 E N 175 E N 190 E N 270 E N 170 E N 305 E N 305 E	Roca sana con matriz muy resistente y aspecto masivo. Bloques medios a grandes. Fracturación abierta, moderadamente junta y baja continuidad. Relleno de limo húmedo. Plantaciones de café en las laderas.
N 13° 46' 09.6" W 89° 14' 44.4"	Basalto - Andesita	N 280 E N 240 E N 275 E N 20 E N 165 E N 185 E	Roca sana. Matriz muy resistente. Fracturación abierta, muy junta a junta y baja continuidad. Bloques grandes-medios. Relleno de limo húmedo. Cafetal en las laderas.
N 13° 46' 21.8" W 89° 14' 56.6"	Basalto - Andesita	N 80 E N 105 E N 65 E N 30 E N 225 E N 170 E N 200 E N 20 E N 210 E	Roca sana. Matriz muy resistente. Bloques grandes-medios. Fracturas abiertas, juntas a moderadamente juntas, con baja continuidad y rellenas de limo fino húmedo. Cafetal en las laderas.
N 13° 45' 59.5" W 89° 14' 51.2"	Basalto - Andesita	N 130 E N 45 E N 240 E N 10 E N 310 E	Diaclasas irregulares. Roca sana masiva con matriz muy resistente. Fracturación abierta, junta, de baja continuidad y rellenas de limo húmedo.
N 13° 46' 59.9" W 89° 14' 30.9"	Basalto - Andesita	N 190 E N 100 E N 165 E N 160 E N 125 E	Rocas sana masiva. Matriz muy resistente. Bloques grandes. Fracturas abiertas, una de ellas, ancha, rellena de limo húmedo y fragmentos de basalto-andesita de tamaño grava, de unos 3 cm. Baja continuidad. Vegetación autóctona en las laderas.

Las capas de piroclastos, intercaladas entre las coladas de basalto-andesita, están formadas por fragmentos homométricos, de entre 2 y 5 cm.

Basaltos-andesitas con piroclastos y tobas

Corresponde al único afloramiento de la formación Bálsamo que aparece en todo el municipio. Se encuentran exclusivamente en el Cerro de Nejapa y siguiendo a Baxter (1984) estarían representados los miembros b1 y b3 de dicha formación. Se le atribuye una edad Mio-Pliocena (Wiesemann et al., 1978) y Plio-Pleistocena (Stirton & Gealey, 1949 y Dürr, 1960).



Fotografía 6.4.- Aspecto de los bolos de basalto-andesita en superficie.

Dicha formación estaría constituida en el área de estudio por lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones de tobas endurecidas y aglomerados. Estos materiales afloran en el Cerro de Nejapa que representa un antiguo volcán desmantelado. La forma original de este cerro ha sido modificada debido a la erosión, presentándose cubierto actualmente por arcillas y limos rojos que muestran el avanzado grado de alteración de las lavas y tobas de esta formación.

Constituye el basamento impermeable sobre el cual descansan las lavas y rocas piroclásticas de las formaciones Cuscatlán y San Salvador

En el campo no se han podido distinguir los miembros b1 y b3, correspondientes a las tobas y los basaltos-andesitas, respectivamente, debido a la vegetación y al suelo que lo recubre. Se han podido distinguir basalto-andesitas en todo el cerro, si bien no se ha caracterizado el terreno de manera que se pudieran distinguir los distintos miembros. En la cima del cerro se ha observado un afloramiento en el que se alternan piroclastos (posible costra de enfriamiento de las coladas de lava) y coladas de basalto-andesitas de potencia decimétrica. En el resto del mismo, las rocas observadas son basalto-andesitas en forma de bolos (Fotografía 6.4), las cuales están alteradas supergénicamente en forma de "capas de cebolla". En un corte reciente, próximo a la cima, se ha observado el contacto entre un basalto muy competente y piroclastos de tamaño de grano centimétrico de color rojizo. Se han identificado las tobas en un único afloramiento, situado en una de las divisorias de aguas existentes en el cerro. Éstas se presentan con una morfología más suave, no observándose ningún canto de roca por encima de ellas.

Tobas

Corresponde al miembro C1 de la formación Cuscatlan (Baxter, 1984). Son el producto de varios eventos de nubes ardientes. Están caracterizadas por la presencia de bombas de pómez, de lavas dacíticas vítreas y andesitas entre una masa fina de cenizas no estratificadas.

Estas rocas aparecen en su totalidad al norte del Cerro de Nejapa, ocupando una franja al oeste del río Acelhuate, desde el cerro de Barba Rubia hasta la Quebrada de las Garzas en la parte norte del municipio, en Las Vegas. Se les asigna una edad Plio-Pleistoceno.

Se trata de rocas de tamaño de grano arena gruesa-grava fina, relativamente blandas y que se presentan formando capas de espesor decimétrico a métrico (Fotografía 6.5).



Fotografía 6.5.- Afloramiento de tobas.

No presentan, en general, ningún tipo de fracturación, excepto la generada por la acción de las raíces. Se ha observado que entre las capas más blandas aparecen unas capas de unos 30 cm. a 50 cm. de piroclastos de color gris oscuro con un tamaño de grano centimétrico. Estas capas forman costras más duras que, a veces, dan resaltes dentro de la formación, siendo las responsables de que haya algunos saltos de pequeñas dimensiones en el cauce del río San Antonio.

En zonas puntuales se han podido observar depósitos de pocos centímetros de espesor, que corresponden a lo que se podría denominar arenisca de tamaño de grano fino-muy fino de color gris verdoso con laminación paralela. No se han representado en la cartografía por sus pequeñas dimensiones. Los clastos que forman de estas areniscas serían fragmentos de rocas volcánicas como los descritos al principio de este apartado.

Tierra blanca



Fotografía 6.6.- Afloramiento de tierra blanca.

Pertenece al miembro S4 de la formación San Salvador, (Baxter, 1984). Es una secuencia piroclástica ácida y epiclastita volcánica subordinada y, localmente, efusiva ácida. Por métodos arqueológicos se le asigna una edad desde 1 d.c. hasta 300 d.d.. Según el C^{14} , su edad es de $260 \text{ d.c.} \pm 85$.

Se trata de cenizas volcánicas, caracterizadas por un color blanco, deleznable, con poca cohesión y con un tamaño de grano muy fino (limo arenoso), aunque en ocasiones se pueden observar partículas de mayor tamaño formadas por la acreción de los granos en forma de esferas (Fotografía 6.6). Estos materiales se encuentran diseminados por todo el territorio, cubriendo las demás formaciones. Su espesor es

muy variable, oscilando entre menos de un metro cerca de la cumbre del volcán de San Salvador y más de 7 metros en la base del mismo.

Conos de escorias



Fotografía 6.7.- Afloramiento de escorias.

Se definirían como pertenecientes a la formación Cuscatlán, miembro C3 (Baxter, 1984). Se trata de materiales sueltos que forman algunos de los cerros que aparecen al norte del municipio: Cerro Mulunga, Cerro La Tabla y Cerro Tutultepeque.

Esta formación está compuesta por piroclastos de color rojizo oscuro de tamaño de grano centimétrico, formando capas de granoclasificación negativa en sets planoparalelos, con una capa milimétrica de tamaño de grano muy fino que limita las distintas capas granulares (Fotografía 6.7). El tamaño de grano que presenta oscila de 1 mm a 2 cm, aunque algunos clastos pueden alcanzar los 15 cm.

La cohesión de estos materiales es nula, basándose su resistencia en el alto ángulo de rozamiento que presentan debido a la irregularidad y angulosidad de las partículas que los forman. Se trata de materiales muy porosos, con una compactación muy débil y fácilmente ripables. Presentan una disposición radial desde el punto de emisión, con un buzamiento medio de unos 30°.

6.3. Tectónica

6.3.1. 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.

6.3.2. Tectónica local

En el área de estudio existen una serie de fallas con rumbo NNW o SSE que atraviesan diagonalmente el área muy al norte, junto con otra falla principal con rumbo NNW y SSE que corta el volcán de San Salvador. Este conjunto de fallas definen la estructura y dirección del drenaje superficial y subterráneo de la región y, en general, la geomorfología de la extensa planicie que forma parte del área de estudio.

Tectónicamente, en el municipio existen dos estructuras geológicas importantes. En el sur, la falla principal que atraviesa el volcán de San Salvador, Buena Vista y La Puerta de la Laguna, determinando las cuencas hidrográficas de los ríos Sucio y Acelhuate.

En el norte existen una serie de fallas que atraviesan diagonalmente la región. A esta serie pertenecen la falla que corta el Cerro de Nejapa y la que crea un relieve positivo hacia el área central del municipio, definiendo la subcuenca del río San Antonio.

6.4. Geomorfología y relieve

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.

6.4.1. 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.

6.4.2. Contexto local

En el municipio de Nejapa se pueden distinguir tres áreas claramente diferenciadas desde el punto de vista geomorfológico.

Al sur se encuentra el volcán de San Salvador o Quezaltepeque. Representa la máxima altura del municipio, con 1.810 metros de altura. De él parten las dos quebradas más importantes del municipio y que sirven como límite del mismo. Al oeste la Quebradona y al este el Aguacatón, vertiendo sus aguas al río San Antonio. Estas quebradas comienzan a encajarse en la parte media alta de su recorrido, dando lugar a valles muy angostos y recubiertos de vegetación, tanto autóctona como asociada al cultivo del café. En sus laderas se han podido identificar pequeños movimientos de ladera superficiales, que afectan sólo al suelo vegetal que las recubre. Se han observado también caídas de bloques de basalto debido a su descalce cuando los piroclastos subyacentes han sido removidos.

Ambas quebradas llevan asociadas una red de pequeñas quebradas tributarias con las características que se describen en el Capítulo 7. Sus cauces son rectilíneos y están orientadas hacia el norte.

En la parte baja del volcán, el cauce de las quebradas se abre, haciéndose más anchas. No se ha podido observar ningún tipo de depósito de pie de monte debido a que el área está completamente transformada por la actividad antrópica, tanto por actividades de edificación como por la presencia de infraestructuras viarias, uso industrial y agrícola.

La parte central de municipio es la que ocupa el espacio comprendido entre la parte baja de la ladera del volcán y la pared de origen tectónico que con dirección E-W sirve como límite sur al cantón El Bonete, llegando hasta la Loma El Quebracho.

Esta zona se caracteriza por ser prácticamente llana, resaltando en ella los cerros de Nejapa, Ojo de Agua, Las Mesas, La Tabla y Mulunga. Estos cerros son antiguos volcanes que se encuentran en proceso de desmantelamiento. Los dos últimos son conos de escorias. El más importante de ellos por su tamaño es el cerro de Nejapa.

Los procesos que se han podido observar en ellos vienen condicionados, en su mayor parte, por la actividad humana que se realiza en sus laderas. El cerro de Nejapa es el que mayor presión antrópica soporta. Sobre él se cultiva milpa y se ha venido construyendo en los últimos años, provocando ciertas inestabilidades de ladera. Estos movimientos tienen lugar debido al lavado del suelo, como consecuencia del cultivo en laderas con un alto grado de pendiente. Esto provoca que se descalcen bloques de rocas, que hasta el momento eran estables al encontrarse cubiertas por una capa de suelo, afectando en su recorrido a las edificaciones que hay en la base del cerro. Se han observado, también, dos deslizamientos en la parte oeste y sur del cerro, que afectaron a la capa de suelo del mismo. Igualmente, se han identificado dos antiguos deslizamientos, uno en la zona de El Cedral, sobre el cual se ha instalado una escuela y edificaciones particulares. El otro está situado en Las Marías, encontrándose estabilizado y colonizado por cultivos.

Por otro lado, en la parte norte del pueblo de Nejapa y en Barba Rubia, se han identificado dos conos de deyección de materiales que provienen del desmantelamiento del cerro. Son conos antiguos y están totalmente cubiertos por cultivos. No presentan ninguna muestra de inestabilidad, por lo que se consideran inactivos.

En los cerros Ojo de Agua y Las Mesas, los procesos observados consisten en el rodamiento de bloques de basalto-andesita debido al uso agrícola del terreno, tal como se ha comentado para el cerro de Nejapa. No obstante, ambos cerros están muy vegetados, ya que en ellos se cultiva café y se planta teca para uso comercial. Sólo en el Ojo de Agua, en su cima, que es plana, se cultiva caña de azúcar.

Los dos cerros restantes son conos de escoria volcánica, con una morfología casi perfecta en cuanto a su forma cónica. No se han encontrado evidencias de inestabilidades en ninguno de ellos, a pesar que están deforestados o cultivados por granos básicos en su mayor

parte. En ambos cerros se ha podido observar que se ha extraído material de sus laderas, formando pequeñas canteras de áridos para la construcción. A pesar de la verticalidad de las paredes que presentan, el material se comporta de manera bastante estable, quizás debido a que los taludes de explotación no alcanzan una elevada altura.

El resto del territorio es una zona llana sobre la que circula el río San Antonio, dedicándose principalmente al cultivo de la caña de azúcar. En esta área, los procesos son de tipo fluvial, teniendo lugar en las márgenes del río. Éste presenta un cauce meandriforme con meandros muy evolucionados en algunos lugares. La problemática que plantea el río es su posible desbordamiento durante la época de lluvias, inundando zonas aledañas e interrumpiendo temporalmente las comunicaciones por carretera. Estas inundaciones pueden afectar a viviendas particulares que se encuentren cerca de su cauce, en la llanura de inundación del mismo.

El tercer área estaría situado al norte del resalte tectónico. Como accidentes importantes se encuentran el cerro de Tutultepeque y el cerro Picudo. Existen, también, pequeñas elevaciones a lo largo de toda la zona, pero de menor importancia que las dos anteriores. Esta zona se caracteriza por tener unas quebradas que vierten directamente sobre el río Acelhuate, con un encajamiento importante en las tobas sobre las que circulan. Son quebradas de pequeña extensión y de cauce muy estrecho. Sólo se han observado pequeñas inestabilidades relacionadas con el deslizamiento de suelos en sus laderas y pequeños desprendimientos debido a la acción de las raíces de las plantas. Sus laderas están forestadas por vegetación autóctona.

El cerro de Tutultepeque es un cono de escorias de forma cónica casi perfecta. En él se cultiva la teca y está forestado por vegetación autóctona. No presenta signos de inestabilidades, pero se ha podido identificar un cierto riesgo relacionado con una cantera de la que se extrajo material para construcción y que está aparentemente abandonada. Las paredes verticales de esta explotación podrían ser susceptibles de sufrir inestabilidades.

El cerro Picudo es el que está situado más al norte del municipio, tratándose de un antiguo volcán que está siendo desmantelado. Está totalmente vegetado por plantaciones de café y arbolado, y presenta un relieve homogéneo.

6.4.2.1. Unidades geomorfológicas

Además de las formas generales de relieve que aparecen en el territorio, se han distinguido las siguientes unidades geomorfológicas que aparecen en el Mapa Geomorfológico (Mapa 3, Anexo 1):

- Colinas aisladas: se trata de edificios volcánicos de pequeñas dimensiones que aparecen diseminados por todo el municipio. Son volcanes que están extintos en la actualidad y en proceso de desmantelamiento. Unos están formados por coladas de basalto-andesitas y piroclastos (cerros de Nejapa, Ojo de Agua, Picudo y Las Mesas), y otros son conos de escorias, fragmentos de roca de composición basalto-andesítica de pequeñas dimensiones que forman el edificio volcánico (cerros La Tabla, Mulunga y Tutultepeque)
- Conos de deyección: se definen como acumulaciones de derrubios que aparecen en la parte baja de una montaña. Estos materiales proceden de la parte alta del cerro de Nejapa y se desplazan hacia su base como movimientos de ladera o bien como material arrastrado por las quebradas durante los períodos en que éstas están activas. En el municipio se han identificado dos conos de deyección, uno que es cortado por la quebrada Las Conchas (Barba Rubia), y el otro, que es la unión de tres conos más pequeños y abarca un área que comprende desde las afueras del pueblo de Nejapa hasta la zona de La Presa, en el río San Antonio, aproximadamente. Este último está asociado a las pequeñas quebradas que bajan del cerro de Nejapa en esa zona.
- Escarpes: son áreas que presentan una fuerte inclinación, si bien son unas pocas decenas de metros. Normalmente tienen una zona llana en la parte superior para descender bruscamente hasta otra zona llana inferior, formando algo asimilable a un escalón. Esto se puede observar en El Chirrinal, Las Mesas, El Espino, El Quebracho y El Cerrito, así como en la parte oeste de El Bonete, cercana al cauce del río Acelhuate.
- Ladera del volcán: corresponde, como su nombre indica, a toda la ladera del volcán de San Salvador. Se ha decidido hacer una unidad diferente porque es una zona con fuertes pendientes y con unos procesos dinámicos mucho más activos que los observados en otras zonas del municipio. Por otro lado, se trata de un edificio volcánico en actividad, hecho que ya de por sí lo diferencia de los otros edificios volcánicos extintos.
- Llanura: abarca casi la totalidad de la zona central del municipio y un área que rodea al pueblo de Tutultepeque. Se caracteriza por su baja pendiente, casi inexistente en toda la zona. Sobre ella se practica el cultivo de la caña de azúcar y a lo largo de la misma circula el río San Antonio, que divaga por esta zona, formando meandros.
- Quebradas del volcán: esta unidad corresponde a las dos quebradas más importantes existentes, que a su vez sirven como límites del municipio. Se trata de las quebradas Aguacatón y Quebradona. A ellas va a parar toda una red de quebradas menores que recogen el agua y los materiales sueltos que están en la ladera del volcán, drenando todo el área que pertenece al municipio. En ambas 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 ningún tramo de las mismas se ha encontrado una acumulación de material que pueda provocar la colmatación de su cauce o la formación de presas temporales.

- Relieves suaves: con esta denominación nos referimos al resto del territorio municipal. Presentan unas características intermedias entre las zonas llanas y los escarpes. Se concentran, sobre todo, en la zona al norte del río San Antonio, alrededor de las lomas El Quebracho, El Espino, Monte Redondo y las del cantón de El Bonete. Se caracterizan por la presencia de pequeñas quebradas que son las causantes de las rupturas de pendiente del área.

7. 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.

7.1. Delimitación de la subcuenca hidrográfica

La subcuenca del río San Antonio forma parte de la cuenca del río Acelhuate que, a su vez, desemboca en el río más importante del país, el Lempa. El río nace en el pueblo de Nejapa y recorre la zona llana del municipio hasta desembocar en el río Acelhuate.

La cuenca de este río está limitada al norte por un escarpe de origen tectónico comprendido desde El Bonete hasta la loma El Quebracho (559 m). Desde el sur recibe las aguas que bajan del volcán de San Salvador o Quezaltepeque. Este volcán tiene dos picos importantes: el Boquerón (1893 m) y el Picacho (1960 m). Al este la cuenca está limitada por el Cerro de Nejapa (919 m) y el río Acelhuate y al oeste por los cerros Ojo de Agua (646 m) y Las Mesas (616 m).

7.2. 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

La red de drenaje de la cuenca tiene su origen en el volcán de San Salvador, en la cima conocida como El Boquerón.

Si bien, desde el punto de vista general de todo el volcán, la red de quebradas que baja de él puede ser definida como radial, las quebradas que van a dar al río San Antonio presentan un tipo de red paralela, común en áreas de fuertes pendientes.

Además de las quebradas del volcán de San Salvador, el río San Antonio recibe las aguas que bajan de las quebradas que tienen su nacimiento en el Cerro de Nejapa, y de las elevaciones de la zona noroccidental como el Cerro Ojo de Agua o el de Las Mesas. En este caso, la red de quebradas que llegan al cauce del río San Antonio se define como dendrítica.

Características del cauce principal, tipo de lecho y márgenes

Tomando como el lecho principal de una red de drenaje, aquel cuya cabecera alcanza la cota más elevada, 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. En el caso del río San Antonio, obtenemos un índice de sinuosidad con un valor de 1.9.

Para clasificar este parámetro dentro de los diversos cauces fluviales propuestos por Schumm (1963) nos encontramos que pertenece a los que él denomina canales irregulares. 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 meandrante.

Los canales meandrantes suelen llevar carga en suspensión o de todo tipo, generando incisión del canal así como ampliación del ancho de los meandros. En ocasiones, la alta meandración no sólo es producto de una baja pendiente, sino, sobre todo, de una marcada resistencia del relieve, que obliga a que el trazado discurra por las líneas de menos resistencia estructural, especialmente si la energía del canal es escasa o esporádica.

Hay que tener en cuenta que el índice 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 la 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.

En cuanto a la variación del tipo de material que se encuentra a lo largo de la red de drenaje diferenciamos dos unidades diagnósticas: las quebradas y el río San Antonio.

Quebradas

Las quebradas se desarrollan en la ladera de un estratovolcán. Esto es importante porque el tipo de material que va a aportar el sustrato va a venir condicionado por la naturaleza del mismo. En este caso, el volcán 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. Estas consideraciones deben ser tenidas en cuenta en la descripción de los materiales que se van a encontrar en el lecho y márgenes de las quebradas.

Las pendientes de las quebradas son irregulares, estando condicionadas por la alternancia de materiales cohesivos (roca) y no cohesivo (piroclastos). Esto hace que la pendiente dependa de la propia inclinación de la colada de lava que, en ocasiones, se ve interrumpida bruscamente por un salto vertical que puede alcanzar hasta los 20 m, dando una morfología escalonada, aunque con escalones muy distanciados entre sí.

Esta morfología va a dar lugar a saltos, rellanos y zonas de transición, con cierta pendiente, entre ellos.

En general, en la parte alta de las quebradas se observa que el lecho es de roca viva, apareciendo sólo material de depósito en los rellanos inmediatos a los saltos. Estos materiales son de tamaño de grano grava, aunque puede aparecer aislado algún clasto de mayor tamaño. En los márgenes de las mismas, pueden aparecer depósitos de movimientos de ladera. Dichos depósitos están compuestos por material piroclástico de tamaño de grano grava junto con el suelo que lo recubre. En algunas zonas, junto con este material, aparecen grandes bloques de basalto-andesita que provienen del descalce de los mismos. Estos materiales, que se depositan directamente en el cauce o en sus márgenes, presentándose de diferente manera y proporción según las zonas, pasan progresivamente a formar parte del material acarreado por el caudal de las quebradas. Por otro lado, la vegetación cubre la totalidad de las laderas, estabilizándolas y reduciendo la susceptibilidad de que el material que presentan sea removido. En general, se trata de una zona donde existe una fuerte erosión y transporte de los materiales, que deja completamente lavado el lecho, pudiendo verse la roca madre (Fotografía 7.1).



Fotografía 7.1.- Afloramiento de basalto-andesitas en el cauce de las quebradas.

En la parte media de las quebradas los depósitos de los márgenes son similares a los de la parte alta, si bien las laderas pierden algo de su verticalidad. La diferencia radica en la presencia de mayor cantidad de material de tamaño de grano grava y suelo en el fondo de las mismas, apareciendo en menos ocasiones la roca viva y con más frecuencia grandes bloques de basalto-andesita junto con depósitos arenosos en las zonas más llanas. Esto nos indica que se trata de una zona de actividad intermedia de los procesos erosivos, donde se depositan

sedimentos de tipo medio, que sólo son transportados durante eventos de mayor intensidad.

En la parte baja de las quebradas, las laderas suelen ser de menor altura, apenas 5 m, y muy tendidas y recubiertas por plantaciones y vegetación. El lecho suele ser arenoso con tamaños de grano grueso, en ocasiones grava, y se caracteriza por la presencia casi continua de bloques de basalto-andesita de diferente tamaño (Fotografía 7.2). Esta es la zona de sedimentación de las quebradas, donde aparece el material acarreado por las avenidas que se producen durante la época de lluvias.

La presencia de materiales de gran diámetro y de la roca viva en las quebradas, normalmente secas, revela un comportamiento mucho más violento que el de aquellos que mantienen un caudal superficial, como es el caso del río.

Las características generales que podemos considerar para las quebradas, también definidas como canales de dinámica torrencial, serían las siguientes:



Fotografía 7.2.- Depósitos en el cauce de La Quebradona.

- Cursos de agua con flujos esporádicos y avenidas intermitentes y bruscas.

- Generalmente encajados y con paredes verticalizadas (dado su gran poder erosivo).
- Con escarpes de cabecera abruptos y de erosión muy activa.
- Pendientes irregulares en su perfil que pueden llegar a ser muy fuertes.

Río San Antonio

El río San Antonio nace en el pueblo de Nejapa. La primera parte de su recorrido discurre por la planicie que rodea la localidad en dirección norte, hasta llegar al escarpe de origen tectónico que limita el cantón del Bonete. A partir de ese momento y hasta su desembocadura en el río Acelhuate, su cauce se encaja, presentando una morfología diferente a la llevada hasta ese momento.



Fotografía 7.3.- Río San Antonio a su paso por la llanura.

otros con limo (Fotografía 7.3). Esto revela continuos procesos de transporte y depósito. De la misma manera, pueden aparecer tamaños superiores, como cantos de varios centímetros o bloques, que provienen de los aportes de las quebradas en los momentos de mayor actividad de las mismas. Estos materiales también son transportados por el río en las etapas de grandes avenidas.

En el segundo tramo, el río se encaja en la roca, presentando un trazado más rectilíneo (Fotografía 7.4). En él, los sedimentos encontrados son similares a los

El río San Antonio recibe aportes, tanto de las quebradas que tienen su nacimiento en el Boquerón, al sur, como de las quebradas que provienen del Cerro de Nejapa, al este, y las que se originan en los cerros Ojo de Agua y Las Mesas, al oeste.

La pendiente del tramo que discurre por la llanura es baja, dando una morfología meandriforme al río. En este tramo el lecho es predominantemente arenoso, si bien pueden aparecer tramos con grava y



Fotografía 7.4.- Encajamiento del río San Antonio en las tobas.

que aparecen en el anterior. En las zonas donde forma pequeños desfiladeros, suele aflorar la roca madre en el lecho, presentando zonas de acumulación de arena y grava en las áreas donde se remansa o donde se abre el valle. En este tramo también aparecen materiales de tamaños superiores, como cantos decimétricos y bloques métricos.

Interpretación

Después del recorrido a lo largo de la cuenca del río, se puede concluir que cualquier tamaño de partículas puede llegar a aparecer en cualquier área del curso fluvial, si bien el tamaño predominante es el que revela la fuerza y sistema erosivo característico en el tramo fluvial considerado.

Por ello, la determinación de los tamaños de las partículas predominantes presentes a lo largo la cuenca nos indica las áreas donde la erosión lineal incide de manera más acusada, arrancando material de las laderas y transportándolo aguas abajo hasta unas distancias dependientes de la energía que alcance la corriente.

La abundancia de fracciones finas indica una zona de remanso o bien una llanura de inundación, donde la velocidad del agua disminuye debido a una reducción de la pendiente, y donde la lámina de agua puede expandirse en áreas más extensas que en un cauce o en un valle cerrado.

La presencia de guijarros de modo abundante (aunque no predominante) es significativa del material que puede llegar a acarrear el río esporádicamente. Más aún, si están presentes materiales como rocas o cantos rodados de dimensiones similares (homométricos), lo que puede confirmar que los materiales del lecho del río han sido transportados en un amplio recorrido.

A modo de resumen, puede decirse que los índices cualitativos dan una aproximación válida a la dinámica de la cuenca, que ha sido clasificada según Senciales (1995), mostrándose los resultados para ambas unidades diagnóstico en la Tabla 7.1.

Los índices teóricos más altos de actividad están en las quebradas, que presentan una fuerza potencial erosiva elevada (acción de ablación y transporte). Por el contrario, los valores más bajos muestran la menor agresividad desarrollada en las llanuras, por donde discurre el río San Antonio.

Tabla 7.1.- Características del cauce, tipo de lecho y márgenes, según Senciales (1995)

PARÁMETRO	QUEBRADAS		RÍO SAN ANTONIO	
	Tipología	Valor	Tipología	Valor
Tipología de la red	Paralela	3	Dendrítica	1
Sinuosidad del cauce	Rectilíneo	3	Tortuoso e irregular	1
Tipo de lecho	Guijarros, rocas y cantos rodados sin caudal	4	Material fino. Presencia de guijarros y cantos. Con rocas y cantos rodados	2
Tipo de márgenes	Roca aflorante y de acumulación	2	Roca aflorante y de acumulación	2
VALORACIÓN		12		6

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

El análisis morfométrico de una cuenca es un método de trabajo que permite medir la erosión de los cursos de agua teniendo en cuenta las características geométricas de los elementos de las redes de drenaje.

En este sentido, Strahler (1964), define la morfometría fluvial como la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial.

Para el análisis morfométrico, este mismo autor 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).

En definitiva, con el análisis morfométrico se pretende cuantificar la evolución del paisaje fluvial, definir el estadio de evolución en que se encuentra y valorar su estado erosivo.

Para el análisis morfométrico de la cuenca que nos ocupa se va a seguir la metodología desarrollada por Strahler (1964). Un aspecto importante a considerar en el momento de interpretar los valores obtenidos para los distintos índices, es que los cauces no son permanentes. Se trata de torrentes por los que sólo circula agua después de eventos tormentosos o durante la época de lluvias, de manera intermitente. Debido a esta característica de no permanencia, la cuenca puede no quedar fielmente caracterizada.

Características físicas principales de la cuenca

Se definen, en primer lugar, las principales características físicas de la cuenca que aparecen en la Tabla 7.2 para su posterior análisis e interpretación morfométrica.

Tabla 7.2.- Principales características físicas de la cuenca.

PARÁMETRO	VALOR
Área (km ²)	57.57
Perímetro (m)	42489.73
Elevación máxima (m)	1810
Elevación mínima (m)	310
Desnivel máximo (m)	1500
Longitud del cauce principal (m)	10084
Diferencia máxima de elevación en el cauce principal (m)	120
Longitud máxima de la cuenca (m)	15650
Número de canales de orden 4	1
Número de canales de orden 3	4
Número de canales de orden 2	15
Número de canales de orden 1	60
Longitud media de canales de orden 4 (m)	10470
Longitud media de canales de orden 3 (m)	2775
Longitud media de canales de orden 2 (m)	2255
Longitud media de canales de orden 1 (m)	1364
Suma de la longitud total de todos los órdenes (m)	144925
Menor distancia entre el inicio y el fin del cauce principal (m)	5155

Relación de bifurcación

La relación de bifurcación es la relación existente entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato 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 valores de bifurcación obtenidos para las quebradas están comprendidos entre los valores 3 y 5 (Tabla 7.3), que se corresponden con los pertenecientes a áreas de montaña sin demasiada dependencia estructural. En concreto, estos valores son 3'75, 4 y 4'26, lo que definiría una cuenca bien jerarquizada ya que a lo largo de su trazado presenta relaciones de

bifurcación homogéneas. Esto se confirma después de aplicar la fórmula de Horton para calcular el número teórico de cauces de una cuenca que representan una red bien jerarquizada. En este caso, el valor obtenido es muy cercano al número de cauces existente, observándose una diferencia deficitaria de seis cauces.

Tabla 7.3.- Relaciones de bifurcación.

Cuenca del Río San Antonio		
Orden del cauce	Número de cauces	R _b
1	60	3'75
2	15	4
3	4	4'26
4	1	
		4'003

Desde el punto de vista de la implicación hidráulica, estas relaciones de bifurcación indican un alto riesgo de inundación por concentración brusca de la escorrentía, la cual, en principio, presentaría un marcado retardo y alcanzaría un pico de crecida importante (Sala y Gay, 1981). Esto hace que sean potencialmente erosionables por acción lineal y, sobre todo, laminar; siempre que exista un cambio brusco de las condiciones que mantienen la estabilidad actual, como son la pérdida de suelo o el cambio de nivel de base de la cuenca. En este caso, las laderas expuestas están cubiertas por una vegetación permanente, si bien se trata de cultivos de café, existiendo árboles aislados que se mantienen por las exigencias del propio cultivo. Es necesario reseñar que el suelo existente bajo las plantas de café está desnudo, sin ningún tipo de vegetación que lo proteja.

Relación de longitud

Es la relación existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior, es decir:

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

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"

Tabla 7.4.- Longitudes medias.

Cuenca del Río San Antonio	
Orden del cauce	Longitud media (m)
1	1364
2	2255
3	2775
4	10470

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 7.4, son los siguientes:

$$2 - 1 = 1'65$$

$$3 - 2 = 1'23$$

$$4 - 3 = 3'77$$

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.

En el caso que nos ocupa, la relación entre los órdenes de cauces con un número más bajo se corresponde con los de cabecera de la cuenca, los cuales está muy cerca de la cota más alta de la ladera del volcán, con lo que el incremento de su longitud va a quedar muy reducido. Por otra parte, el valor cercano a 3 corresponde a la relación entre el cauce que lleva agua durante todo el año y las quebradas de tercer orden, si bien dicho cauce está restringido longitudinalmente hacia el norte por un escalón tectónico, lo que le obliga a divagar por la llanura existente entre su nacimiento y dicho escalón, dando una morfología meandriforme muy acusada.

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.

Tabla 7.5.- Factor de forma de la cuenca.

Cuenca	Factor de forma
Río San Antonio	0'5

El valor máximo, para cuencas circulares es de 1'275. El valor obtenido para la cuenca en estudio es de 0'5 (Tabla 7.5), 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.

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

Tabla 7.6.- Factor de circularidad.

Cuenca	Factor de circularidad
Río San Antonio	0'4

Si consideramos que el valor máximo, correspondiente a una cuenca circular, es 1, se puede observar que el valor resultante de 0'4 (Tabla 7.6), coincide con la conclusión obtenida a partir de la relación de elongación, donde se definía a la cuenca como elongada.

Densidad de drenaje

López Bermúdez et al (1988) consideran este parámetro como uno de los más importantes en el análisis morfométrico, ya que describe el estado erosivo de la cuenca.

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 Km²
 $\sum L_k$ = suma de la longitud total de los cauces de todos los órdenes
 A_k = área total de la cuenca

Tabla 7.7.- Densidad de drenaje de la cuenca.

Cuenca	Densidad de drenaje
Río San Antonio	2'5

Para Strahler, los valores menores de 10, y en este caso el valor obtenido es de 2'5 (Tabla 7.7), indican una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica y espesa cobertura 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.

La cuenca estudiada está situada dentro de un clima tropical cálido no desértico, con una estación lluviosa que aporta agua a 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. Estas características concuerdan bastante con la interpretación 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 (Tabla 7.8):

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.

$$R_r = H / L_{\text{máx}}$$

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

Tabla 7.8.- Razón de relieve.

Cuenca	Razón de Relieve	Razón Relativa de Relieve
Río San Antonio	0'096	0'035

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 50% 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. En

estos puntos, los cauces se encuentran encajados en el substrato donde predomina la ausencia de material en el cauce, únicamente algunos bloques de grandes dimensiones se encuentran encajados en los puntos donde el cauce se estrecha. A medida que disminuyen los desniveles, a partir de la cota 800 m se encuentra material en el propio cauce, indicando la disminución del poder denudativo del caudal.

7.4. 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.

8. ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS

8.1. Análisis de Inundaciones

La amenaza por inundaciones en el municipio de Nejapa se centra en las zonas que rodean las orillas del río San Antonio y las áreas cercanas a las quebradas que lo recorren.

En este 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 estudio hidrometeorológico. A partir de este último, se han calculado los caudales esperados para distintos periodos de retorno. Para dichos caudales, se ha modelizado mediante el programa HEC-Ras, el área inundada, anchura de flujo, altura, etc, del río San Antonio con el fin de determinar complementariamente a las observaciones de campo, aquellas áreas que se encuentran bajo la amenaza de inundación.

8.1.1. 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 un 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 con las quebradas, y en aquellas calles que funcionan como quebradas durante las lluvias. Igualmente, en el río San Antonio se han reportado lugares donde éste ocupa su llanura de inundación con mayor asiduidad en momentos de crecida. Los puntos de inundación localizados pueden verse en el Anexo 4.

Avenidas e inundaciones asociada a las quebradas

En el trabajo de campo realizado en las quebradas se ha observado que tienen poco material acumulado por inestabilidades. Las laderas de todas ellas están colonizadas por vegetación autóctona o por plantaciones de café. Esto permite que haya una mayor retención del suelo y aumente el grado de infiltración del agua en el mismo. No obstante, debido al carácter torrencial de los flujos que se producen en las quebradas, caracterizados por una energía y capacidad de erosión alta, las aguas llevan un volumen importante de carga sólida procedente de la erosión de las laderas, así como de la removilización de los depósitos gravitacionales.

En general, en las zonas altas de las quebradas, caracterizadas por una mayor pendiente, se va a producir un proceso de erosión y transporte. Conforme se reduce la pendiente, la energía disminuye hasta que el flujo pierde la capacidad de transportar la carga que lleva, depositándola. En estas zonas se produce un ensanchamiento de los cauces, siendo propicias para que puedan tener lugar en ellas los desbordamientos.

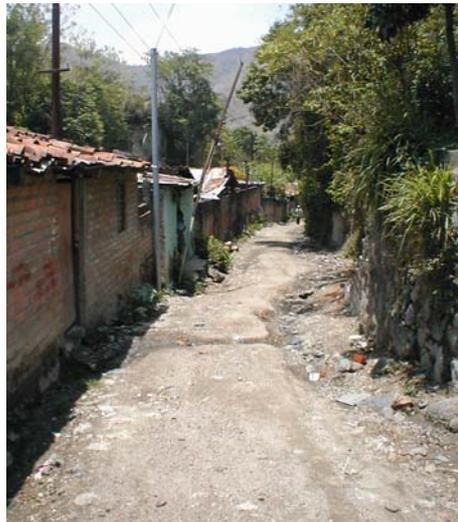


Fotografía 8.1.- Intersección camino-quebrada en Barbarubia donde los vecinos expresan la necesidad de hacer un puente o arreglar el camino.

Durante el trabajo de campo se ha observado la existencia de puntos de inundación en aquellos lugares donde los cauces de las quebradas intersectan a las calles que sirven de comunicación entre las comunidades (Fotografía 8.1). Los problemas comienzan con la época de lluvias, cuando las aguas que bajan por las quebradas son capaces de llevarse el material empleado para la construcción de los caminos y recuperar su cauce natural. En estos casos, los caminos se vuelven intransitables durante el tiempo que dura la tormenta, es decir, durante 1

ó 2 horas. La importancia de este hecho radica en que, en ocasiones, existen poblaciones que pueden quedar incomunicadas o con un difícil acceso, con las consecuencias que ello conlleva en un caso de emergencia. Por esta razón, se sondeó entre la población cuáles eran los puntos en los que sugerirían la construcción de puentes. La posición de los mismos aparece en el Anexo 4.

Por otro lado, se ha podido constatar que donde mayores problemas se presentan relacionados con las inundaciones es en el casco urbano de Nejapa, concretamente en Calle Vieja, debido a una mayor exposición de bienes y personas. Esta comunidad se sitúa en torno a una calle estrecha, a lo largo de la cual se disponen las casas. Durante el año, esta calle sirve de lugar de vertido de las aguas residuales procedentes de las tareas domésticas (Fotografía 8.2). Los problemas se plantean en la época de lluvias, cuando durante los eventos tormentosos, la calle funciona como una quebrada, canalizando todas las aguas de lluvia hasta el cauce del río San Antonio que pasa cerca del comienzo de la calle. Esto provoca la inundación de las casas que se encuentran en la parte más baja de la misma, cerca del lugar donde van a parar las aguas buscando el camino hacia el río. Según los habitantes de las viviendas afectadas, todos los años, durante la época de lluvias, el agua entra al menos un par de veces en sus casas, alcanzando una altura de unos 20 cm. (Fotografías 8.3 y 8.4). En determinados



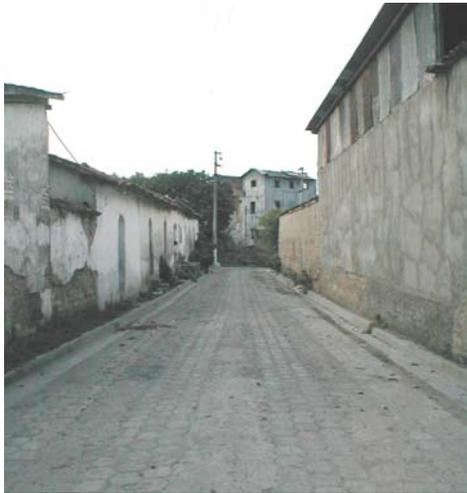
Fotografía 8.2.- Aguas residuales procedentes del uso doméstico bajando por Calle Vieja.



Fotografía 8.3.- Viviendas afectadas por inundaciones en Calle Vieja.



Fotografía 8.4.- Detalle del interior de las parcelas afectadas en las que el agua alcanza unos 20 cm.



Fotografía 8.5.- Calle paralela a la calle Principal que funciona como un quebrada durante las tormentas.

casos, además de las pérdidas y daños a los bienes materiales contenidos en las casas, esto ha supuesto la pérdida de algunas “champitas” que tenían construidas o el tener que romper algunos muros de sus casas para facilitar la salida del agua.

En el casco urbano de Nejava, se ha observado, además, que durante las tormentas, la calle paralela a la calle Principal (a la izquierda según se baja) sirve como camino de las aguas de lluvia hacia el río, alcanzando éstas un palmo de altura y convirtiendo a esta vía en un camino de difícil acceso para los peatones (Fotografía 8.5). Se ha observado, igualmente, una importante acumulación de material arrastrado por las aguas, sobre todo de tamaño de grano grueso (arena gruesa y grava).

Existen también problemas relacionados con el funcionamiento de algunas calles como quebradas en Aldea Mercedes y El Cedral, lo que genera el deterioro de los caminos y la dificultad o imposibilidad de su uso por parte de los automóviles (Fotografías 8.6 y 8.7).



Fotografía 8.6.- Calle que funciona como una quebrada en Aldea Mercedes.



Fotografía 8.7.- Calle que funciona como una quebrada en El Cedral.

Por otro lado, en la zona de El Salitre se ha localizado un punto en el que las aguas corren buscando un camino hacia la quebrada, pasando junto a una vivienda en la que las

aguas alcanzan hasta unos 40 cm. de altura, arrastrando a su paso los materiales que rodean esta casa (Fotografía 8.8).



Fotografía 8.8.- Vivienda con problemas de inundación en El Salitre.

embargo, y aunque la casa se encuentra cercana al nacimiento de la quebrada, la altura que pueden alcanzar las aguas en el cauce puede ser mayor para periodos de retorno mayores, esto implicaría una mayor energía y poder erosivo del flujo que podría transportar una importante carga sólida o desencadenar movimientos de ladera, con las consiguientes consecuencias para una vivienda situada en el cauce de la quebrada. Por estas razones, se considera urgente la reubicación de esta vivienda en otro lugar.

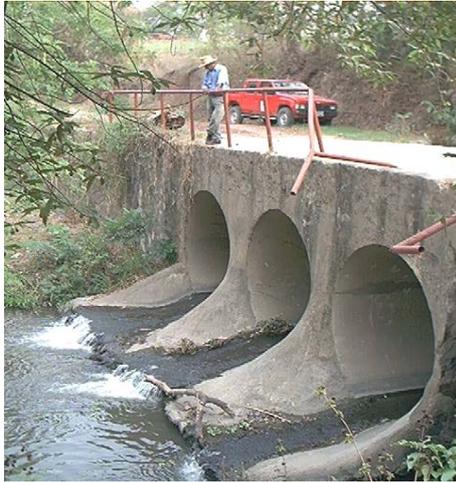
En este apartado hay que mencionar la presencia de una vivienda situada en el cauce de una quebrada, en el cantón San Jerónimo Los Planes (Fotografía 8.9). Dicha vivienda tiene un año y medio y sólo ha pasado un invierno en la quebrada, durante el cual, sus dueños han excavado una zanja para desviar las aguas y han levantado un pequeño muro de tierra para proteger la casa. A pesar de estas medidas, el agua entraba en la vivienda, alcanzando una altura de unos 20 cm. Sin



Fotografía 8.9.- Vivienda situada en el cauce de una quebrada en San Jerónimo.

Avenidas e inundaciones asociadas al río San Antonio

En el río San Antonio se han podido observar puntos de inundación en la zona central de su recorrido, donde se hace meandriforme y la llanura de inundación del mismo es más amplia. En esta zona, las inundaciones afectarían casi exclusivamente a los cultivos que existen a su alrededor. No obstante, se observa en el municipio una tendencia a ganar terreno al río para ampliar la zona de cultivos, avanzando en la llanura de inundación hasta llegar casi al cauce del mismo y realizando incluso muros de contención con neumáticos rellenos de cemento para protegerse de las crecidas de éste. No se observa, sin embargo, en el río San Antonio un comportamiento que suponga una especial amenaza para bienes y personas, por lo que, simplemente, se recomienda respetar la dinámica natural del río y, por lo tanto, sus zonas de inundación.



Fotografía 8.10.- Evidencias del paso del río por encima del puente.



Fotografía 8.11.- Acumulación de material en las secciones de los puentes.

Por otro lado, en ocasiones se observan problemas en los puntos donde el río es atravesado por puentes (ver Anexo 5). Estos problemas se deberían principalmente a dos causas que pueden hacer que el río llegue, incluso, a pasar por encima de los puentes (Fotografía 8.10). Por una parte, se observa, un inadecuado dimensionamiento de determinadas obras que no pueden dar salida al volumen de agua que en un momento dado ocupa el cauce del río. Por otra parte, la acumulación de material en las secciones de los puentes, impide la libre circulación del flujo de agua, provocando un desbordamiento de éste aguas arriba (Fotografía 8.11).

8.1.2. Análisis de la 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 los factores que desencadenan las inundaciones, se va a realizar un estudio meteorológico seguido de un estudio hidrometeorológico

Dichos estudios permitirán 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. Analizando la capacidad de las secciones se podrá determinar si los caudales líquidos, por sí solos, darán lugar a desbordamientos

8.1.2.1. Análisis de precipitaciones

El estudio de las precipitaciones es de vital importancia en la evaluación y predicción de la amenaza natural del área de estudio, ya que es uno de los principales factores desencadenantes de los procesos de erosión, desbordamiento e inundaciones. Para ello, es necesario tener información sobre la magnitud de las precipitaciones ocurridas en el pasado y sobre los fenómenos meteorológicos que las producen.

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.

En el presente proyecto se ha realizado un análisis de las precipitaciones que se producen en la zona que abarca el municipio de Nejapa, en base a datos históricos de lluvia

recogida en 5 estaciones próximas al área. La nomenclatura y coordenadas de las estaciones quedan recogidas en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1.- Ubicación de las estaciones con registro de precipitaciones (fuente: SNET).

Estaciones	m.s.n.m	Coordenadas	
		Latitud Norte	Longitud Oeste
Aeropuerto de Ilopango	615	13° 41.9'	89° 16.9'
San Salvador Observatorio	700	13° 42.1'	80° 12.3'
Guazapa Insalco-Anda	440	13° 52.5'	89° 10.4'
Apopa Insinca	420	13° 47.8'	89° 10.8'
El Boquerón	1800	13° 44.1'	89° 16.9'

Los datos de precipitaciones de las cinco estaciones no tienen un registro completo. El número de total de años durante los que se han registrado los datos de precipitaciones diarias desde 1969, aparecen en la Tabla 8.2. A partir de ellos se han obtenido los datos mensuales, anuales, las medias y las máximas, realizando un análisis detallado de las series, con el fin de obtener un estudio en conjunto de las precipitaciones del área del municipio de Nejapa.

Tabla 8.2.- Años de registro de precipitaciones disponibles desde 1969 hasta la actualidad (fuente: SNET).

Estaciones	Nº de años de registro de precipitaciones disponibles desde 1969 a la actualidad.
Aeropuerto de Ilopango	34
San Salvador Observatorio	22
Guazapa Insalco-Anda	17
Apopa Insinca	30
El Boquerón	24

Los registros que van a ser tratados han sido proporcionados a través del servicio meteorológico del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET).

Precipitaciones anuales

Las precipitaciones anuales acumuladas, recogidas en el período de tiempo entre 1969-2002, han sido representadas en la Figura 8.1 a partir del tratamiento de los datos

elaborados. En ella se observa que las precipitaciones anuales oscilan entre los 1.100 mm y los 2.250 mm en el conjunto de las estaciones, excluyendo la de El Boquerón, en donde oscilan entre 1.745 mm y 2.630 mm.

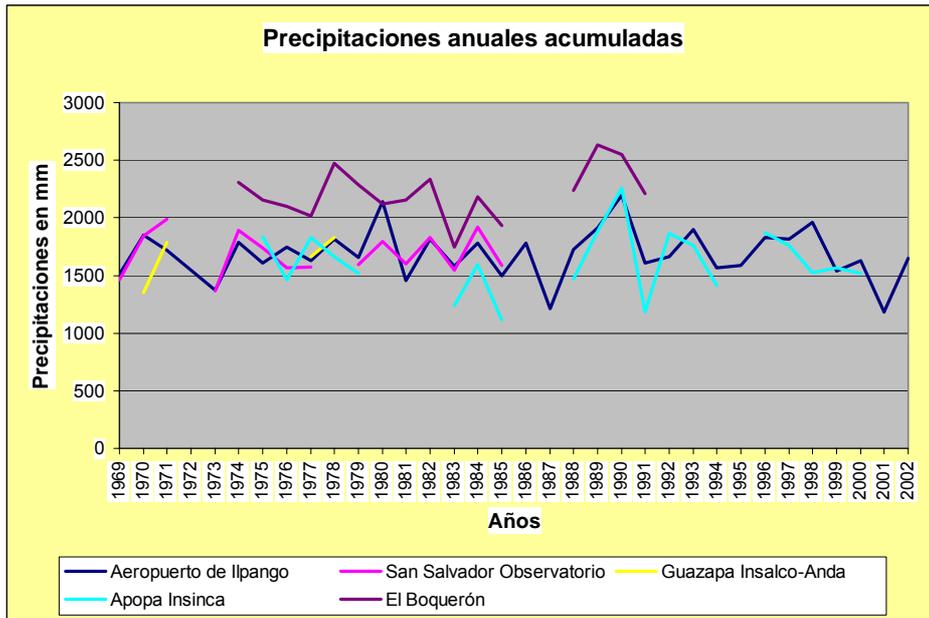


Figura 8.1.- Precipitaciones anuales acumuladas en las diferentes estaciones (1969-2002).

Las precipitaciones siguen un patrón oscilante a lo largo del tiempo, con máximos de lluvias que, en algunas estaciones, superan las medias consideradas. Las precipitaciones anuales medias acumuladas se representan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3.- Precipitaciones anuales medias acumuladas (mm).

Estaciones	Precipitaciones anuales medias (mm)
Aeropuerto de Ilopango	1683.7
San Salvador Observatorio	1668.3
Guazapa Insalco-Anda	1733.8
Apopa Insinca	1615.1
El Boquerón	2214.9

En la estación del El Boquerón es donde se registran las medias más elevadas. En el resto de las estaciones las variaciones medias entre ellas apenas superan los 70 mm, excluyendo la estación de Guazapa, pero el dato no se considera muy fiable debido a la corta duración de la serie disponible (como se observa en la Tabla 8.2.) y a que ésta es bastante incompleta.

Se ha realizado un análisis de la relación entre la precipitación media acumulada en cada una de las estaciones y la altura a la que se encuentra dicha estación. Como se observa en la Figura 8.2., existe una cierta correlación entre precipitación y altura, registrándose las máximas precipitaciones en las cotas más altas y las precipitaciones mínimas en las cotas inferiores. El comportamiento de la estación de Guazapa no se ajusta tanto al patrón, debido probablemente a la ya comentada escasez de datos registrados en la serie disponible.

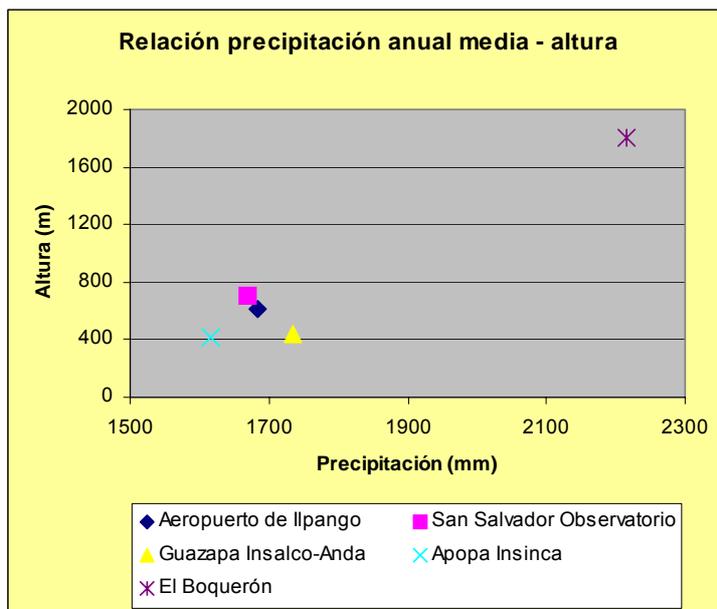


Figura 8.2.- Precipitaciones anuales medias acumuladas frente a altura de las diferentes estaciones.

Precipitaciones mensuales

Las precipitaciones mensuales se concentran en la estación húmeda, que abarca los meses de mayo a noviembre, mientras que en el resto de los meses, la precipitación es escasa o nula. En la Figura 8.3 se ha representado la distribución de lluvias mensuales medias a partir del tratamiento de los datos diarios, registrados en cada estación durante las

series anuales disponibles. Se observa claramente esta distribución estacional, siendo en los meses de junio, julio, agosto y septiembre donde se registran las máximas precipitaciones.

Las lluvias recogidas durante los meses más lluviosos oscilan entre los 270 mm. y 340 mm., excluyendo la estación de El Boquerón, donde se pueden observar dos picos de precipitación en los meses de junio y septiembre, llegando hasta 410 y 445 mm., respectivamente.

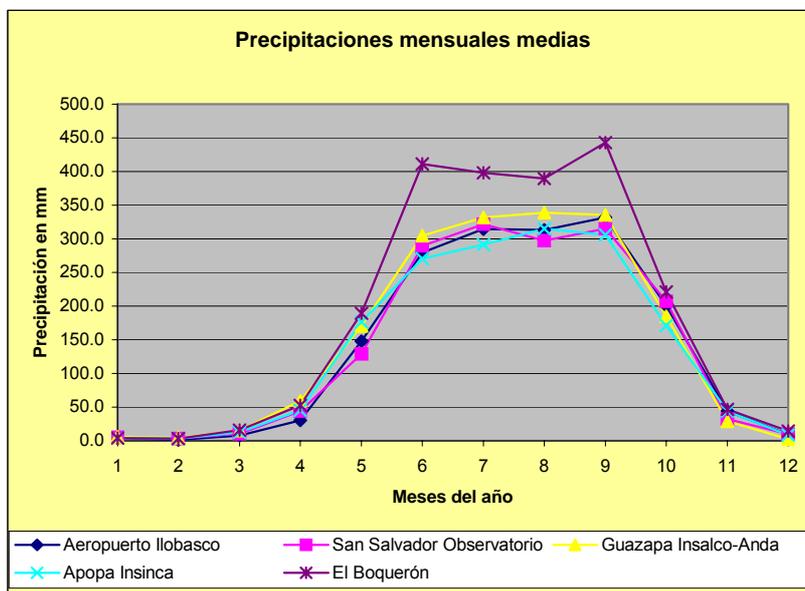


Figura 8.3.- Precipitaciones mensuales medias.

Precipitaciones diarias

Las precipitaciones diarias, más concretamente su intensidad, son las que van a condicionar la ocurrencia o no de la amenaza de inundaciones, determinando su magnitud. Debido a la ausencia de datos disponibles de intensidades horarias se ha recurrido a procesar las precipitaciones diarias acumuladas. Considerando éstas, así como la tipología de lluvias características de la región y los datos facilitados de forma directa por parte de la población, se relaciona la lluvia con la ocurrencia de eventos catastróficos, la posibilidad de amenazas por inundación y su magnitud.

Las altas acumulaciones diarias de lluvia suelen tener la peculiaridad de estar asociadas a fenómenos tormentosos de gran intensidad, que pueden llegar a precipitar todo el

agua en una o dos horas. Esto provoca una situación de aumento repentino de escorrentía superficial que moviliza las masas de terreno en las zonas superiores.

A partir del estudio estadístico de las máximas lluvias diarias, podremos calcular cada cuánto tiempo podría repetirse una lluvia de magnitud determinada con el fin de estimar la peligrosidad de desbordamientos e inundaciones que puedan afectar a áreas habitadas.

Se han extraído los datos de las máximas precipitaciones diarias ocurridas en cada uno de los años de las series de la estación de El Boquerón, por ser donde se producen los mayores registros pluviométricos, y de la estación de Apopa Insinca, por considerarse la estación más representativa para el estudio que nos ocupa, al ser la más próxima al municipio de Nejapa y encontrarse a una altitud similar. Estos valores serán utilizados en un cálculo estadístico de probabilidad de ocurrencia.

En la Figura 8.4, se observa un comportamiento cíclico de las precipitaciones máximas en el tiempo, al igual que se observaba en los datos anuales, si bien en los diarios este comportamiento es más marcado. Los ciclos suelen ser diferentes en función de la estación de la que se trate. En el caso de la estación del Boquerón encontramos periodos de seis años relativamente homogéneos seguidos de un pico de precipitación anual. En el caso de Apopa suelen producirse máximos cada dos años. Si se comparan los picos de máximas lluvias anuales y diarias, no se corresponden en su totalidad. Tampoco coinciden los picos de máximas precipitaciones diarias en las dos estaciones. Esto puede ser debido a que los fenómenos meteorológicos que dan origen a las lluvias máximas diarias suelen ser fenómenos de alta intensidad, abundantes y de corta duración, y se pueden producir localmente aislados. Estos no son los que siempre aportan la mayoría del volumen de lluvias anual. No obstante, son los que a efectos de amenaza de inundaciones más interesa conocer y predecir.

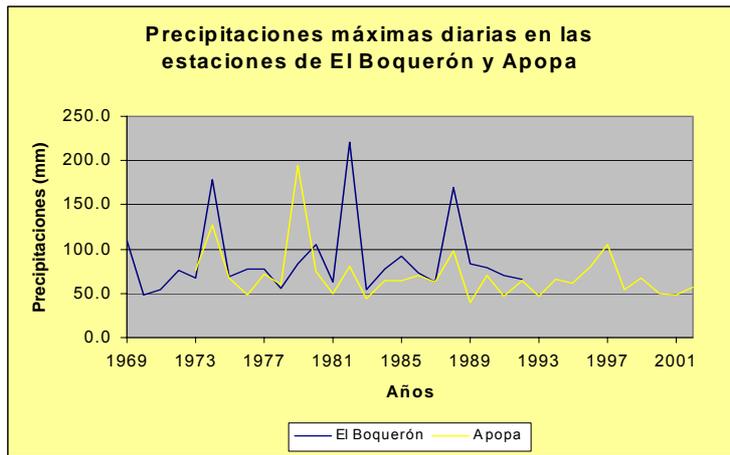


Figura 8.4.- Precipitaciones máximas diarias anuales para las estaciones de El Boquerón y de Apopa.

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, 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 24 años de la serie continua de El Boquerón (sólo se ha interpolado un dato).

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 la Tabla 8.4

Tabla 8.4.- Precipitaciones tipo y periodos de retorno para las estaciones de El Boquerón y Apopa.

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	
	El Boquerón	Apopa Insinca
2	81.5	66.2
5	126.0	95.9
10	155.5	115.5
25	192.7	140.4
50	220.4	158.8
100	274.8	177.1
200	275.1	195.3
500	311.1	219.4

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 de 2 años, las lluvias pueden superar los 81.5 mm en regiones con una cota topográfica elevada y los 66.2 mm en regiones más bajas, lo que indica que existe una probabilidad del 50% en un año, de que se produzcan precipitaciones superiores a 81.5 mm y 66.2 mm en un día, respectivamente.

Para los periodos de retorno de 5, 10 y 25 años, considerados como valores válidos para la distribución de Gumbel, existe una probabilidad de que ocurran en un año del 20%, 10% y 4% respectivamente.

8.1.2.2. 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.

Para alcanzar el objetivo planteado se han empleado entre dos métodos de estudio con el fin de comparar sus resultados. El primero se basa en el análisis de los caudales máximos instantáneos de las estaciones de aforo existentes en la cuenca y el segundo parte de los datos de precipitación resultantes del estudio pluviométrico.

- En el primer método se utilizan los datos obtenidos en las estaciones de aforo de:

Acelhuate – Guazapa
Acelhuate – San Diego
Acelhuate – Paleca

El método de trabajo consiste en ajustar los datos de los caudales máximos instantáneos a una distribución Gumbel mediante papel estadístico y efectuar una correlación posterior con sus áreas correspondientes, realizando varios ajustes caudal-área (lineal, exponencial, logarítmico o potencial) para interpolar los resultados a la cuenca del río San Antonio. Una vez realizada esta operación se obtendrán los caudales para cada periodo de retorno.

Sin embargo, con este método no se pudieron obtener datos fiables debido a la falta de datos hidrológicos suficientes en dichas estaciones, ya que para que el tratamiento estadístico sea fiable se debe disponer, al menos, de una serie de datos de 10 años. Igualmente, la serie de registros de la estación deberá abarcar no menos de 20 años, con el fin de que no se concentren en un mismo período de tiempo y tener datos de ciclos lluviosos, medios y secos.

- El segundo método utiliza los datos pluviométricos, concretamente 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 del río San Antonio. Características morfológicas

La subcuenca del río San Antonio forma parte de la cuenca del río Acelhuate que, a su vez, desemboca en el río más importante del país, el Lempa. El río nace en el pueblo de Nejapa y recorre la zona llana del municipio hasta desembocar en el río Acelhuate.

Como ya se dijo en el Capítulo 7, la cuenca de este río está limitada por el norte por un escarpe de origen tectónico comprendido desde El Bonete hasta la loma El Quebracho (559 m). Desde el sur recibe las aguas que, por medio de quebradas, bajan del volcán de San Salvador. Este volcán tiene dos picos importantes: el Boquerón (1893 m) y el Picacho (1960 m). Por el este, la limita el Cerro de Nejapa (919 m) y el río Acelhuate. Por el oeste los cerros Ojo de Agua (646 m) y Las Mesas (616 m).

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, T_c , de una cuenca.

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

$$T_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.38}$$

Tc: tiempo de concentración (minutos)

L: longitud cauce principal (metros)

H: diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (metros).

- Según Témez:

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

Tc: tiempo de concentración (horas)

L: longitud del cauce principal (kilómetros)

J: pendiente media del cauce principal (%)

- Según Giaudotti:

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

A: superficie de la cuenca (km²)

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 8.5

Tabla 8.5.- Parámetros de cálculo para hallar el tiempo de concentración.

Parámetro	Valor
Superficie de la cuenca	58 km ²
Desnivel de la cuenca	1500 m
Diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal	120 m
Longitud del cauce principal	10084 m
Pendiente media del cauce principal	1.19 %

Los resultados obtenidos para la subcuenca del río San Antonio, según los tres autores anteriores son los que muestra la Tabla 8.6

Tabla 8.6.- Tiempo de concentración calculados según diferentes autores.

	Tiempo de concentración	
	En minutos	En horas
Kirpich	129.9	2.16
Temez	100.85	1.68
Giaudotti	88.28	1.47

Intensidad de lluvia

Para la estimación de la intensidad de lluvia (I) en la subcuenca se ha utilizado la metodología expuesta por Téméz (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, 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:

$$I_t / I_d = (t_1 / t_d) (28^{0.1} - T_c^{0.1}) / (28^{0.1} - 1)$$

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 periodo de retorno.

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).

El cociente I_t/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 este municipio, teniendo en cuenta las características de ambas zonas.

Tabla 8.7.- Intensidades calculadas para la región del volcán.

Periodos de retorno	Intensidades en la región del volcán	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	3.40	22.99
5	5.25	35.54
10	6.48	43.86
25	8.04	54.36
50	9.18	62.16
100	10.32	69.89
200	11.46	77.60
500	12.96	87.77

Para el cálculo de I_t se ha utilizado el resultado de la aplicación de la fórmula de Kirpich por considerarse que es la que mejor se ajusta a la región (Tablas 8.7. y 8.8).

Tabla 8.8.- Intensidades calculadas para cotas inferiores al volcán.

Periodos de retorno	Intensidades en cotas inferiores al volcán	
	I_d (mm/h) Medias diarias correspondientes al periodo de retorno considerado	I_t (mm/h) Media correspondiente al periodo de duración t
2	2.76	18.67
5	4.00	27.05
10	4.81	32.59
25	5.85	39.60
50	6.62	44.79
100	7.38	49.95
200	8.14	55.09
500	9.14	61.88

Coefficiente 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 Po (mm).

Por otro lado, el umbral de escorrentía Po 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.

El valor obtenido para el umbral de escorrentía ha sido $P_0 = 23.02$ mm.

Cálculo de caudales máximos

El cálculo de caudales se ha llevado a cabo mediante el Método de Caudales Máximos o Racional, utilizando la expresión:

$$Q = (C \cdot I \cdot A / 3.6)$$

En la Tabla 8.9. 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.

Tabla 8.9 .- Caudales obtenidos para distintos periodos de retorno.

T (años)	Área (km ²)	Pd (mm)	I_t (mm/h)	C	Q (m ³ /s)
2	57.57	81.49	22.99	0.33	117.65
5	57.57	126.01	35.54	0.47	267.12
10	57.57	155.49	43.86	0.54	378.75
25	57.57	192.73	54.36	0.62	538.97
50	57.57	220.35	62.16	0.66	656.07
100	57.57	247.78	69.89	0.70	782.36
200	57.57	275.10	77.60	0.73	905.90
500	57.57	311.15	80.77	0.76	981.65

8.1.2.3. Modelo hidrológico e hidráulico propuesto

Con el objeto de determinar las áreas inundables a lo largo del río San Antonio, se ha modelizado el comportamiento de éste para distintos periodos de retorno, comparando los resultados con las observaciones de campo y estudio de la fotografía aérea.

Para realizar dicha modelización, se ha empleado un modelo matemático de flujo estacionario, el programa HEC-Ras de US Army Corp of Engineers (USACE, 1997). Este modelo debiera haberse utilizado sobre una base cartográfica a escala 1:5.000. Sin embargo, esto no fue posible, por lo que se empleó una escala 1:25.000, insuficiente para obtener unos resultados fiables, ya que la equidistancia entre sus curvas de nivel es de 10 m, lo que supone un margen muy amplio para poder apreciar la elevación de la lámina de agua. Por otro lado, el método trabaja 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 de sedimentos.

A pesar de estas limitaciones, se ha considerado oportuno realizar este trabajo, como método complementario a las observaciones de campo y fotografía aérea para determinar las áreas de inundación a lo largo del río San Antonio.

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 entre turbulento y laminar, más cerca del primero. Esto significa que muy pocas veces son capaces de alcanzar el régimen de flujo supercrítico.
- Rugosidad. Los valores de rugosidad de Manning (n) empleados son los siguientes: en zonas de márgenes se considera $n = 0,08$ y en las zonas de canal $n = 0,05$.
- Caudales. Los caudales considerados han sido obtenidos en el cálculo hidrometeorológico (Apartado 8.1.2.2) para distintos periodos de retorno.
- Geometría. Se han realizado 17 perfiles a lo largo de todo el río (Figura 8.5).

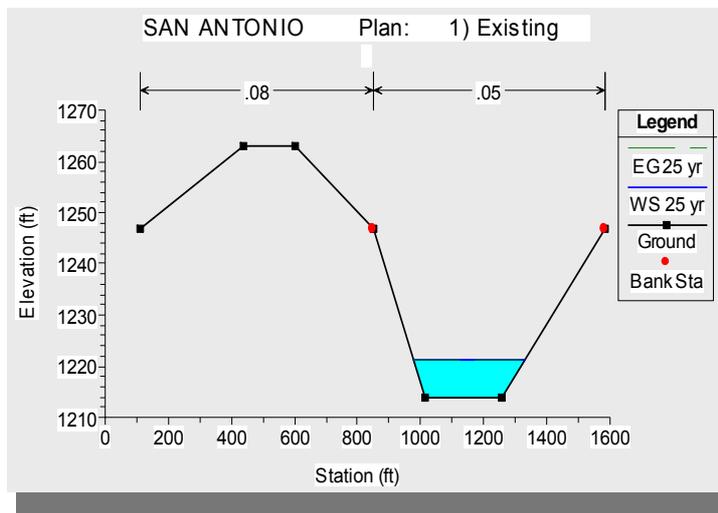


Figura 8.5.- Ejemplo de uno de los perfiles realizados a lo largo del río San Antonio.

Resultados

Las zonas de inundación determinadas mediante la modelización (Figura 8.6) coinciden con aquellas observadas en campo y fotografía aérea. Para definir estas zonas, durante el trabajo de campo se constató la altura y extensión del río en épocas de avenidas e inundaciones, mediante la identificación de los depósitos sedimentarios existentes fuera del cauce habitual. Se emplearon también como marcadores, los residuos antrópicos que aparecen colgados en la vegetación arbustiva y arbórea que crece en los márgenes y llanura de inundación del río.

A partir de todos estos datos se elaboró un Mapa de Zonas Inundables (Mapa 11, Anexo 1). En este mapa puede observarse que existe una zona inundable que corresponde al tramo de río a partir de la presa, a la altura de las Mariñas, y otra a la altura de El Naranjo, donde el río se desvía a favor del escalón natural antes de llegar a El Bonete.

Desde el punto de vista geomorfológico se trata de zonas llanas, en las que el cauce del río tiene una altura escasa y una llanura de inundación muy amplia. Estas zonas se aprovechan para el cultivo de caña de azúcar, por lo que los daños causados por el desbordamiento del río se restringen a las pérdidas que pudieran darse en la producción del cultivo.

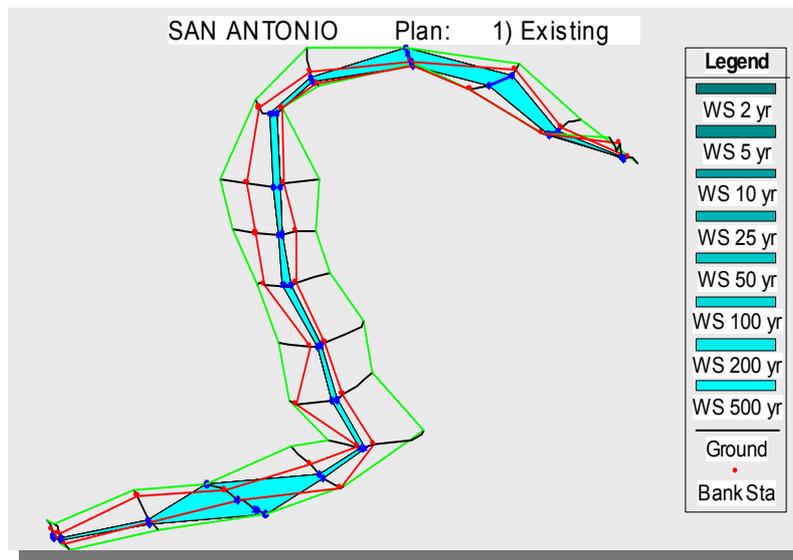


Figura 8.6.- Salida gráfica de la modelización mediante HEC-Ras, en la que pueden observarse las zonas inundables.

Por otro lado, los valores obtenidos mediante el programa HEC-Ras para la *altura del flujo* y el *área de extensión* del mismo sobre la llanura de inundación se omiten en el presente informe debido a las limitaciones comentadas, por lo que se considera que carecen de fiabilidad. Por esta razón, al no disponer de una base cartográfica de mayor escala, no se pueden llegar a diferenciar las avenidas para distintos períodos de retorno, por lo que, en realidad, no estaríamos hablando de peligrosidad por inundaciones, sino de susceptibilidad al considerar exclusivamente las áreas inundables. No obstante, esta metodología es válida para estimar la peligrosidad por inundaciones si se dispone de la información necesaria.

8.2. Análisis de inestabilidades de ladera

El equilibrio de una ladera o de un talud, está determinado por la resistencia y el esfuerzo cortante. Este último tiende a producir el movimiento del terreno, mientras que la resistencia tiende a impedirlo. Los procesos de inestabilidad en laderas ocurren cuando el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia.

Para facilitar un mayor entendimiento de su dinámica, se han caracterizado los factores condicionantes y desencadenantes de estos procesos.

Los factores condicionantes o factores internos son de carácter natural y establecen las características resistentes de las laderas. Se trata son aquellas características propias del terreno tales como el tipo de material, estructura, vegetación, etc. que determinan en qué puntos concretos se pueden generar movimientos de ladera, definiendo principalmente la tipología, mecanismo y modelo de rotura. Es decir, son aquellos componentes del terreno que lo van a hacer más o menos vulnerable a la ocurrencia del fenómeno estudiado.

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 los sismos, precipitaciones, erupciones volcánicas, 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.

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 (Anexo 2) y su localización, representada mediante la cartografía de las áreas afectadas (Mapa 4, Anexo 1).

En el presente estudio, se han considerado cinco factores condicionantes: pendiente, litología, vegetación, orientación de laderas y procesos activos, de los que se han realizado las correspondientes cartografías. La influencia de cada uno de estos factores se detalla en el apartado correspondiente, en el que también se explica la metodología empleada para la elaboración de estos mapas temáticos.

La identificación e integración de estos factores y el inventario de inestabilidades han sido la base para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera del municipio de Nejapa (Mapa 8, Anexo 1).

A partir de los resultados de este mapa, y teniendo en cuenta que existen zonas en el volcán de San Salvador caracterizadas como de alta susceptibilidad y con posibilidad de generar lahares, se ha modelizado su comportamiento para estimar el posible alcance de este tipo de movimientos y las zonas afectadas por los mismos.

Por otro lado, se han considerado los sismos y las precipitaciones como desencadenantes de las inestabilidades de ladera. Ambos factores han sido analizados con el fin de establecer una probabilidad de ocurrencia y evolución. Teniendo en cuenta algunos

factores condicionantes y estos desencadenantes se ha aplicado el método de Mora y Varhson (1993) para obtener una zonificación de la amenaza por inestabilidades de ladera.

8.2.1. 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 municipio. Estas fueron cartografiadas e inventariadas, con el fin de analizar tipologías, dimensiones, depósitos asociados, grado de desarrollo, grado de estabilidad, entre otras características. Teniendo en cuenta la dificultad de acceso, la escala de trabajo y el tiempo disponible no ha sido posible caracterizar todas las inestabilidades cartografiadas, así como no se habrán cartografiado todas las inestabilidades existentes en el área de estudio. No obstante, se considera que sí se han caracterizado todas las tipologías de movimientos de ladera existentes, así como los materiales y las zonas en las que se pueden producir éstos.

De forma general, se pueden diferenciar cuatro tipos de movimientos de ladera, deslizamientos, desprendimientos, rodamientos de bloques y flujos, que afectan a distintos tipos de materiales.

8.2.1.1. Deslizamientos

En el área de estudio, los deslizamientos traslacionales afectan principalmente a los suelos que se encuentran sobre la formación de basaltos-andesitas con piroclastos, aflorantes en las quebradas del volcán de San Salvador y sobre la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas, presentes en el Cerro de Nejapa (Mapa 2, Anexo 1).

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 cara del mismo. Generalmente se trata de superficies de discontinuidad estructural o de contacto entre dos 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.

Debido a la propia naturaleza de estas inestabilidades, que en el área de estudio afectan generalmente al suelo vegetal, dichos movimientos se caracterizan por ser poco profundos (Fotografía 8.12). Se observan así unas profundidades de 0.5 a 1.5 m. Normalmente, los deslizamientos se encuentran asociados a zonas de pendientes altas en el caso de las vertientes de las quebradas, con valores mayores de 50°. En el caso del cerro de



Fotografía 8.12.- Deslizamiento de suelo vegetal en la ladera de una quebrada.

Nejapa, estas inestabilidades pueden producirse con pendientes menores, a partir de 30°. Esto es debido a que dicho cerro se encuentra deforestado en su mayor parte, por lo que no existe una cobertera vegetal que ayude a estabilizar los materiales.

En general, no se han observado deslizamientos activos y prácticamente todos se han clasificado como recientes. Solamente, se han identificado tres inestabilidades fósiles mediante foto aérea, localizadas en el Cerro de Nejapa y en la Loma El Quebracho, que probablemente sean deslizamientos traslacionales. En esta loma, dichas inestabilidades se habrían producido sobre la formación de basaltos-andesitas (Mapa 2, Anexo 1) que apenas da lugar a este tipo de

movimientos, debido probablemente a que aflora en lugares con menor pendiente. Sin embargo, podría afirmarse que existen más deslizamientos históricos y fósiles en el área de estudio, principalmente en la zona del volcán. El problema es que debido a la velocidad de crecimiento de la vegetación, las inestabilidades son cubiertas en pocos años, resultando difícil su identificación, ya sea en campo o mediante foto aérea.

En cuanto a su grado de estabilidad, los deslizamientos fósiles pueden considerarse estables, así como algunos de los presentes en las quebradas del volcán, que una vez movilizados alcanzaron de nuevo unas condiciones de equilibrio. Sin embargo, la mayor parte de las inestabilidades de las quebradas del volcán deben considerarse como latentes, dado que, a pesar de que su movimiento tiende a estabilizar el material, la socavación a la que se ven sometidos estos movimientos en su base por la acción de los torrentes, vuelve a inestabilizar los materiales.

Sobre su grado de desarrollo, éste se considera detenido en el caso de los movimientos fósiles y de alguno de los existentes en las quebradas del volcán, considerándose incipiente para aquellos cuya estabilidad se ha estimado como latente. No se han identificado grados de desarrollo avanzado en este tipo de movimientos, debido probablemente a que las zonas con mayor pendiente y más susceptibles de dar lugar a estos movimientos, como son las laderas de las quebradas presentan una espesa cobertera vegetal que ayuda a estabilizar este tipo de inestabilidades que, en principio, afectan sólo a la capa de suelo más superficial. Sobre esto último, hay que tener en cuenta la buena práctica llevada a

cabo por los agricultores que trabajan en esta zona y que les lleva a revegetar, plantando café de nuevo, aquellas áreas que han sido movilizadas.

Acerca de los depósitos, en el caso de los deslizamientos fósiles, éstos se conservan, aunque no son bien visibles en campo, debido a que han sido re TRABAJADOS por acción antrópica y actualmente son áreas de cultivo. En el caso de las inestabilidades de las quebradas, estos depósitos son movilizados nuevamente en su base por la acción de los torrentes, siendo arrastrados aguas abajo, por lo que pasado un tiempo, puede observarse in situ la falta de material que evidencia la existencia de un deslizamiento, pero no los depósitos de éste.

En general, puede estimarse este tipo de inestabilidades como movimientos poco desarrollados y de dimensiones pequeñas a moderadas, aunque no se descarta que puedan o hayan podido ser mayores ya que el alto grado de vegetación existente no permite identificar y caracterizar movimientos más antiguos.

Los factores desencadenantes de los movimientos observados son las precipitaciones, los sismos e incluso la propia socavación del agua en la base de los taludes, siendo favorecido el movimiento, sea cual sea el desencadenante, por un grado de saturación alto del material, circunstancia que se da con el avance de la época de lluvias. Estos factores se comentarán con más detalle en los siguientes apartados.

En cuanto a los elementos afectados por este tipo de movimientos son básicamente terrenos de cultivo, café en el caso de las quebradas del volcán y milpa en el caso del Cerro de Nejapa y la Loma del Quebracho.

8.2.1.2. 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, esto implica la existencia de taludes escarpados. El material se deposita a cotas más bajas o al pie del talud.

Este tipo de movimientos afecta en la zona de estudio a la formación de basaltos-andesitas con piroclastos, a los conos de escorias y a la tierra blanca (Mapa 2, Anexo 1).

Desprendimientos en la formación de basaltos-andesitas con piroclastos

Estos materiales afloran en las quebradas del volcán de San Salvador. En estas áreas, la red hídrica está poco desarrollada y muy encajada, conformando un relieve quebrado y favoreciendo la formación de paredones verticales.

Generalmente, este mecanismo ocurre en aquellas zonas que ya han sido afectadas por deslizamientos traslacionales y desprovistas de cobertera. Los niveles de basaltos-andesitas, intercalados entre depósitos piroclásticos de menor competencia, fácilmente erosionables por la socavación de los torrentes, se presentan dando resaltes en el terreno, por lo que la propia fuerza de la gravedad provoca la caída de los bloques.

Este tipo de movimientos está condicionado por la existencia de diaclasas y fallas. La superficie de rotura que individualiza el bloque puede ser una discontinuidad preexistente o una grieta de tracción provocada por los sismos. La pérdida de resistencia y apertura de las superficies de discontinuidad es motivada, en gran medida, por la presencia de agua en las mismas, dando lugar a la creación de presiones intersticiales que actúan sobre el bloque, separándolo.

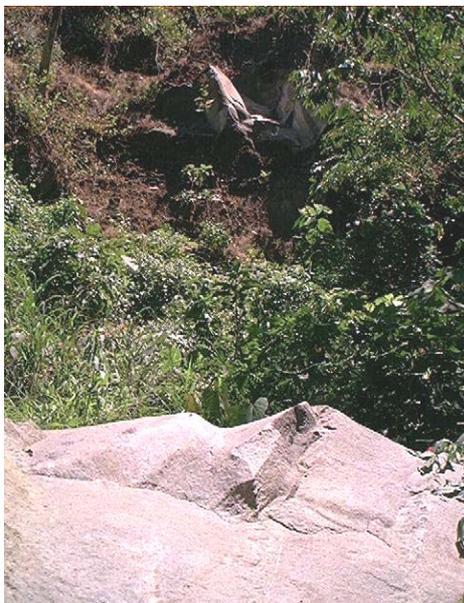
Por otro lado, la erosión que ejercen los torrentes sobre las capas de piroclastos, hace que se vayan desprendiendo bloques según se va desmantelando la matriz que los engloba.

Todos los desprendimientos observados en estos materiales se pueden considerar básicamente recientes, ya que los depósitos pertenecientes a movimientos más antiguos ya habrían sido movilizados por las aguas que llevan los torrentes durante la época de lluvias, de manera que no se encontrarían in situ. Esta es una de las dificultades con las que se cuenta, dado que en ocasiones es difícil distinguir aquellos depósitos que son el resultado de los desprendimientos, de aquellos que son producto del arrastre de materiales del torrente.

El grado de estabilidad podría considerarse activo, ya que se trata de un proceso dinámico en estos materiales, presentando un grado de desarrollo que va de incipiente a avanzado según los escarpes considerados.

En cuanto al tipo de depósito, se trata de bloques de basalto-andesita de tamaños que oscilan de centimétricos a métricos (3 m), siendo, generalmente, de mayor tamaño aquellos bloques que proceden de los basaltos-andesitas (Fotografía 8.13) y de menor tamaño los que proceden de las capas de piroclastos.

Estos procesos, que como ya se ha dicho, ocurren de manera relativamente frecuente, son desencadenados por los sismos o las precipitaciones, incluyendo la socavación producida por los torrentes. En zonas en las que la roca material se encuentra más disgregada, la caída



Fotografía 8.13.- Caída de bloques de basalto-andesita en las quebradas.

en conjunto de pequeños bloques y partículas finas puede ser provocada por la actuación de los vientos.

En este caso, los elementos afectados por estos movimientos serían superficies de cultivo, principalmente zonas cafetaleras.

Desprendimientos en la formación de tierra blanca

La tierra blanca se encuentra aflorando en las laderas del volcán de San Salvador, así como en la zona centro y, en menor medida, en el norte del municipio. En la ladera alta del volcán y en los afloramientos de la zona norte, los espesores no superan generalmente el metro. Sin embargo, en la ladera baja del volcán y en la zona centro esta formación alcanza una mayor potencia, siendo visibles en algunos taludes hasta 7 m de espesor.

Es en los taludes de estas áreas donde se han observado las inestabilidades que afectan a estos materiales. Dichas inestabilidades, generalmente desprendimientos de suelo, tienden a ser superficiales y parecen iniciarse por tensión en la mitad superior de los taludes. La formación de grietas de tensión es un factor importante en el desarrollo de la inestabilidad, que va seguida de un vuelco de los bloques superiores o de una rotura por cizalla en la parte baja del talud (Fotografía 8.14).

Este tipo de movimientos aparecen de forma localizada a lo largo de los taludes presentes en el municipio. No obstante, según los testimonios recogidos, tras eventos extraordinarios como unas precipitaciones especialmente intensas o de larga duración, o un sismo, dichas inestabilidades pueden aparecer de forma masiva, de manera, que a veces no es fácil identificar dónde termina una y dónde comienza la siguiente.



Fotografía 8.14.- Desprendimiento de tierra blanca en el talud de un camino.

Los movimientos que se observan actualmente son recientes, pudiendo clasificar el grado de estabilidad de la tierra blanca en los taludes como latente. Por otro lado, el grado de desarrollo de las inestabilidades en dichos taludes puede considerarse como incipiente.

El tamaño de estos movimientos observados está condicionado por las dimensiones de los taludes, de manera que su altura coincide con la del talud, tratándose de desprendimientos superficiales que normalmente no tienen más de 1-1.5 m de profundidad y un ancho que puede oscilar entre 1 y 17 m.

En cuanto a los depósitos, éstos suelen aparecer con un aspecto incoherente. La presencia de vegetación en ellos depende de la existencia o no de la misma anteriormente a la inestabilización, por lo que pudieran conservarla tras en movimiento, ya que se trata normalmente de un tipo de vegetación herbácea. No obstante, los depósitos aparecen, generalmente, carentes de vegetación. Por otro lado, la cabecera se observa normalmente conservada y sin vegetación.

Este tipo de inestabilidades, característico de los depósitos de ceniza volcánica como es la tierra blanca, ha sido ampliamente descrito y referenciado por numerosos autores (Bommer y Rodríguez, 2002; Bommer et al, 2002). En toda la literatura, y así se observa en el campo, se hace referencia a la capacidad de estos materiales para permanecer estables con inclinaciones subverticales, cercanas a los 90°. Esta propiedad es aprovechada para realizar taludes en carreteras o construcciones con este tipo de ángulos. Sitar y Clough (1983) dan una explicación sobre la estabilidad previa de estos taludes subverticales. Dichos autores atribuyen su estabilidad al rozamiento entre las partículas que componen este material ($\phi \approx 38^\circ$) y a una cantidad variable, aunque débil, de cementación. Otro factor que puede jugar un papel importante es la succión de la matriz (presión intersticial negativa) en este tipo de suelos parcialmente saturados. Ensayos realizados en muestras de tierra blanca (ceniza pumítica de tamaño limo arenoso) muestran succiones del orden de 400-500 kPa (Bommer et al, 1998).

Sin embargo, aunque estos taludes (naturales o antrópicos) pueden permanecer estables durante años, pueden volverse repentina y totalmente inestables bajo la acción de un sismo o de precipitaciones intensas. En este sentido, existen numerosas evidencias acerca de la significativa amplificación de las ondas sísmicas en los depósitos de suelos volcánicos respecto al substrato rocoso. Sitar y Clough (1983) identificaron esta amplificación en la tierra blanca como un factor importante. Un posible mecanismo de rotura de estos taludes bajo la acción sísmica podría ser la tensión inducida por el reflejo de las ondas sísmicas en la cara libre del talud. Las ondas superficiales, especialmente las ondas Rayleigh podrían participar también en la generación de tensiones en las capas superficiales (Bommer y Rodríguez, 2002). Igual de importante es el mecanismo de infiltración de agua durante las precipitaciones y que está relacionado con la succión inicial y la permeabilidad de los suelos saturados. La

saturación de estos materiales da lugar a la pérdida de resistencia de los mismos, desencadenando su inestabilidad.

Este tipo de movimientos afectaría principalmente a las vías de comunicación, así como a los usuarios de las mismas. No obstante, cuando los depósitos de los materiales movilizados entorpecen el uso de las vías de comunicación, éstos son retirados, a veces, por los mismos habitantes de las comunidades. Este hecho hace que no se le dé una mayor importancia a dicho proceso como fenómeno recurrente. Sin embargo, en los taludes de mayor altura, una movilización de materiales supone una amenaza real para aquellos que transitan por los caminos, especialmente en los casos en los que se encuentra algún árbol justo en la cresta del talud que, además de contribuir a la inestabilidad, también pudiera ser movilizado con el desprendimiento.

Desprendimientos en los conos de escorias

Los conos de escorias, tales como el Cerro Redondo, La Tabla y Mulunga, se caracterizan por estar formados por clastos de tamaño mili a centimétrico sin ninguna cohesión y cuya resistencia viene dada por un alto ángulo de rozamiento. Dichos materiales soportan ángulos de inclinación muy altos con un comportamiento estable, debido a su alta resistencia por rozamiento. Sin embargo, en los frentes de explotación de esta formación existente en el municipio (Cerro Redondo), se observan caídas individualizadas de algunos de estos clastos, que son depositados al pie del talud (Fotografía 8.15). Se sabe, además, por los antecedentes recopilados de otros frentes de explotación, que para alturas del talud importantes, dichos materiales pueden comportarse de forma inestable. Así, en taludes de unos 50 m, se han producido derrumbes masivos de este material ante acciones sísmicas, provocando la pérdida de vidas humanas. Debe señalarse que el ángulo de explotación de estos materiales es subvertical.



Fotografía 8.15.- Desprendimiento de partículas de escoria en el frente de explotación del Cerro Redondo.

En general, las inestabilidades observadas, evidenciadas por los clastos depositados al pie de los taludes de explotación, pueden considerarse recientes, dado que dicha

explotación está activa y los materiales depositados al pie de la misma son removilizados periódicamente.

Su grado de estabilidad podría considerarse activo, ya que se trata de un proceso dinámico, según el cual, las caídas se producen de manera relativamente frecuente. En cuanto al grado de desarrollo, éste sería incipiente.

Los depósitos, como ya se ha descrito, son de pequeño volumen y están formados por clastos de tamaño mili a centimétrico, apareciendo agrupados en la base del talud, al pie de lo que parecen ser zonas preferenciales de aporte de material.

El principal factor desencadenante de estos movimientos parece ser los terremotos, así como la acción antrópica, debido a un mal diseño de la explotación de estos materiales. Dada la alta permeabilidad de esta formación, la saturación de la misma no es posible y, por lo tanto, carece de influencia sobre la estabilidad de los materiales, influyendo las precipitaciones sólo en la medida en la que producen un impacto sobre las partículas pudiendo dar lugar a su desprendimiento.

Por otro lado, los únicos elementos expuestos que pudieran ser afectados por las inestabilidades producidas en esta formación, serían las personas que trabajan en la explotación de estos materiales. Por este motivo, debería tenerse la certeza de que el ángulo y la altura de la explotación son los adecuados.

8.2.1.3. Rodamientos

Se trata de movimientos en los cuales se produce el desplazamiento de bloques de roca mediante rodamiento. Este tipo de inestabilidades se generan en la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas, aflorantes en el Cerro de Nejapa, y en la formación de basaltos-andesitas presente en la mitad norte del municipio. Dichos movimientos han sido observados e identificados por la población principalmente en la mitad norte del Cerro de Nejapa, en la ladera orientada al oeste de la Loma Las Mesas y en la loma situada en Barba Rubia.

Estas inestabilidades se producen como consecuencia del rodamiento de bloques de basalto-andesita a lo largo de laderas con una cierta pendiente (Fotografía 8.16). Dichos bloques, con unas dimensiones entre 0.5-1.5 m, son parte del perfil de alteración de estas formaciones y aparecen englobados por una matriz arcillo-limosa. Sin embargo, debido al alto grado de deforestación o al uso del terreno para cultivos temporales, se produce una fuerte escorrentía durante las tormentas, generando una intensa erosión que implica una gran

pérdida de suelo. Esto conlleva que los bloques de basalto-andesita vayan siendo descalzados gradualmente, de manera que, una vez desmantelada la matriz que los sujetaba y ante un desencadenante externo como un terremoto, puedan rodar si están situados en una zona con cierta pendiente (>25-30°).

El movimiento de algunos de estos bloques se considera reciente, por lo que respecta a aquellos que fueron movilizados durante los terremotos del 2001, considerando como históricos o fósiles al resto de desplazamiento sufridos por los bloques. Sin embargo, es difícil distinguir la edad del movimiento y, en ocasiones, aquellos bloques que han rodado de los que se encuentran in situ, contando, no obstante, con los datos proporcionados por los habitantes de la zona.

En las zonas con mayor pendiente, el grado de estabilidad de estos bloques podría considerarse como latente, estimándose estable en el caso de los bloques situados en zonas de menor pendiente. Actualmente, el grado de desarrollo de estos movimientos se encuentra detenido, aunque bien podría tomarse como incipiente, dado que si no se toman medidas al respecto, la movilización de estos bloques puede continuar e incluso intensificarse, si avanza la pérdida de suelo y el consiguiente descalce de los bloques.

El principal factor desencadenante de este tipo de movimientos de ladera son los sismos, estando fuertemente condicionados por las precipitaciones que son las que generan la escorrentía que descalza los bloques.

Las viviendas que se encuentra al pie de estos cerros son elementos expuestos ante



Fotografía 8.16.- Zona con evidencias de rodamientos de bloques en Barbarrubia.

esta amenaza, así como las personas que habitan en ellas, sus propiedades y las tierras de cultivo. Diversos testimonios hablan de lo cerca que quedaron algunos bloques de determinadas casas, después de haber sido movilizados en los últimos terremotos.

8.2.1.4. Flujos

Se trata de movimientos de ladera continuos caracterizados por su alto contenido en agua y en los que las superficies de rotura no son claras. El material desplazado no mantiene la forma original, adoptando normalmente morfología lobulada y dando como resultado la deposición de conos de deyección. La velocidad de ocurrencia de un flujo es muy alta y puede afectar grandes extensiones.



Fotografía 8.17.- Evidencias del flujo sucedido en el Cerro de Nejapa.

En el área de estudio se ha localizado un flujo, identificado como tal, debido a los testimonios de la gente. Dicho flujo se produjo hace 20 años en la ladera suroeste del Cerro de Nejapa, movilizandolodo y rocas a favor de una quebrada (Fotografía 8.17). Afectó, por tanto, a la parte superior del perfil de alteración de la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas que se encuentra en el cerro, y que está formada por bloques de basalto-andesita englobados por una matriz arcillo-limosa que constituye el suelo vegetal. El lugar en el que se produjo no es de las zonas con más pendiente del cerro, presentando un ángulo de unos 18°.

Este movimiento puede considerarse como histórico, apareciendo estable en estos momentos y con un grado de desarrollo detenido. En su momento llegó a afectar una extensión de unos 500 m, llegando hasta el camino que rodea el cerro. Actualmente sigue notándose una diferencia en la vegetación que cubre el área afectada por el movimiento, apareciendo menos vegetada. La zona de cabecera sigue conservándose, aunque algo erosionada, apareciendo modificados los depósitos ladera abajo, debido a la erosión hídrica del torrente y a la acción antrópica, que ha incidido en la morfología mediante el cultivo y la construcción de vivienda.

El factor desencadenante de este movimiento de ladera, según los testimonios y teniendo en cuenta el tipo de inestabilidad, fueron las precipitaciones.

En el momento en que se desencadenó este flujo, sólo se vieron afectados los cultivos de esta zona del cerro. Sin embargo, hoy en día, la masa desplazada llegaría hasta las viviendas, afectando a las personas y a sus propiedades.

8.2.2. 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 y en la determinación de su grado de influencia en cada uno de los materiales considerados. 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, orientación, procesos activos y vegetación, realizando 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 orientación 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. Por último, el mapa de vegetación se ha obtenido a partir de las observaciones de campo y de la información aportada por algunos vecinos de las comunidades en los talleres realizados.

La integración de estos mapas ha dado lugar al Mapa de Susceptibilidad a las Inestabilidades de Ladera del Municipio de Nejapa. Los criterios de integración seguidos para la generación de este mapa se explican en el apartado correspondiente.

8.2.2.1. Mapas temáticos

Mapa litológico

El Mapa Litológico realizado (Mapa 2, Anexo 1) se ha basado en trabajos de campo, así como en el estudio de la foto aérea, partiendo del Mapa Geológico 1:100.000 realizado por la misión alemana. Las diferentes formaciones identificadas aparecen descritas y situadas en el Apartado 6.2. Como ya se mencionaba en dicho Apartado, los materiales identificados se han agrupado en función de sus características litológicas y estructurales, y de su probable comportamiento geomecánico que condicionará su respuesta ante los movimientos de ladera.

Así, los materiales considerados son los siguientes: basaltos-andesitas con piroclastos y tobas, basaltos-andesitas, basaltos-andesitas con piroclastos, escorias, tobas, tierra blanca y cuaternario.

Debe señalarse que a dicho mapa se le ha denominado litológico y no geológico, queriendo designar que las formaciones identificadas se refieren a formaciones superficiales.

Se desconoce cómo es la geología en profundidad al no haber dispuesto ni del tiempo, ni de los medios necesarios para su estudio, existiendo únicamente datos de la zona centro del municipio, proporcionados por las columnas de sondeos de captación de aguas (Apartado 9.1). Este aspecto debe tenerse en cuenta, dada la variabilidad de los materiales de origen volcánico.

Mapa de pendientes

Este mapa se ha elaborado a partir de la base cartográfica existente en la UCA (Mapa 5, Anexo 1). En él se podrían distinguir básicamente tres áreas en el municipio, en función de su pendiente. Aquellas con mayor relieve, como son las laderas media y alta del volcán de San Salvador y de los cerros de Nejapa, Las Mesas, Ojo de Agua, La tabla, Mulunga, Redondo y Picudo, así como algunas crestas situadas en El Bonete. Existen, además, unas zonas con relieve suave como son la ladera baja del volcán y el cantón de El Bonete. El resto del área de estudio, que incluye la vega del río San Antonio, se caracteriza por pendientes bajas.

La influencia de las pendientes en la estabilidad de las laderas dependerá del material considerado, así como del tipo de movimiento al que pueda dar lugar, tal como se comentará en el siguiente apartado.

Mapa de orientaciones

Este mapa se ha obtenido a partir de la base topográfica digitalizada por la UCA (Mapa 6, Anexo 1). En él pueden observarse los distintos rangos de orientaciones generados por el programa de SIG empleado. Dichos rangos se agruparán en función de su influencia frente a la estabilidad de laderas, desarrollándose dicho aspecto en el siguiente apartado.

Mapa de procesos activos de origen hídrico

En este mapa (Mapa 7, Anexo 1), elaborado a partir del trabajo de campo y la observación de la fotografía aérea, se han identificado los procesos de erosión hídrica. Dichos procesos se refieren al lavado superficial producido principalmente en zonas desprotegidas, así como al encajamiento de los cursos torrenciales y a la incisión lineal generada por el río en zonas de pendiente más suave. En los dos primeros casos se trata de procesos con un régimen estacionario ya que ocurren únicamente en la estación lluviosa. En el último caso, se trataría de un proceso de carácter permanente, aunque intensificado en la época de lluvias debido al mayor poder erosivo que presenta el río cuando aumenta su caudal, especialmente durante los episodios tormentosos.

El lavado superficial se desarrolla principalmente en las laderas del Cerro de Nejapa, caracterizadas por un alto índice de deforestación. Por otro lado, la dinámica torrencial es especialmente importante en las laderas del volcán de San Salvador donde se encuentran las mayores quebradas, siendo los ríos San Antonio y Acelhuate los que generan una dinámica fluvial.

Mapa de usos del suelo

El Mapa de Usos del Suelo (Mapa 1, Anexo 1) se ha elaborado a partir de observaciones de campo y de la información suministrada por la población en los talleres realizados. Este mapa no pretende ser exacto en los límites que delimitan cada zona por lo que se recomienda tener en cuenta este aspecto. En él se definen los siguientes tipos de vegetación: matorral, granos básicos, cañal, teca y, bosques y café. Dicho mapa, así como la ubicación de los distintos tipos de vegetación, se describen con más detalle en el Apartado 5.2.

8.2.2.2. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera

Cuando se estudió la forma de realizar el mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera se plantearon diversas metodologías como la de los “círculos de susceptibilidad” o las planteadas en otros trabajos como los de Vargas y Gómez (1999), Ramírez y González (1989) o Mora (1992). En el caso de la primera, se consideró que no había en el municipio, un registro suficiente de movimientos de ladera como para hacer un análisis estadístico de los mismos, que permitiera dar un peso representativo a la influencia de cada uno de los factores condicionantes. Por otro lado, en la aplicación de todas estas metodologías se observaba que no hacían diferencias entre las distintas formaciones. Esto implicaba que los rangos de valores de los distintos factores condicionantes eran aplicados a todas las litologías por igual, sin tener en cuenta su distinto comportamiento ante movimientos de ladera de diferentes tipologías. Es decir, consideraban, por ejemplo, un mismo umbral de pendiente para el desencadenamiento de un movimiento de ladera, sin tener en cuenta si está afectando a un suelo o a una roca, lo cual variaría considerablemente el ángulo de estabilidad, influyendo en gran medida en los resultados obtenidos y alejándose de la realidad.

Por estas razones, se optó por evaluar la influencia de cada factor condicionante sobre cada una de las formaciones consideradas. Esto supuso un laborioso trabajo de observación y discusiones, que si bien puede parecer menos sistemático, se considera más próximo a la realidad, puesto que evita generalizaciones, al considerar cada formación por separado, y tiene en cuenta lo observado en campo, así como la experiencia de los técnicos y cuanta información se ha podido recopilar acerca de los materiales.

Este método cuenta con la limitación de que en función de las observaciones de campo se puede estimar la susceptibilidad de aquellas combinaciones de factores condicionantes presentes en el municipio o en zonas próximas a él. Sin embargo, es complicado inferir la susceptibilidad de aquellas situaciones no observadas, pero que forman parte de los escenarios posibles. Este vacío se ha llenado en base a la experiencia y a la información recopilada acerca de las características y comportamiento de las distintas litologías. No obstante, hay que tener en cuenta que la información acerca de las características geotécnicas de los materiales estudiados es muy escasa en la literatura de referencia, por lo que hay que contar con una cierta incertidumbre en la valoración de ciertas situaciones. Aún así, se ha intentado quedar siempre del lado de la seguridad en las interpretaciones, teniendo presente que, puesto que dichas situaciones no se han observado en el municipio, tampoco aparece representada en la cartografía final la interpretación de su susceptibilidad, aunque sí se encuentre valorada en las matrices elaboradas.

Factores condicionantes

Litología

Para la determinación del grado de susceptibilidad con respecto a la litología se han asociado las características geomecánicas, permeabilidad y grado de alteración, dada la ausencia de un estudio detallado de las mismas, 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 (Tabla 8.10).

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.

Tabla 8.10.- Resumen de las características de las distintas formaciones consideradas bajo el epígrafe de litología.

Litología	Características
Basaltos-andesitas con piroclastos y tobas	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas duras (lavas), alternadas con materiales de menor competencia (piroclastos y tobas) - Fracturación alta (cruce de dos o más fracturas) - Muy alterada - Permeabilidad baja
Basaltos-andesitas	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas duras - Fracturación alta (cruce de dos o más fracturas) - Muy alterada - Permeabilidad secundaria alta
Basaltos-andesitas con piroclastos	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas duras (lavas) alternadas con materiales de menor competencia (piroclastos) - Fracturación alta (cruce de dos o más fracturas) - Muy baja alteración - Alternancia de materiales de distinta competencia - Permeabilidad primaria nula, permeabilidad secundaria muy alta
Tobas	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas blanda - Ausencia de fracturación o alguna fractura individualizada, generada por la acción de las raíces - Baja alteración (más alta en el lecho del río) - Permeabilidad media-baja o baja
Escorias	<ul style="list-style-type: none"> - Suelo - Cohesión nula y alto ángulo de rozamiento - Ausencia de fracturación - Permeabilidad muy alta
Tierra blanca	<ul style="list-style-type: none"> - Suelo - Cohesión muy baja o nula, ángulo de rozamiento (38°) - Ausencia de fracturación o alguna fractura individualizada, generada por la acción de las raíces - Permeabilidad media a baja
Cuaternario	<ul style="list-style-type: none"> - Suelo - Ausencia de fracturación - Permeabilidad alta a media

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 las características descritas, se han agrupado las diferentes litologías, en función del comportamiento esperado frente a los distintos movimientos de ladera que pudieran darse en cada una de ellas (Tabla 8.11.). De esta manera, la formación de basaltos-andesitas y la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas se han considerado dentro de la misma categoría respecto a su comportamiento frente a las inestabilidades. El hecho de que la segunda esté formada por una alternancia de materiales, no condiciona realmente un comportamiento diferente, dado que esta formación aflora básicamente como basaltos-andesitas en superficie. Por otro lado, la diferente permeabilidad entre ambas tampoco es patente en superficie, que es donde se producirían las inestabilidades, ya que ambas están muy alteradas, presentando un perfil de alteración similar.

Tabla 8.11.- Rangos o agrupaciones litológicas consideradas en función de su comportamiento frente a los movimientos de ladera.

Litología
Basaltos-andesitas y basaltos-andesitas con piroclastos y tobas
Basaltos-andesitas con piroclastos
Tobas
Escorias
Tierra blanca
Cuaternario

Pendientes

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 cada material existe un esfuerzo admisible relacionado con cada valor de la inclinación del terreno, denominado “ángulo de reposo”.

Se han estimado unos rangos de pendientes distintos para cada litología considerada (Tabla 8.12.). Estos rangos tratan de diferenciar las pendientes a partir de las cuales un terreno es susceptible de movilizarse, o aquellas por debajo de las cuales el terreno se considera estable, existiendo unos rangos intermedios, en los que la estabilidad de una ladera depende del resto de factores condicionantes.

Tabla 8.12.- Rangos de pendientes para cada formación considerada.

Litología	Rangos de pendientes	Valoración
Basaltos-andesitas con piroclastos y tobas	>40	> susceptibilidad
	25°-40°	
	15°-25°	< susceptibilidad
Basaltos-andesitas	>40	> susceptibilidad
	25°-40°	
	15°-25°	< susceptibilidad
Basaltos-andesitas con piroclastos	> 50°	> susceptibilidad
	35°-50°	
	15°-35°	< susceptibilidad
Tobas	>50°	> susceptibilidad
	25°-50°	
	<25°	< susceptibilidad
Escorias	>60°	> susceptibilidad
	35°-60°	
	20°-35°	< susceptibilidad
Tierra blanca	>35°	> susceptibilidad
	15°-35°	
	<15°	< susceptibilidad
Cuaternario	>30°	> susceptibilidad
	15°-30°	
	<15°	< susceptibilidad

Orientaciones

Se han considerado cuatro orientaciones de las laderas, norte, sur, este y oeste. Este factor va a ser relevante en la estabilidad de taludes, dado que en el caso de la entrada por el norte de frentes y temporales, las laderas con esta orientación serán las que reciban una mayor cantidad de agua de lluvia

La orientación de las laderas determina el grado de insolación de éstas así como la erosión eólica, en función de la dirección de los vientos. Cuanto mayor sea la insolación, mayor será la evaporación del agua, cuya presencia tiene un efecto negativo en cuanto a la estabilidad de un terreno. Por otra parte tiene un efecto positivo indirecto, ya que el aumento de la humedad da lugar a una vegetación más intensa, y ésta proporciona una mayor estabilidad, amortiguando el efecto de la gota de lluvia y absorbiendo parte del agua caída disminuyendo así la escorrentía superficial. Además aporta una mayor cohesión al terreno con sus raíces. Como la vegetación ha sido considerada como un factor aparte, se considera únicamente el efecto negativo de la insolación.

Los vientos predominantes característicos del clima tropical mesoamericano son vientos del norte, fríos y secos que por su efecto erosivo y por el cambio de temperatura que ocasionan en el terreno tienen una gran incidencia sobre éste. Los vientos del E y el NE, provenientes del Caribe, húmedos y cálidos afectan igualmente en las laderas con esta orientación, con un efecto erosivo y de humectación-deseccación. Por otro lado, en el caso de la entrada por el norte de frentes y temporales, las laderas con esta orientación serán las que reciban una mayor cantidad de agua de lluvia. Considerando los efectos de los vientos, la insolación y las lluvias, se determinan los rangos que aparecen en la Tabla 8.13.

Tabla 8.13.- Rangos de orientación.

Rangos	Valoración
Laderas orientadas al norte Laderas orientadas al este Laderas orientadas al oeste Laderas orientadas al sur	> Susceptibilidad < Susceptibilidad

Procesos activos de origen hídrico

Este tipo de procesos se presenta mediante distintos mecanismos como pueden ser el impacto de las gotas de lluvia, la escorrentía y la dinámica torrencial o fluvial (Tabla 8.14.).

Tabla 8.14.- Valoración de los procesos hídricos activos.

Proceso hídrico activo	Valoración
Dinámica torrencial	> Susceptibilidad
Dinámica fluvial	
Escorrentía superficial	
Sin procesos significativos	< Susceptibilidad

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. Este proceso se manifiesta especialmente en aquellas zonas de ladera media-baja en las que la morfología del terreno no facilita la existencia de cauces bien definidos (formas de relieve convexas como los conos de deyección), y donde el uso del suelo predominante es la agricultura intensiva, como sucede en el caso del Cerro de Nejapa. 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.

Las dinámicas torrencial y fluvial implicarán principalmente procesos de erosión en los cauces que afectarán a la base de las laderas, pudiendo desencadenar o contribuir a su desestabilización. Este efecto será más intenso en el caso de la dinámica torrencial al tratarse de un proceso más 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.

Vegetación

El papel de la vegetación como factor condicionante está relacionado con efectos como la sujeción que ejercen las raíces anclándose en capas más profundas 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.

Los tipos de vegetación existentes en el área de estudio (Mapa 1, Anexo 1) se han agrupado en función de sus efectos respecto a la estabilidad de laderas (Tabla 15.).

Tabla 8.15.- Rangos de usos del suelo en función de su comportamiento respecto a la estabilidad de laderas.

Vegetación	Influencia	Valoración
Bosque, café y teca (vegetación o cultivos permanentes)	Al tratarse de vegetación o cultivos permanentes, son prácticas que favorecen la protección a la erosión de los suelos.	<p>< Susceptibilidad</p>  <p>> Susceptibilidad</p>
Caña de azúcar y maíz (cultivos temporales)	Los cultivos temporales que se practican en el área dejan desprotegidos los suelos, generando procesos de escorrentía que favorecen el desarrollo de surcos que pueden evolucionar hacia la formación de quebradas y conllevando una importante pérdida de suelo, acentuada en laderas con pendientes relativamente altas.	
Zonas deforestadas	Estas áreas se encuentran desprotegidas y desprovistas de sujeción, por lo que los procesos de escorrentía son aún más intensos, acentuándose el problema de erosión y desarrollo de surcos en mayor medida que en la categoría anterior.	

Realización del mapa

Como ya se ha comentado, la litología ha sido el factor que ha determinado la elaboración del Mapa de Susceptibilidad, valorando el resto de los factores condicionantes con relación a éste y teniendo en cuenta el tipo de inestabilidad que podría generarse en la litología considerada.

Desde este punto de partida, se comentan a continuación los criterios de integración empleados en la elaboración del Mapa de Susceptibilidad para cada una de las categorías

litológicas establecidas en el apartado anterior. Las matrices de integración pueden observarse en el Anexo 3.

Basalto-andesitas con piroclastos

Como se ha descrito en el Apartado 8.2.1., estos materiales dan lugar a desprendimientos, ya sea de bloques de basaltos-andesitas individualizados por fracturas y descalzados por la erosión de los piroclastos infrayacentes, como de los cantos y bloques que forman los piroclastos cuando la matriz que los engloba es desmantelada. Debe considerarse, además, que sobre esta formación se desarrollan deslizamientos que afectan al suelo vegetal, movilizándolo a favor del contacto entre éste y el sustrato rocoso.

Valorar la influencia de los factores condicionantes para dos tipos de movimientos de ladera, que además afectan a dos formaciones diferentes, aunque sólo una de ellas ha sido cartografiada, es complicado. Por esta razón, se ha tratado de integrar los valores de los condicionantes que afectan a ambas, eligiendo el lado de la seguridad cuando había que optar entre valores distintos.

Sobre los rangos de pendientes elegidos, éstos han estado condicionados por las pendientes de las laderas en las que se encuentran estos materiales. Así, se ha considerado el umbral de 15°, como el ángulo de estabilidad de los suelos vegetales. Por otro lado, la pendiente de las laderas de las quebradas oscila entre los 35° y los 50°, presentando inestabilidades, por lo que este rango se considera como de susceptibilidad moderada. A partir de 50°, la susceptibilidad sería, entonces, alta. Queda un intervalo intermedio, entre 15° y 35°, en el que los movimientos podrían darse, aunque, en menor medida, considerándose la susceptibilidad como baja.

En cuanto a los procesos activos de origen hídrico, sólo los procesos de dinámica torrencial se desarrollarían en estos materiales, aflorantes en las quebradas. Dichos procesos son determinantes en el desarrollo de las inestabilidades, ya que producen la socavación de la base de las laderas, contribuyendo al desencadenamiento tanto de los deslizamientos como de los desprendimientos por el descalce de los bloques.

La influencia de la orientación se ha considerado menor en estas inestabilidades, al no observarse una clara influencia de la misma en campo. Por otro lado, el encajamiento de las quebradas en la ladera alta y media del volcán, que es donde se producen mayoritariamente estos movimientos, da lugar a zonas de umbría generalizadas independientemente de la orientación de las laderas. Esto da lugar a que no haya grandes diferencias en lo que al grado de insolación se refiere. Lo mismo sucede con la influencia de los vientos, que en un área encajada y cubierta de vegetación, es menor.

Por último, la influencia de la vegetación en la estabilidad de estas laderas es determinante, especialmente en el caso de los deslizamientos, proporcionando una sujeción y evitando la erosión del suelo.

Basalto-andesitas y basalto-andesitas con piroclastos y tobas

Los principales movimientos que se dan en estas formaciones son debidos al rodamiento de bloques de basalto-andesita descalzados por la acción erosiva de la escorrentía. Existen evidencias, además, de deslizamientos fósiles y de un flujo en el Cerro de Nejapa, que afectan al suelo vegetal producto de la alteración de estos materiales. Combinar en una serie de rangos, los factores condicionantes para movimientos de ladera tan dispares no es fácil, por lo que se ha intentado tener a todos en cuenta y quedar del lado de la seguridad.

Los rangos de pendientes considerados se han basado en los ángulos de estabilidad de las laderas y en referencias bibliográficas. De esta manera, se ha observado que existen movimientos para las pendientes más altas del Cerro Las Mesas, entorno a los 25°. Por otro lado, los ángulos más altos encontrados en el Cerro de Nejapa llegan hasta los 40°. Estos datos nos permiten estimar un valor de la pendiente igual a 40°, por encima del cual la susceptibilidad será alta, y un intervalo entre los 25° y los 40°, en el que la susceptibilidad será moderada. Se observa, además, que las pendientes más bajas son superiores a 15°, por lo que se ha tomado este valor como un umbral por debajo del cual la susceptibilidad es muy baja o nula, considerando el intervalo comprendido entre 15° y 25° como de susceptibilidad baja.

Se considera que la influencia de la escorrentía en estos materiales es determinante de la estabilidad de los mismos, dado que contribuye a la erosión y pérdida de suelo, generando el descalce de los bloques de basalto-andesita. Dichos bloques quedan, entonces, expuestos a sufrir un desplazamiento por rodamiento ante un desencadenante externo, como pueden ser los sismos. Por otro lado, la dinámica torrencial puede contribuir también a la desestabilización de la capa de suelo, dando lugar a la generación de deslizamientos o flujos.

En el caso de estos últimos, deberán tenerse en cuenta los efectos tanto de la insolación como de la intensidad de las precipitaciones debidos a la orientación de las laderas.

Por otro lado, la influencia de la vegetación es determinante en el caso de los rodamientos de bloques, ya que la presencia de una cobertura vegetal permanente evitaría en gran medida los efectos de la escorrentía y, por lo tanto, la pérdida de suelo que origina el descalce de los mismos. Igualmente, la existencia de una capa vegetal permanente favorecería la estabilidad de los suelos que pueden dar lugar a deslizamientos o flujos.

Tobas

Las tobas aparecen como una formación bastante estable, incluso para taludes subverticales y en el caso de afloramientos expuestos a la socavación del río San Antonio. Se trata de una formación que se ve favorecida por la ausencia de fracturación. Sólo se aprecian en algunos taludes, pequeños desprendimientos debidos a la individualización de bloques por la acción de las raíces de los árboles, pero que, en principio, carecen de importancia.

En este caso, quedando del lado de la seguridad, los rangos de pendientes estimados para valorar la estabilidad de estos materiales, se han basado en intervalos usados de forma habitual en trabajos de referencia. Dichos intervalos corresponden a los valores de pendientes menores de 25°, entre 25°-50° y mayores de 50°, correspondiendo a susceptibilidades muy bajas o nulas, bajas y moderadas, respectivamente.

En esta formación, los procesos activos de origen hídrico que se producen, corresponden a dinámicas fluviales, principalmente. Dicha dinámica ejerce un cierto efecto en los materiales a lo largo del tiempo, a pesar de la competencia de éstos. Sus efectos se dejan ver en la alteración que presentan las tobas que se encuentran en el lecho y márgenes del río San Antonio. Dicho proceso de alteración, les va haciendo perder sus propiedades resistentes a lo largo del tiempo, lo que sumado a la socavación que ejerce el agua en la base de los taludes en los que se encaja el río, puede hacerles perder su resistencia en un momento dado. Esta formación puede verse afectada, también, por procesos de dinámica torrencial, aunque menos importantes que los que se desarrollan en el área del volcán. Dichos procesos, a pesar de ser más energéticos que los fluviales, representan una menor influencia en estos materiales, debido a que éstos parecen responder más a los fenómenos persistentes en el tiempo que a aquellos caracterizados por una mayor energía.

Por otro lado, estos materiales están caracterizados, en general, por presentar una permeabilidad baja, lo que les hace menos vulnerables a la influencia de la orientación de las laderas, relacionada con la insolación y la ocurrencia de precipitaciones.

Debido a la competencia de esta formación, la influencia de la vegetación como factor estabilizador no es determinante. Sólo puede considerarse la acción de las raíces como generadoras de discontinuidades a favor de las cuales se pueden desprender pequeños bloques, aunque este proceso no se ha estimado significativo, por lo que no se ha incluido en las matrices de integración.

Escorias

En esta formación se generan los desprendimientos de los clastos que la conforman. En ella, los rangos de pendientes establecidos tienen que ver con las pendientes de

estabilidad de sus laderas. Dichas pendientes oscilan entre 20° y 35°, observándose estables, en general, por lo que su susceptibilidad se considera baja. Por debajo de 20°, las pendientes se consideran estables y por lo tanto con una susceptibilidad muy baja o nula, estimando como de moderada susceptibilidad, aquellas pendientes por encima de los 35°. No obstante, y dada la existencia de frentes de explotación con pendientes de 60°, al pie de los cuales se observan los pequeños depósitos de los desprendimientos, se ha considerado este valor como un umbral que marca un grado de susceptibilidad alta.

En ninguno de los conos formados por estos materiales existen procesos de origen hídrico. Debe considerarse que debido a la alta permeabilidad de los mismos, tales procesos no son posibles, dado que el agua se filtraría rápidamente.

Por la misma razón, y dado que la influencia de la orientación está relacionada principalmente con el contenido en agua del suelo, en este caso no tendría una influencia significativa.

Igualmente, en este tipo de inestabilidades de ladera y, en concreto, en los materiales considerados, la vegetación no ejerce una influencia que deba ser considerada.

Tierra blanca

Los fenómenos de inestabilidad observados en el municipio en este tipo de materiales, corresponden básicamente a desprendimientos que afectan a los taludes de las vías de comunicación.

Como se comentó en el Apartado 8.2.1., el comportamiento de estos materiales varía considerablemente según su contenido en agua, por lo que se ha estimado su susceptibilidad en condiciones saturadas, considerada como la situación más desfavorable.

Los rangos de pendientes estimados se han basado en los ángulos de estabilidad de las laderas naturales de estos materiales. Los ángulos de dichas laderas oscilan entre 15° y 35°, que en el caso del volcán de San Salvador corresponderían al promedio de la pendiente en las laderas media y alta, respectivamente. Teniendo en cuenta que el ángulo de rozamiento de la tierra blanca está entorno a los 38°, podemos suponer que 35° es un umbral de estabilidad razonable para estos materiales. Por esta razón, las pendientes por encima de los 35° se considerarán como de alta susceptibilidad, tomando aquellas pendientes por debajo de los 15°, como de susceptibilidad baja. El intervalo comprendido entre los 15° y los 35°, se toma como de susceptibilidad moderada. Existen trabajos que hablan de movilizaciones de este material con ángulos menores a 10°, sería razonable pensar que se trata de inestabilidades que afectan a áreas previamente movilizadas, por lo que estaría funcionando el ángulo de rozamiento residual. Como en el área de trabajo no se han encontrado

movimientos de ladera cartografiados que afecten a la tierra blanca, no se ha tenido en cuenta este último valor como umbral de estabilidad.

La tierra blanca es fácilmente erosionable por lo que en los lugares en los que existen dinámicas torrenciales, fluviales o de escorrentía es rápidamente desmantelada. Debido a su baja resistencia, la socavación que pueden ejercer los cursos de agua en su base, le hacen altamente susceptible a inestabilizarse.

Por otro lado, debido a la gran influencia que el contenido en agua tiene en su comportamiento, fenómenos como la insolación o la mayor incidencia de las precipitaciones, relacionados con la orientación de las laderas dejarán notar sus efectos.

La vegetación tendrá, además, una gran importancia en el comportamiento de unos materiales fácilmente erosionables, aportándoles sujeción. No obstante, dicha vegetación no se revela importante en el caso de los taludes subverticales que abundan, tanto en el municipio como fuera de él, pudiendo contribuir, incluso, a su desestabilización si se trata de vegetación arbórea pesada situada inmediatamente sobre el talud. No obstante, dada la poca representatividad de esta influencia negativa, no se ha tenido en cuenta en el Mapa de Susceptibilidad, señalando en el Anexo 2 aquellos puntos problemáticos detectados en el municipio.

Cuaternario

En estos materiales podrían generarse deslizamientos, sin embargo, el cuaternario cartografiado se encuentra estabilizado actualmente.

Los rangos de pendientes se han estimado en base a las observaciones de campo y a indicaciones de las normativas estudiadas. Según esto, se ha observado que el ángulo de estabilidad de estos materiales en campo se encuentra entorno a los 15°, por lo que las pendientes inferiores a este valor se consideran estables y con una susceptibilidad baja. Se ha tomado el valor de 30° referenciado en las normativas como un umbral a partir del cual, la susceptibilidad podría considerarse como alta. El rango comprendido entre 15° y 30° se estimaría con una susceptibilidad moderada.

La influencia de los procesos activos de origen hídrico es importante en esta formación, que se ve afectada principalmente por el fenómeno de la escorrentía. Por esta razón, es importante el papel de la vegetación como agente estabilizador, especialmente la de carácter permanente, ya que tanto las áreas deforestadas como aquellas con cultivos temporales no evitarán los efectos de la escorrentía.

En esta formación, deberá tenerse en cuenta la influencia de la orientación que se hará notar tanto por los efectos de la insolación, como por una mayor incidencia de las precipitaciones en determinadas orientaciones, incidiendo en el contenido en agua y, por lo tanto, en la estabilidad de dichos materiales.

Resultados de la susceptibilidad

A partir de la integración mediante SIG de los mapas temáticos que representan cada uno de los factores condicionantes se obtiene un Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera del Municipio de Nejapa E. 1:25.000 (Mapa 8, Anexo 1).

En dicho mapa se puede observar que las zonas de susceptibilidad alta corresponden principalmente a la ladera media y alta del Cerro de Nejapa y a las áreas con mayor pendiente del volcán de San Salvador, concretamente a las partes altas de las quebradas La Ronda y La Quebradona, y de El Picacho.

Como zonas de susceptibilidad media se definirían la ladera baja del Cerro de Nejapa, el resto de las quebradas del volcán y las zonas con mayor pendiente del Cerro Redondo y Las Mesas.

Las zonas con menor pendiente de la ladera alta y media del volcán, así como las laderas de los cerros Ojo de Agua, La Tabla, Mulunga, y el resto de Las Mesas y de El Redondo, y las zonas con mayor pendiente del cantón del Bonete, se consideran como áreas de susceptibilidad baja.

El resto del municipio se caracterizaría por una susceptibilidad muy baja o nula.

Por otro lado, en dicho mapa puede observarse que los movimientos de ladera inventariados coinciden en su mayor parte con las áreas señaladas como más susceptibles. Así, en el caso de los deslizamientos, se observa que éstos se encuentran principalmente en las quebradas del volcán y el Cerro de Nejapa. Los otros deslizamientos inventariados se encuentran en zonas de baja o muy baja susceptibilidad, que en realidad corresponden a un talud de carretera y a lo que parecen ser los depósitos de un paleodeslizamiento ya estabilizado en la ladera del volcán.

Cabe comentar en este espacio, que los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes de caminos y carreteras no son representables a la escala del trabajo, por lo que taludes con una alta susceptibilidad a los movimientos pueden aparecer en zonas definidas como de baja o muy baja susceptibilidad. En general, ante la falta de una cartografía de detalle que identifique estos aspectos y dado el gran número de taludes subverticales existentes en tierra blanca, puede decirse que la estabilidad de los mismos en condiciones

saturadas es precaria, debiendo tener en cuenta este aspecto, ya que no aparece reflejado en la cartografía. Esta es la razón de que aparezcan señalados diversos desprendimientos en áreas calificadas como de baja o muy baja susceptibilidad, dado que éstos se ubican en taludes o bien en los márgenes del río San Antonio, en el que son desencadenados por la socavación fluvial, afectando principalmente a la formación de tierra blanca. Se observan, además, desprendimientos en las quebradas del volcán que afectan a las colada de basaltos y piroclastos, coincidiendo con zonas calificadas como de mayor susceptibilidad.

Los rodamientos, en cambio, aparecen ubicados en zonas de baja o muy susceptibilidad, pero justo al pie del Cerro de Nejapa, identificado como de media y alta susceptibilidad, que es donde se producen realmente los rodamientos, aunque los depósitos de éstos aparezcan lógicamente en la base del cerro que es donde se estabilizan.

Por último, puede observarse que el único flujo cartografiado se encuentra en una zona de alta susceptibilidad del Cerro de Nejapa.

Algunas consideraciones

A la vista de los resultados obtenidos, puede observarse que las zonas de mayor susceptibilidad corresponden a la ladera media y alta del Cerro de Nejapa y a las zonas con mayor pendiente del volcán de San Salvador. Sobre el mapa obtenido, se observa que las zonas con mayor susceptibilidad abarcan un área más extensa en el cerro, sin embargo, las dimensiones de un posible movimiento de ladera en el volcán pueden ser mayores, dada la mayor cantidad de material potencialmente movilizable a lo largo de sus laderas.

En este sentido y según Rubio (2001), las inestabilidades de ladera que han ocurrido de manera recurrente en el volcán implican movimientos de pocos metros cúbicos a, en raros casos, centenares de metros cúbicos. Son desplazamientos de pequeña envergadura pero de efectos recurrentes. Sin embargo, en el volcán de San Salvador existen depósitos de movimientos de ladera históricos que han involucrado volúmenes de hasta unos cientos de miles de metros cúbicos. Estas inestabilidades han estado desencadenadas por eventos hidrometeorológicos, así como por eventos sísmicos, transformándose algunas de ellas en flujos de escombros (lahares) que han inundado las áreas bajas al pie del volcán, remontándose las más recientes a los años 1934 y 1982.

El primero de estos flujos, desencadenado después de un periodo de lluvias que se prolongó por siete días, arrastró toda la capa vegetal y el suelo, dejando al descubierto las lavas infrayacentes y ocupando una superficie cinco veces mayor que la del episodio de 1982. Este segundo evento se produjo tras un temporal de cuatro días en el que se registraron las mayores intensidades del siglo, generando una zona de deslizamiento entre 10 y 15 Ha, pudiéndose extender el área afectada hasta las 60 ha. El flujo de lodo, vegetación y agua se

estimó en su parte baja en 200.000 m³. En el primer caso, el flujo se condujo por la Quebradona, afluente de la quebrada el Níspero hasta el área que ahora ocupa el reparto de Montebello. En el segundo caso, los materiales descendieron a través de la quebrada el Níspero hasta el reparto de Montebello. Ambos movimientos se produjeron en la misma área, coincidiendo con la zona de mayor pendiente del edificio volcánico, que corresponde al Picacho y se sitúa fuera del municipio de Nejapa. No obstante, son antecedentes que deben tenerse en cuenta para evaluar el tipo de movimiento, los materiales involucrados y la magnitud de un posible evento de mayor envergadura en el área de estudio.

En este sentido, se estimó conveniente estudiar el alcance que podrían tener dichos fenómenos en el área de estudio. Para ello, se consideraron las dos quebradas de mayor tamaño que recorren la ladera del volcán dentro del término municipal, determinando la zona de inundación de los posibles flujos que pudieran generarse mediante la modelización de su comportamiento con el programa denominado LaharZ, descrito someramente en el siguiente apartado. La aplicación de esta metodología en Nejapa y, por lo tanto, el siguiente apartado, están basados en el trabajo de Blanco et al (2002) y han sido realizados con la ayuda del Ing. Burgos de la UCA.

8.2.2.3. Mapa de áreas de inundación por lahares

En primer lugar, conviene definir qué se entiende por lahar. Un lahar es un flujo de una masa de suelo y escombros saturada de agua que desciende de un volcán por la acción de la gravedad (Pierson y Scott, 1998, en Blanco et al, 2002). Por lo general, los lahares viajan aguas abajo dentro de los canales de drenaje del volcán y poseen un amplio rango de velocidades (32-65 km/h), dependiendo del ancho e inclinación del canal, el volumen del flujo y la composición granulométrica. Éstos pueden viajar grandes distancias desde su fuente en función del volumen de escombros arrastrados. El volumen de un lahar dependerá de la cantidad de agua, así como del sedimento flojo o escombros volcánicos disponibles. Dichos movimientos pueden ser desencadenados por lluvias torrenciales, eventos sísmicos y erupciones volcánicas, estando condicionados por el grado de estabilidad previo que tengan las laderas del volcán y que será función de parámetros geológicos, geotécnicos y topográficos.

Actualmente se emplea el método elaborado por Iverson et al (1998, en Blanco et al, 2002) para calcular la zona de inundación de los lahares. Dicho método se basa en los siguientes principios:

- Las inundaciones de lahares pasados proveen las bases para predecir las inundaciones de futuros lahares

- La amenaza por lahar en la zona ubicada aguas abajo desde el límite que define la zona de amenaza proximal, está confinada en los canales de drenaje del volcán
- El volumen del lahar controla principalmente la extensión de la inundación.
- El lahar se mueve aguas abajo como una ola de masa y densidad constantes. Esto implica una conservación de volumen, es decir, el volumen de lahar que se originó en la zona de amenaza proximal es el mismo que entra en la zona de amenaza distal, no existiendo ningún tipo de pérdidas ni aumentos de volumen.
- Lahares con volúmenes grandes son menos frecuentes que los lahares con volúmenes pequeños
- No se puede predecir el tamaño del próximo lahar que descenderá por un drenaje del volcán

La determinación de las zonas de amenaza de inundación por lahar se realiza mediante la implementación de programas como LaharZ, que corre dentro de un GIS y está elaborado en el lenguaje de ArcInfo. LaharZ calcula el área de la sección transversal del valle inundado y el área planimétrica inundada de diferentes volúmenes de lahar especificados por el usuario. Para ello, el programa utiliza las ecuaciones elaboradas por Iverson et al (1998, en Blanco et al, 2002), que modelizan el comportamiento de los lahares, calibradas a partir de registros históricos propios de la región centroamericana.

Los parámetros de entrada que LaharZ utiliza para generar las zonas de amenaza son:

- Modelo de elevación digital
- Límites de la zona de amenaza proximal
- Volúmenes de lahares
- Punto de inicio de la inundación

Sobre la selección de los parámetros para la elaboración del mapa de amenazas, se han seguido los siguientes criterios. El modelo de elevación digital del terreno se ha generado a partir de la topografía 1:50.000, dado que sólo a escala se disponía de una cartografía digital completa de las curvas de nivel de las quebradas consideradas, ya que en algún tramo, éstas corrían fuera del municipio. Para determinar el punto de inicio de la inundación, se han tomado los sitios con mayores pendientes, al tratarse de lugares propensos a sufrir inestabilidades. Los límites de la zona de amenaza proximal y los volúmenes considerados son los mismos que en el trabajo de Blanco et al (2002). Estos valores fueron estimados partir los antecedentes históricos y la evaluación de la probabilidad de ocurrencia, teniendo en cuenta el criterio y la experiencia de los Ing. Pullinger y Escobar del SNET.

En este sentido, el Mapa de Inundaciones por Lahar fue elaborado para los siguientes volúmenes: 500.000, 350.000, 200.000 y 100.000 m³. Se puede establecer que cuanto más grande sea el volumen, su probabilidad de ocurrencia será menor, llegándose a establecer

que un lahar de 300.000 m³ tiene una probabilidad de 1 entre 10 de ocurrir en un año (Major et al, 2001, en Blanco et al, 2002).

En el Mapa 9 (Anexo 1) se muestran las zonas de inundación por lahares para los volúmenes mencionados. El lahar que se desplazaría por la quebrada El Aguacatón, se dirigiría hacia el casco urbano del municipio. Si éste es producido por el menor volumen considerado llegaría a una distancia de unos 2 km del pueblo y si fuera producido por el de mayor volumen afectaría a la carretera Apopa-Quezaltepeque, quedando en los umbrales del casco urbano. Se observa, además, que para un volumen de más de 350.000 m³, el área de inundación se expandiría a partir de la zona de El Chorizo. Por otro lado, el lahar que se movería a lo largo de La Quebradona, llegaría, considerando el máximo volumen, hasta los umbrales del área parcelada correspondiente al matadero de San Salvador. Si se movilizara el menor volumen, la zona inundada llegaría a unos 2 km de este último punto, ladera arriba.

Es importante tener cuenta el carácter orientativo de este mapa, dado que se trata de un modelo probabilístico y aproximado. Así lo establecen en su trabajo Blanco et al (2002) al definir las zonas de amenaza generadas como conservadoras dado que los resultados obtenidos al calibrar las ecuaciones de Iverson et al (1998, en Blanco et al, 2002) dan lugar a zonas de amenaza mayores a las realmente ocurridas en Montebello y Tepetitán (áreas de validación del modelo). Esto se debe a que el programa no considera la disipación de la energía a lo largo de todo el trayecto del lahar, que conllevaría una pérdida del material arrastrado a lo largo de su recorrido.

Algunas consideraciones

Observando los resultados, cabe tener en cuenta algunas de las siguientes consideraciones realizadas por Rubio (2001) y recogidas en su trabajo sobre deslizamientos de tierra en el volcán de San Salvador.

En un principio, ha existido y existe riesgo por inestabilidades de ladera en los abruptos márgenes de las quebradas, pero normalmente estos lugares no deben estar habitados, por lo que la incidencia de estos fenómenos es baja. Sin embargo, dichos movimientos de ladera pueden afectar a una población creciente de escasos recursos y elevada vulnerabilidad, sobretodo social y económica, que ubican sus viviendas en los márgenes de las quebradas ante la imposibilidad de acceder a otros lugares más seguros debido a su falta de recursos. En ellas buscan refugio, habitando en áreas que deberían ser decretadas zonas de protección o de actividad restringida. Tal es el caso de la vivienda ubicada junto al puente de reciente construcción de San Jerónimo (Apartado 8.1.1).

Por otro lado, debe tenerse en cuenta la influencia que la presión urbana ejerce sobre el terreno. En este sentido, son cada vez más frecuentes las noticias referentes a las

recurrentes inundaciones y movimientos de ladera en estas zonas. Esto se debe a un aumento de dichos episodios, pero sobretodo a un incremento de la población afectada. El número creciente de eventos peligrosos para la población ha sido alimentado por un incremento de la escorrentía debido al aumento de la superficie impermeabilizada por un expansivo tejido urbano. El crecimiento de las poblaciones hacia cotas superiores en las laderas ha sido notorio, aumentando la superficie techada y asfaltada, y abriendo calles con fuertes pendientes. Por otro lado, el cambio en los usos de suelo que conlleva la presión urbanística puede implicar un aumento de la deforestación o un cambio en la vegetación hacia cultivos temporales que influyen negativamente en la estabilidad de las laderas. De esta manera, aumenta la probabilidad de ocurrencia de inestabilidades y la incidencia de éstas sobre la población.

En este sentido, debe destacar la importancia de evitar la presión sobre estas zonas de alto riesgo que deberían constituir, en la mayoría de los casos, zonas verdes no habitadas. En la actualidad, es necesario reducir el crecimiento existente hacia cotas superiores por la ladera del volcán. En esta tendencia se encuentra el Anillo Periférico que desarrollará un crecimiento habitacional, de servicios e incluso de industria, a lo largo de su trazado, por lo que se recomienda tener en cuenta la posibilidad de que ocurran estos flujos de escombros capaces de movilizar grandes cantidades de material.

Por otro lado, la tendencia climática actual, a pesar del calentamiento y la sequía a la que nos encaminamos, parece favorecer la formación de episodios meteorológicos de elevadas intensidades, que favorecen a su vez la generación de deslizamientos y flujos de gran caudal que evolucionan a gran velocidad. Por ello, es necesario sobredimensionar las obras de paso sobre las quebradas que drenan las laderas.

Debe tenerse en cuenta, además, que muchas calles aprovechan las quebradas para realizar su trazado favoreciendo la canalización de las aguas de forma rápida y preferente, disminuyendo la capacidad de infiltración. Este hecho, sumado a la cantidad de agua llovida sobre superficie artificialmente impermeabilizada (techos y calles asfaltadas principalmente), produce un caudal excedente en las quebradas donde desembocan los colectores de agua lluvia, es decir, un caudal mayor que el normal para las intensidades de lluvia precipitadas. Este caudal mayor que las intensidades reales ocasiona rápidas crecidas que pueden desencadenar inundaciones e inestabilidades de ladera. Estas crecidas también son favorecidas, en parte, por el mal manejo de las quebradas que se han convertido en auténticos vertederos de basura (quebrada Cangrejera y zanjón el Guayabo a la altura de El Salitre) y, en parte, por algunas obras de infraestructura que han quedado obsoletas debido a los nuevos caudales de escorrentía que se concentran en las quebradas y a la parte sólida que estos caudales arrastran. En algunos casos se suman a estas causas, las obras de infraestructura realizadas que han modificado la sección de las quebradas.

En este sentido, la superposición del Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera (Mapa 8, Anexo 1) o el Mapa de Zonas de Inundación por Lahares (Mapa 9, Anexo 1) con otros mapas de factores socioeconómicos, permitiría visualizar las características, capacidades y debilidades del territorio y tomar en cuenta la respuesta que el medio puede dar a determinadas actividades de la población.

8.2.3. Análisis de la peligrosidad por inestabilidades

La peligrosidad puede expresarse en función de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural destructivo o perjudicial y de su energía (magnitud de la amenaza). Se incluye la ciclicidad, es decir, el cálculo de retorno del fenómeno. Se puede establecer que la peligrosidad es el producto de la probabilidad de ocurrencia por la amenaza.

P = Peligrosidad

p = probabilidad

A = amenaza

$$P = p \times A$$

En el apartado anterior se ha caracterizado la influencia de los factores condicionantes en la ocurrencia de inestabilidades, como características propias del terreno. En éste se analiza la influencia de los factores desencadenantes, como agentes externos al terreno.

Los factores que desencadenan la ocurrencia de inestabilidades de ladera en el municipio de Nejapa son principalmente los sismos y las precipitaciones. En los siguientes apartados se analiza la influencia de ambos como desencadenantes de dichas inestabilidades.

Por otro lado, debido a la dificultad que supone realizar un tratamiento estadístico de los datos con los que se cuenta (insuficientes en cuanto a la cantidad de años registrados) y de establecer una relación entre ambos eventos, no se ha obtenido un dato sobre el periodo de retorno y, por tanto, no se ha determinado la peligrosidad de manera rigurosa. Sí se ha realizado un análisis de la misma, con la susceptibilidad del terreno como base. Para ello, se ha evaluado la influencia de los factores desencadenantes mediante el método de Mora y Varhson (1993) en lo que podría considerarse un análisis de peligrosidad dentro de una hipótesis de amenaza máxima dentro del registro conocido.

8.2.3.1. Sismicidad

La sismicidad es una de las principales causas de las inestabilidades, debido tanto a la ocurrencia de terremotos importantes como a la existencia de pequeños sismos que afectan de manera continua al área de estudio.

Durante los terremotos, la aceleración vertical y horizontal de las ondas sísmicas modifica el estado natural de esfuerzos del terreno y, por lo tanto, puede alterar el equilibrio de laderas y taludes. Igualmente, los movimientos sísmicos pueden generar o reactivar fracturas por las que se infiltra el agua y en las que el aumento de la presión producida por la presencia de la misma puede provocar inestabilidades.

Parámetros sísmicos como el tamaño del terremoto (expresado por el momento sísmico, la intensidad o la magnitud), su duración, profundidad focal, o amplitud y composición frecuencial influirán sobre el volumen de material movilizado, así como sobre la extensión del área afectada.

En este sentido, existen numerosos testimonios que relacionan la ocurrencia de desprendimientos, deslizamientos y rodamientos en el municipio con los terremotos del año 2001, probando la influencia que éstos tienen sobre la estabilidad de laderas y taludes.

Con respecto a los pequeños sismos cabe pensar que el continuo movimiento afecta a la estabilidad de los taludes al generar cambios tensionales en los mismos, una removilización de las partículas de los materiales y una reactivación de las fallas existentes, lo que en su conjunto provoca una disminución de la cohesión del terreno y de su resistencia.

Se podría concluir, que la continua actividad sísmica afecta de manera notoria a la estabilidad de los taludes, generando inestabilidades o condiciones muy favorables para la evolución de éstas, donde la influencia de otros factores, condicionantes y desencadenantes, aumentará su grado de afectación.

8.2.3.2. Comportamiento hídrico

En el análisis del comportamiento hídrico como factor desencadenante de los movimientos de ladera no sólo deben tenerse en cuenta las precipitaciones y su intensidad sino también el grado de saturación de los materiales, determinado por la lluvia acumulada. Se hace un estudio más detallado de las características de las precipitaciones en el Apartado 8.1.2., como factor desencadenante de las inundaciones.

El agua actúa sobre el terreno aumentando las presiones internas al introducirse en poros, diaclasas, planos de discontinuidad o fracturas del terreno, disminuyendo las fuerzas

resistentes al movimiento y aumentando las desestabilizadoras. En el momento en que las fuerzas desestabilizadoras superan la resistencia al corte del terreno se producen las inestabilidades. Este proceso se genera en mayor medida en los años posteriores a la ocurrencia de terremotos, debido a los cuales, aumenta la susceptibilidad del terreno por la pérdida de cohesión y generación de nuevas fracturas que favorecen la infiltración, disminuyendo en conjunto la estabilidad de las laderas.

La intensidad de la lluvia, como se ha indicado anteriormente, es un factor a tener en cuenta. El modo en que ocurren las precipitaciones va a determinar si el agua tiene tiempo suficiente para infiltrarse en el terreno, en caso de bajas intensidades, o si tenderá a formar parte de la escorrentía superficial, en forma de arroyada en manto o concentrada en cauces. Se podría pensar que son menos perjudiciales las altas intensidades, ya que al infiltrarse menos agua serán menores las presiones internas. Sin embargo, la escorrentía superficial actúa intensamente en la erosión de laderas, quedando éstas desprotegidas de cobertera y siendo más susceptibles a ser afectadas por procesos gravitatorios. Por otra parte, el aumento de escorrentía superficial conlleva un aumento de caudales y, en consecuencia, una mayor erosión de los cauces. Esto genera una reducción de la base de las laderas ubicadas sobre estos cauces, haciéndolas más susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades.

La lluvia acumulada determinará igualmente el comportamiento del terreno frente a las inestabilidades. En condiciones de terreno saturado no quedará espacio para la infiltración, produciéndose principalmente escorrentía superficial. En este caso, tendríamos un escenario doblemente perjudicial, ya que se sumaría a las presiones internas, la erosión superficial.

En resumen, las condiciones más favorables para la ocurrencia de procesos gravitatorios serían: precipitaciones intensas al final del invierno (en terrenos saturados), especialmente si ha habido o hay actividad sísmica.

8.2.3.3. Grado de peligrosidad

Como se ha expuesto al principio de este apartado, evaluar la peligrosidad resulta complicado debido a la falta de un registro histórico completo, que permita determinar periodos de retorno y, por lo tanto, peligrosidad.

No obstante, se dan algunas ideas sobre posibles metodologías para evaluar la peligrosidad en el caso de que los datos necesarios estuvieran disponibles. Así, para evaluar la peligrosidad de movimientos de ladera desencadenados por terremotos podría aplicarse la metodología propuesta por Mulas et al (2003). Según los autores, podría integrarse el Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera con Mapas de Isointensidades para diferentes

periodos de retorno, empleando unos determinados criterios. Estos criterios consisten aplicar los valores umbral dados por Keefer (1984) para distintos parámetros sísmicos (entre ellos la Intensidad), a partir de los cuales se desencadenan inestabilidades. Dichos valores varían en función del tipo de movimiento de ladera del que se trate. Así pues, se analizaría para cada material y en función del tipo de movimiento de ladera al que pudiera dar lugar, si el valor de intensidad considerado podría desencadenar una inestabilidad, teniendo, además, en cuenta la susceptibilidad previa del terreno. Este procedimiento se seguiría con cada uno de los mapas correspondientes a diferentes periodos de retorno. De manera, que al final se obtendría un mapa de peligrosidad para cada periodo de retorno. La aplicación de este método supondría disponer de Mapas de Isointensidades para distintos periodos de retorno a una escala apropiada para poder obtener una zonificación del área de estudio. Para la obtención de dichos mapas se precisaría, además, de un registro más amplio de datos y de un análisis diferenciado entre terremotos originados en distintas fuentes.

Para evaluar la peligrosidad de movimientos de ladera desencadenados por precipitaciones, podría obtenerse un Mapa de Máximas Precipitaciones Diarias para distintos periodos de retorno, basándose en el análisis de precipitaciones realizado en el Apartado 8.1.2, e integrar dicho mapa con el Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos del Terreno. Sin embargo, debería tenerse en cuenta, igualmente, la cantidad de lluvia acumulada como indicador del estado de saturación del terreno. El tiempo de acumulación que debería considerarse entonces, dependerá del tipo de material analizado y, por lo tanto, de su permeabilidad. Con ambos datos, máximas precipitaciones diarias y lluvia acumulada, y teniendo en cuenta los valores umbral de precipitaciones capaces de desencadenar distintos tipos de inestabilidades (Vallejo et al, 2001; Blanco et al, 2002), debería integrarse esta información con la aportada en el Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera. Sin embargo, la representación cartográfica de la lluvia acumulada es complicada, más aún, si se desea evaluar para distintos periodos de retorno.

Debido a las dificultades expuestas, se optó por emplear el método de Mora y Varhson (1993), aceptable en regiones tropicales con alta actividad sísmica y cuya aplicabilidad ya ha sido comprobada en territorio salvadoreño. Este método tiene en cuenta los factores condicionantes por un lado (susceptibilidad) y los factores desencadenantes por otro, aunque no podría llegar a hablarse de peligrosidad puesto que no tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, es decir, no se estudia para diferentes periodos de retorno. No obstante, los valores de los desencadenantes considerados, sismos y precipitaciones, corresponden a eventos máximos registrados históricamente, por lo que podría considerarse un análisis de peligrosidad dentro de una hipótesis de amenaza máxima dentro del registro conocido.

La aplicación de este método ha sido llevada a cabo con la ayuda del Ing. Escalante (UCA) y se ha basado en un trabajo previo de la Universidad Centroamericana en el municipio

de Nejapa (UCA, 2001). La aplicación del método que se desarrolla a continuación supone una actualización de dicho trabajo a partir de los datos obtenidos en el presente proyecto y que suponen una mejora en la cartografía geológica y en el estudio de las precipitaciones, respecto al trabajo anterior.

Método de Mora y Varhson (1993)

Este modelo tiene en cuenta dos tipos de factores. En primer lugar, los factores condicionantes que corresponden a características intrínsecas del terreno y definen su susceptibilidad a sufrir inestabilidades. En esta categoría, el método considera la pendiente, la litología y la humedad del terreno. En segundo lugar, se consideran los factores desencadenantes, caracterizados por tratarse de factores externos que pueden activar el movimiento de ladera. Dentro de éstos, el modelo considera la sismicidad y la intensidad de lluvias.

Descripción del método de Mora y Varhson (Brizuela et al, 2002)

La metodología propuesta por Mora y Varhson se aplica mediante la combinación de varios parámetros y factores considerando que las inestabilidades ocurren cuando una determinada ladera, compuesta por un tipo de suelo en particular, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, adquiere un grado de susceptibilidad y puede ser activada por factores externos y dinámicos como son la sismicidad y las lluvias intensas.

Se define, entonces, que el grado de amenaza es el producto de la susceptibilidad y de la activación, así:

$$H_i = (Susc \times Trig) \quad \text{Ec.1}$$

donde:

HI = grado de amenaza de deslizamientos.

Susc = valor del factor de susceptibilidad.

Trig = valor del factor de disparo o activación.

El factor de susceptibilidad se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Susc = S_L \times S_h \times S_r \quad \text{Ec.2}$$

donde:

S_L = valor del parámetro de susceptibilidad litológica (Tabla 8.16).
 S_h = valor del parámetro de humedad del suelo (Tablas 8.17. y 8.18).
 S_r = valor del parámetro del relieve (Tabla 19.).

*Tabla 8.16.- Calificativo del factor litológico.
(Centro de Investigaciones Geotécnicas de El Salvador, en Brizuela et al, 2002)*

Litologías	Calificativo	Parámetro
s5'a, s5'b, va, s2	Bajo	1
ch2, m1'b.l, b3,c2,c3	Moderado	2
Ch1, s1,m1'a,b2,b1,m2'b, c1,s5c, s3'b	Medio	3
s4, s3'a, ts	Alto	4
Q'f, ts'm	Muy alto	5

Tabla 8.17.- Valores asignados a los promedios mensuales de lluvias (Mora, S. C. y Varhson, W. G., 1993; en Brizuela et al, 2002).

Precipitación mensual (mm)	Valor asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 8.18.- Factor de humedad S_h , resulta de la clasificación de la suma en un año de los valores asignados a cada mes (Mora, S. C. y Varhson, W. G., 1993; en Brizuela et al, 2002).

Suma de los valores asignados	Calificativo	Parámetro
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Tabla 8.19.- Calificativo del índice adaptado de relieve relativo (pendiente expresada en porcentaje del terreno) (Brizuela et al, 2002)

Índice adaptado del relieve relativo (Pendiente)	Calificativo	Parámetro
0-7.5	Muy bajo	0
7.6-17.5	Bajo	1
17.6-30	Moderado	2
30.1-50	Medio	3
50.1-80	Alto	4
>80	Muy alto	5

El factor de disparo se obtiene de la siguiente manera:

$$Trig = T_s \times T_p \quad \text{Ec.3}$$

donde:

T_s = valor del parámetro de disparo sísmológico (Tabla 8.20.).

T_p = valor del parámetro de disparo por lluvia (Tabla 8.21.).

Tabla 8.20.- Factor de sismicidad T_s (Mora, S. C. y Varhson, W. G., 1993; en Brizuela et al, 2002).

Intensidad Mercalli Modificada	Calificativo	Parámetro
III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Elevado	6
IX	Fuerte	7
X	Bastante fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Estrem. fuerte	10

Tabla 8.21.- Factor de intensidad de lluvia T_p (Mora, S. C. y Varhson, W. G., 1993; en Brizuela et al, 2002)

Lluvia máximas diarias	Calificativo	Parámetro
<100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Mediano	3
300-400	Alto	4
>400	Muy alto	5

Sustituyendo en la Ecuación 1, se obtiene:

$$HI = (S_l \times S_h \times S_r) \times (T_s + T_p) \quad \text{Ec.4}$$

Los valores de referencia y sus calificativos del grado de amenaza se muestran en la Tabla 8.22.

Tabla 8.22.- Clasificación de la amenaza por deslizamiento (Mora, S. C. y Varhson, W. G., 1993; en Brizuela et al, 2002)

Potencial	Clase	Calificativo
0-6	I	Muy bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Medio
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Información utilizada en el modelaje (Brizuela et al, 2002)

Pendiente del Terreno.- Utilizando los mapas temáticos a escala 1:25.000 de curvas de nivel, puntos de cota conocida y quebradas de la base de datos geográfica de Nejapa, se generó un TIN (Triangulated Irregular Network) para tener una representación del relieve. Posteriormente se procedió a generar de éste un GRID, denominado SLOPE (Mapa 5, Anexo 1), de la pendiente en porcentaje, utilizando algoritmos propios de los SIG.

Litología.- El Mapa Litológico empleado es el resultado de los trabajos de campo, así como del estudio de la fotografía aérea, realizados durante el presente proyecto. Dicha cartografía se ha realizado a una escala 1:25.000, y ha sido digitalizada y posteriormente

introducida en la base de datos geográfica de Nejapa por el Laboratorio de SIG de la UCA (Mapa 2, Anexo 1).

Humedad del Suelo e Intensidad de Lluvias.- A partir de los datos de precipitaciones proporcionados por el SNET y del análisis que se realiza de los mismos en el Apartado 8.1.2, se obtienen los datos promedio mensuales de lluvias y las precipitaciones máximas diarias para las dos estaciones más cercanas a la zona de estudio con el registro más completo (estaciones de Apopa INSINCA y El Boquerón).

Sismicidad.- El factor de activación sísmico se determina a partir de la intensidad de Mercalli Modificada, requiriéndose los valores máximos detectados en la zona de estudio. El Centro de Investigaciones Geotécnicas posee mapas de Iso-Intensidad (Isosistas) para cada uno de los terremotos destructores registrados, además de mapas de las envolventes de intensidades. Para la aplicación de este modelo se han empleado las envolventes de Isosistas del terremoto de 1986 que aparecen en el Apartado 8.3.3, dado que los registros de daños en el municipio de Nejapa por los terremotos del 2001 no superaron los niveles de daños alcanzados en terremotos pasados.

Aplicación del modelo cartográfico (Brizuela et al, 2002)

La base de datos geográfica existente del municipio de Nejapa fue generada bajo los criterios del modelo vectorial, es decir, como resultado de los procesos de introducción de información a los SIG se obtuvieron mapas de puntos, líneas, polígonos y TIN, que deberán ser transformados a GRID.

Para la creación del modelo se utilizó el SIG ArcView, módulo Spatial Analyst y los datos cartográficos (pendientes, geología, etc.) en estructura del tipo GRID. Esta estructura de datos representa a una zona geográfica como un conjunto de celdas cuadradas de igual tamaño en las cuáles se almacena un único valor. Los cálculos requeridos consisten en reasignar valores a los mapas según un criterio establecido y realizar operaciones matemáticas de suma y multiplicación, tareas realizadas en los SIG por medio de las herramientas de reclasificar y álgebra de mapas.

El modelo se desarrolla comenzando con el cálculo de los factores de susceptibilidad, relacionados con el relieve, la litología y la humedad del suelo. Posteriormente, se determinan los factores de activación, dados por la sismicidad y las precipitaciones.

Factores de susceptibilidad

1. *Litología (S).*- la clasificación del terreno se hizo a partir de los valores del factor litológico indicados en la Tabla 8.16. Los resultados pueden verse en la Tabla 8.23.

Tabla 8.23.- Reclasificación del factor litológico.

Litologías Mapa Litológico	Litologías Léxico Estratigráfico (Baxter, 1984)	Calificativo	Parámetro
Basaltos-andesitas con piroclastos	s5'a	Bajo	1
Basaltos-andesitas	c3	Moderado	2
Conos de escorias	c3	Moderado	2
Basaltos-andesitas con piroclastos y tobas	b1-b3 (*)	Medio	3
Tobas	c1	Medio	3
Tierra blanca	s4	Alto	4
Cuaternario	Q'f	Muy alto	5

(*) Al corresponder la litología identificada en el municipio a dos litologías de la formación Bálsamo, se ha tomado el valor más conservador del parámetro propuesto por Mora y Varhson (1993), correspondiente a la litología b1.

2. *Humedad del suelo (Sh)*.- el factor humedad del suelo fue calculado a partir de los datos de precipitación mensual media de las estaciones con el registro más completo cercanas a la zona de estudio. De esta manera, se calculó el valor según la tabla de reclasificación para cada mes (Tabla 8.17.) y luego se sumaron los valores asignados para los doce meses del año. Con este valor y con la siguiente tabla de reclasificación (Tabla 8.18.) se asignó el valor del parámetro humedad del suelo y el calificativo que sugiere el método para las dos estaciones consideradas. La suma de los valores obtenidos se clasificó en el mismo rango para ambas estaciones, por lo que se consideró el valor del parámetro humedad del suelo como 3.0 y el calificativo medio para toda el área de estudio (Tabla 24.).

Tabla 8.24.- Reclasificación del factor humedad del suelo.

Estaciones consideradas	Suma de los valores asignados	Calificativo	Parámetro
Apopa Insinca	10	Medio	3
El Boquerón	11	Medio	3

3. *Factor de Relieve (Sr)*.- el factor de relieve fue obtenido al reclasificar GRID del mapa de pendientes del terreno (expresado en grados decimales) de tal manera que se generó un nuevo mapa con los valores de pendiente expresados como porcentaje. Posteriormente, se asignaron los valores indicados en la tabla de reclasificación del mapa de pendientes (Tabla 8.19.).
4. *Factor de susceptibilidad (Susc)*.- el factor de susceptibilidad se obtiene al multiplicar los parámetros de susceptibilidad litológica, parámetro de humedad del suelo y parámetro del relieve. Es decir, resulta de la multiplicación de los mapas Sr, S₁ y el escalar 3, que representa a la humedad del suelo (factor Sh).

Factores de activación

1. *Sismicidad (Ts)*.- a partir de las máximas intensidades registradas en la zona de estudio se asignaron los factores de sismicidad según la tabla de reclasificación (Tabla 8.20.), como puede verse en la Tabla 8.25.

Tabla 8.25.- Reclasificación del factor sismicidad.

Zonas del municipio	IMM	Calificativo	Parámetro
Norte	VII	Medio	5
Centro y Sur	VIII - IX	Elevado - Fuerte	6 – 7

2. *Intensidad de lluvias (Tp)*.- se determinó el factor intensidad de lluvias a partir de las máximas precipitaciones diarias registradas en las estaciones de Apopa Insinca (1973-2002) y El Boquerón (1969-1992). Los datos obtenidos fueron valorados según lo sugiere la tabla de reclasificación (Tabla 8.21.), observándose los resultados en la Tabla 8.26.

Tabla 8.26.- Reclasificación del factor intensidad de lluvias.

Estación	Fecha	Máxima precipitación diaria (mm)	Calificativo	Parámetro
Apopa Insinca	Sept 1979	195.0	Bajo	2
El Boquerón	Sept, 1982	221.0	Mediano	3

3. *Factor de disparo (Trig)*.- la suma de los factores de activación se considera como el factor de disparo y se obtiene al sumar los mapas Ts y Tp.

Resultados: amenaza de deslizamiento por lluvia y sismo

El potencial de deslizamiento se obtiene de la multiplicación de los factores de susceptibilidad y de disparo. Una vez creado el mapa se asignan los calificativos y clases según se indica en la Tabla 8.22. Este mapa es el resultado del modelo cartográfico aplicado, y a partir de él se pueden determinar las zonas que se encuentran amenazadas de sufrir deslizamientos. En el Mapa 10 (Anexo 1) se puede observar que las zonas calificadas con amenaza alta (clase V) se restringen a las áreas de mayor pendiente del volcán de San Salvador, localizadas en El Picacho y en algunas quebradas, y del Cerro de Nejapa, ubicadas principalmente en algunas quebradas. Calificadas como de amenaza media (clase IV) se encuentran la ladera media y alta del volcán, la mayor parte del Cerro de Nejapa y los escarpes de la zona central y norte del municipio. En la categoría de amenaza moderada (clase III) se sitúa la ladera baja del Cerro de Nejapa, el fondo de las quebradas, zonas de menor pendiente y ladera baja del volcán, y las áreas de pendiente suave de la zona central y

norte del municipio. Las zonas clasificadas como de amenaza baja (clase II) apenas son representativas en el municipio, encontrándose el resto de las áreas por clasificar, correspondientes a las zonas más llanas, en la categoría de amenaza muy baja (clase I).

En general, se observa que la mayor parte del municipio se clasifica como de amenaza media, moderada y muy baja, correspondiendo las zonas de amenaza alta a las laderas del volcán de San Salvador, Cerro de Nejapa y escarpes existentes en el municipio.

Cabría señalar que este método tiene algunas limitaciones, comentadas incluso en Brizuela et al (2002), como son la no consideración de algunos factores externos e internos que se señalan a continuación:

- Factores externos como el aumento de carga sobre el terreno debido a construcciones, los esfuerzos transitorios como vientos o vibraciones debido a maquinaria, procesos activos...
- Factores internos como la presencia de vegetación, la meteorización, características geomecánicas de los materiales...

Sobre este último punto cabe indicar que existe un método de Mora y Varhson mejorado que tiene en cuenta las características geomecánicas de los materiales. Dicho método no ha podido ser aplicado en este caso al no disponer de los datos de entrada necesarios, aunque se recomienda usar este modelo mejorado en el caso de poder contar con la información necesaria.

8.2.3.4. Sistema de alerta temprana

En este capítulo dedicado a los factores desencadenantes y a la peligrosidad resulta pertinente resaltar la importancia de los trabajos dedicados al desarrollo de los sistemas de alerta temprana. Para ello, es necesario, no sólo trabajar en su metodología, sino seguir alimentándolos con datos que vayan haciéndolos más precisos. Igual de importante es divulgar estos sistemas y ponerlos en conocimiento tanto de las autoridades locales y comités de emergencia, como de la población en general.

En este sentido, resulta interesante señalar un trabajo de la UCA (2001) en el que se llegó a la conclusión de que el 90% de los lahares ocurridos en la región han sido producidos por lluvias intensas. Por esta razón, los autores crearon un mecanismo práctico de alerta temprana que utiliza los datos de las precipitaciones de los 7 días anteriores al evento y la precipitación del día del evento (Figura 8.7). En la página web del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), pueden encontrarse los datos de precipitaciones actualizados diariamente.

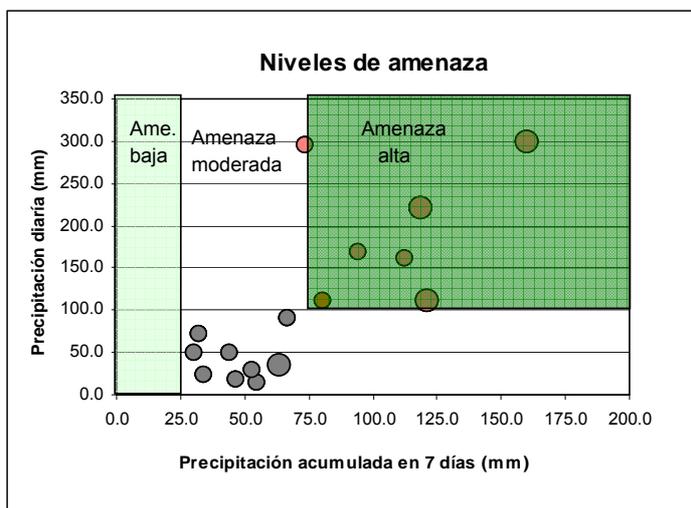


Figura 8.7.- Niveles de amenaza para movimientos de ladera desencadenados por lluvias (tomado de Blanco et al, 2002)

Tabla 8.27.- Valores umbrales mínimos de parámetros sísmicos para el desencadenamiento de movimientos de ladera (modificado de Mulas et al, 2001).

VALORES UMBRALES MÍNIMOS	
Aceleración crítica	$A_c \approx 0.05$ g, independiente del mecanismo de rotura (Wilson y Keefer, 1985)
Intensidad	<ul style="list-style-type: none"> - Movimientos de ladera caóticos y desprendimientos: Intensidad mínima predominante MMI VI; Intensidad más baja registrada MMI IV (Keefer, 1984) - Movimientos de ladera coherentes, expansiones laterales y flujos: Intensidad mínima predominante MMI VII; Intensidad más baja MMI V (Keefer, 1984)
Intensidad Arias	Wilson y Keefer (1985): <ul style="list-style-type: none"> - Movimientos de ladera coherentes: $I_a = 0.5$ m/s - Movimientos de ladera caóticos: $I_a = 0.15$ m/s - Expansiones laterales y flujos: $I_a = 0.5$ m/s
Magnitud	Según Keefer (1984): <ul style="list-style-type: none"> - Desprendimientos y deslizamientos de rocas, desprendimientos de suelo y deslizamientos de suelo caóticos: $M_L = 4.0$ (susceptibles a vibraciones de corta duración y alta frecuencia) - Slumps de suelo y deslizamientos de bloques de suelo: $M_L = 4.5$ (mayor duración y menor frecuencia) - Slumps de roca, deslizamientos de bloques de roca, flujos lentos de tierras, expansión lateral de suelos, flujos de suelo rápidos y deslizamientos subacuáticos: $M_L = 5.0$ (mayor duración y menor frecuencia) - Avalanchas de roca: $M_L = 6.0$ - Avalanchas de suelos: $M_L = 6.5$ Un 0.1% de los deslizamientos a lo largo del tiempo ha sido asociado con eventos de $M < 5.0$ y un 1% con eventos de $M < 6.0$, mientras que el 92% se atribuye a eventos de $M \geq 7.0$ (Keefer, 1994).

Por la misma razón, se considera interesante mostrar los valores umbral de distintos parámetros sísmicos a partir de los cuales pueden desencadenarse movimientos de ladera (Tabla 8.27.). Estos datos parten de la recopilación de múltiples registros históricos y pueden ser útiles para estimar el grado de estabilidad de las laderas una vez producido un terremoto, ya que si éstas no han sufrido inestabilidades, sí pueden encontrarse en una situación de equilibrio metaestable que debe ser previsto para evitar riesgos mayores. Por supuesto, el conocimiento del estado tensional de la ladera o talud, previo al movimiento sísmico, es fundamental para saber en qué estado se encuentra ésta. En este sentido, si las tensiones previas ya se encontraban cercanas al desequilibrio, una pequeña alteración externa podría desencadenar el mismo. Sin embargo, la estimación de dichas condiciones previas no es fácil por lo que, en cualquier caso, se recomienda ser conservador o estudiar detenidamente el caso en concreto.

8.3. Análisis de la sismicidad

Los sismos son el producto de la liberación de energía generada por el desplazamiento de la placa oceánica que subduce bajo la placa continental, en el caso de sismicidad asociada a límite de placas, o por el desplazamiento de fallas. Gran parte de esta energía sísmica se libera en forma de calor y una pequeña parte mediante la propagación de diversos tipos de ondas que hacen vibrar la corteza terrestre. La aceleración, vertical y horizontal asociada a esas ondas variará en función de la cantidad de energía liberada, así como del tipo de material que atraviesen.

Las vibraciones que se producen en superficie como consecuencia de la expansión de las ondas sísmicas, originan una fluctuación del estado de esfuerzos en el interior del terreno. Contribuyen así, a aumentar el esfuerzo cortante y pueden producir una perturbación en la estructura de los materiales disminuyendo su cohesión y la resistencia al corte, afectando al equilibrio de los taludes. En algunos materiales saturados sin drenaje, pueden dar lugar a una súbita licuefacción del suelo, como consecuencia de un incremento de la presión del agua intersticial. Igualmente, la generación de nuevas fracturas causada por estas vibraciones en cualquier terreno, permitirá una mayor infiltración de agua, con el consiguiente aumento de presión que contribuye a desestabilizar el material.

Los últimos terremotos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001 causaron daños a miles de viviendas tradicionales y desencadenaron cientos de movimientos de ladera, que fueron la causa principal de las pérdidas. Estos terremotos demostraron claramente que existe

una tendencia hacia el aumento del riesgo sísmico en El Salvador, por un aumento de la exposición debido a la rápida expansión de la población en áreas susceptibles de sufrir una mayor amplificación de las ondas sísmicas y movimientos de ladera, acrecentándose este riesgo con la deforestación y la urbanización incontrolada (Bommer et al, 2002).

Por esta razón, son necesarios los estudios que ayuden a determinar las zonas en las que puede producirse una mayor amplificación de las ondas sísmicas (respuesta sísmica del terreno) causando daños mayores, así como las áreas con una mayor susceptibilidad a sufrir movimientos de ladera que puedan ser desencadenados por estos eventos, de forma que los resultados de estos análisis puedan tenerse en cuenta en los planes de ordenación del territorio.

8.3.1. Metodología

Para el análisis de la sismicidad se han seguido las siguientes etapas (ITGE, 1994):

A) Marco tectónico y sísmico. El estudio de la sismicidad que puede afectar a un área requiere una visión global de los fenómenos regionales que están relacionados con la actividad sísmica. Dicha actividad depende de procesos que afectan a amplias zonas, configurando a éstas como especialmente propensas a que se produzcan sismos cuyo origen se relaciona con mecanismos tectónicos más o menos generalizados para toda la región.

B) Historia sísmica. Se enmarca la zona estudiada en el aspecto sísmico, a partir del registro de los terremotos más importantes sucedidos en su ámbito geográfico. Se aportan los datos existentes sobre localización de epicentros y características de los sismos registrados.

C) Macrozonación sísmica. Se analiza la peligrosidad sísmica del área de estudio, enmarcada en el ámbito geográfico definido en B).

D) Microzonación sísmica. La última fase del estudio consiste en la realización de un mapa de microzonación sísmica a escala 1:25.000, que permita identificar zonas homogéneas en cuanto a la respuesta sísmica del terreno.

8.3.2. Marco tectónico y sísmico regional

8.3.2.1. Marco tectónico

El Salvador se encuentra en la parte occidental de la placa Caribeña, que contiene varias regiones tectónicas (Figura 8.8.).

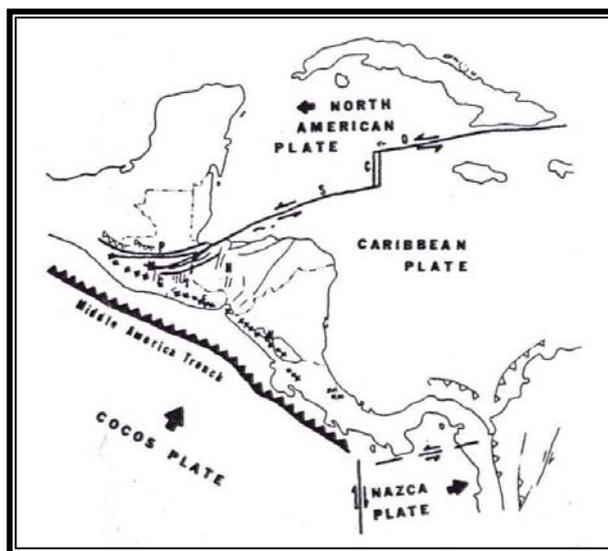


Figura 8.8.- Principales límites y estructuras de la zona oeste de la placa Caribeña (tomada de Alfaro, Kiremidjian y White, 1990).

Al suroeste del país, la placa de Cocos subduce bajo la placa caribeña con ángulos moderados, definiendo un plano de Benioff, que la mayor parte de los autores divide en tres zonas (somera, intermedia y profunda), en función de la distribución de la sismicidad y las magnitudes máximas observadas.

En la parte noroeste, se encuentran las fallas de Chixoy-Polochic, Motagua y Jocotán-Chamalecón, señalando el límite con la placa Norteamericana. Dichas fallas se caracterizan por un movimiento lateral izquierdo y sismicidad asociada con profundidades menores de 35 km.

Al noreste, la Depresión de Honduras, constituida por un conjunto de grábenes, bordea El Salvador, extendiéndose principalmente en la parte central del territorio hondureño.

Por último, una cadena volcánica recorre la costa del Pacífico, desde Guatemala hasta Costa Rica, de forma paralela a la zona de subducción. Esta región se caracteriza por la presencia de fallas de rumbo, tanto derecho como izquierdo.

8.3.2.2. Marco sísmico

El Salvador se ve afectado principalmente por dos fuentes de sismicidad. Los mayores terremotos están asociados a la subducción de la placa de Cocos que converge con la placa Caribeña en la Fosa Centroamericana a una velocidad estimada de 7 cm./año. El plano de Benioff-Wadati generado alcanza profundidades de unos 300 km bajo el océano y bajo El Salvador. El mayor terremoto producido en esta zona durante el siglo XX, ocurrió el 7 de septiembre de 1915, con una magnitud de Ms 7.8 y una profundidad focal entre los 45 y los 60 km. Este terremoto causó una amplia destrucción al oeste de El Salvador, afectando particularmente a la ciudad de Juayúa. Los grandes terremotos del 28 de marzo de 1921 y del 21 de mayo de 1932 causaron menos daños en la parte este y central de El Salvador, respectivamente. Este impacto relativamente menor fue probablemente el resultado de sus profundidades focales de 170 y 150 km, respectivamente. El terremoto del 19 de junio de 1982, producido mar adentro al oeste de El Salvador con una Mw 7.3, causó un gran daño en el suroeste del país, desencadenando muchos de movimientos de ladera. El último evento del 13 de enero de 2001 con Mw de 7.6 causó grandes pérdidas económicas y humanas, debido sobre todo a los fenómenos inducidos, tales como movimientos de ladera.

La segunda fuente de sismicidad que afecta a El Salvador es una zona situada en la corteza superior que coincide con la cadena de volcanes cuaternarios que se extiende a lo largo de Centroamérica. Debido a su foco superficial y a su coincidencia con los principales focos de población, estos terremotos han sido la causa de las mayores destrucciones en El Salvador. Durante el siglo XX, estos movimientos sísmicos han causado la destrucción en, al menos, siete ocasiones, produciéndose, a veces, en grupos de dos o tres eventos similares, separados por periodos de minutos u horas. Terremotos de este tipo fueron el de San Salvador, el 8 de junio de 1917; San Salvador, el 28 de abril de 1919; San Vicente, el 29 de diciembre de 1936; Ahuachapán y Atiquizaya, el 25 de diciembre de 1937; Jucuapa y Chinameca, el 6-7 de mayo de 1951; San Salvador, el 3 de mayo de 1965 y 10 de octubre de 1986; y San Vicente, el 13 de febrero de 2001. Los terremotos de moderada magnitud y foco superficial que ocurren a lo largo de la cadena volcánica tienen más un origen tectónico que volcánico y son probablemente el resultado de la zona de cizalla activada por un componente oblicuo de la colisión entre las placas de Cocos y Caribeña. Sin embargo, los enjambres de terremotos (grupo de sismos en los que no existe un terremoto principal), que pueden tener un origen volcánico, son relativamente frecuentes.

Existen otras fuentes importantes de actividad sísmica en áreas próximas a El Salvador. La más importante de éstas son las fallas de Motagua y Chixoy-Polochic que atraviesan Guatemala y marcan el límite entre las placas Caribeña y Norteamericana. Sin embargo, se puede asumir que esta fuente está a la suficiente distancia de El Salvador como para no contribuir significativamente al riesgo dentro del país, excepto posiblemente para muy largos periodos de retorno. El mayor movimiento que ha ocurrido durante este siglo en este límite de placas fue el terremoto de Ms 7.5 del 4 de febrero de 1976, que no produjo intensidades mayores de V en El Salvador.

Sobre la estructura tectónica de la depresión de Honduras, no existen noticias de que los terremotos originados en esta zona hayan causado daños en El Salvador. Sin embargo, diversos autores identifican una zona de tectónica extensional cerca de la frontera común entre El Salvador, Guatemala y Honduras, limitada por la falla de Montagua al norte, la cadena volcánica al suroeste y la depresión de Honduras al este. Según White (1991), un terremoto de Ms 7.5 ocurrió en junio de 1765, alcanzando una intensidad de VII. El mayor sismo acontecido en esta zona durante el siglo XX habría sucedido el 29 de diciembre de 1915 con Ms 6.4, aunque sus efectos en El Salvador no fueron muy importantes.

8.3.3. Historia sísmica

Dado que la historia sísmica de un área no corresponde exclusivamente a la relación de terremotos cuyos epicentros se localizan exclusivamente en ese área, sino que se relaciona con los fenómenos sísmicos ocurridos en un entorno geográfico y geológico de mayor o menor amplitud, se ha recurrido a enmarcar el área estudiada siguiendo esos criterios de forma aproximada. De esta forma, se ha analizado la sismicidad correspondiente a una zona definida por las siguientes coordenadas geográficas.

- Latitud 12° 37' 34" / 15° 20' 21"
- Longitud - 87° 25' 46" / - 91° 30' 49"

Se ha obtenido un listado de terremotos ocurridos en este ámbito geográfico, que abarca el período comprendido entre 1719 y 2001, incluyéndose aquellos terremotos con intensidad igual o mayor que V, o con magnitud igual o mayor que 4.5 (ver Inventario de sismos en Anexo 6). En la Figura 8.9. puede observarse la distribución geográfica de estos epicentros en el contexto regional que abarca el área de estudio.

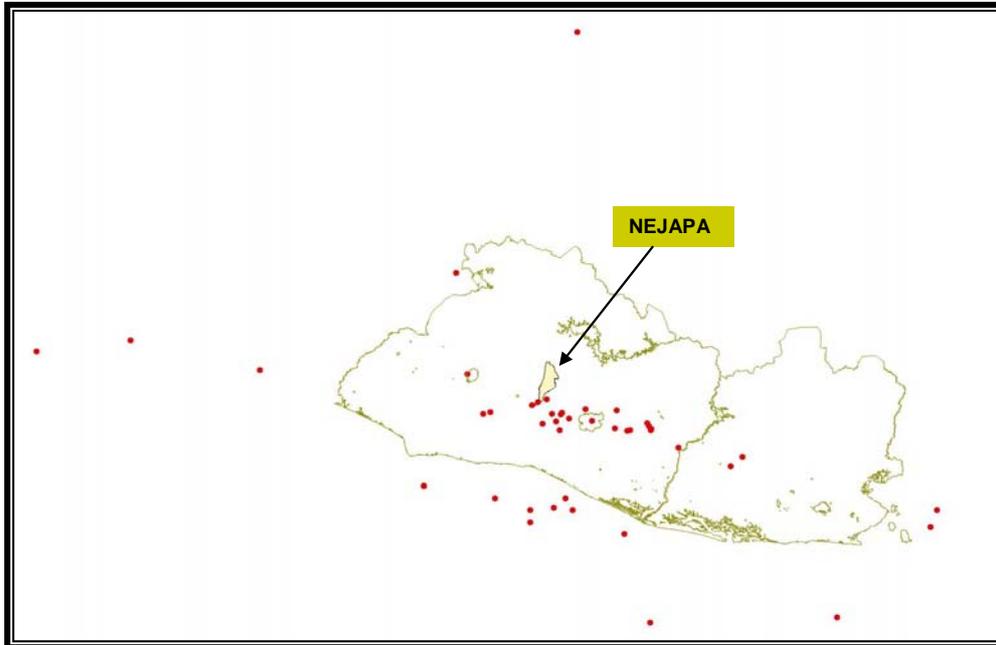


Figura 8.9.- Distribución de epicentros de los terremotos más destructivos sucedidos en el periodo comprendido entre 1719 y 2003.

A la vista de estos datos pueden entresacarse algunas conclusiones:

- El núcleo de epicentros más importante corresponde a la cadena volcánica y a la fosa de subducción. Dentro de esta distribución es significativa la concentración de epicentros en el departamento de San Salvador.
- La intensidad máxima asignada en la zona considerada, ha sido de VIII-IX en San Salvador, que corresponde al terremoto del 10 de octubre de 1986. La máxima magnitud registrada en el entorno cercano a la zona de estudio ha sido Mw 7.6, correspondiente al mismo terremoto del 10 de octubre de 1986, con epicentro en el océano Pacífico. Existe otro terremoto de mayor magnitud, Ms 7.9, ocurrido el 18 de abril de 1902, con epicentro en el océano Pacífico, pero ubicado a una distancia mucho mayor por lo que su influencia sobre el área de estudio ha debido ser menor.
- Respecto a los epicentros situados en el área de estudio o próximos a ella, son diez los terremotos registrados con epicentro en el departamento de San Salvador, cuatro de ellos ocurridos en el término municipal de San Salvador (números 7, 22, 33 y 37 del inventario, ver Anexo 6), uno en el Lago de Ilopango (nº 13) y uno en cada uno de los siguientes municipios: Apopa (nº 10), Nejapa (nº 27), Soyapango (nº 12), San Martín (nº 4) y Panchimalco (nº 8). Como puede observarse, uno de los terremotos

registrados sucedió en el municipio de Nejapa. Por otro lado, podrían señalarse cuatro sismos cercanos a la zona estudiada, situados en el departamento de La Libertad, en los municipios de Tepecoyo (nº 11 y 26), Colón (nº 2) y Antiguo Cuscatlán (nº 45). Debe tenerse en cuenta, no obstante, que el área de estudio ha sido afectada por los eventos sísmicos que sacuden a todo el país, así como por los terremotos locales con epicentros ubicados dentro y fuera del departamento en el que se encuentra el área de estudio.

En las Figuras 8.10, 8.11 y 8.12. se muestran las isosistas de los últimos terremotos acontecidos en la zona estudiada, correspondientes al 10 de octubre de 1986, al 13 de enero de 2001 y al 13 de febrero de 2001. La escala de intensidades utilizada es la Mercalli Modificada (MM).

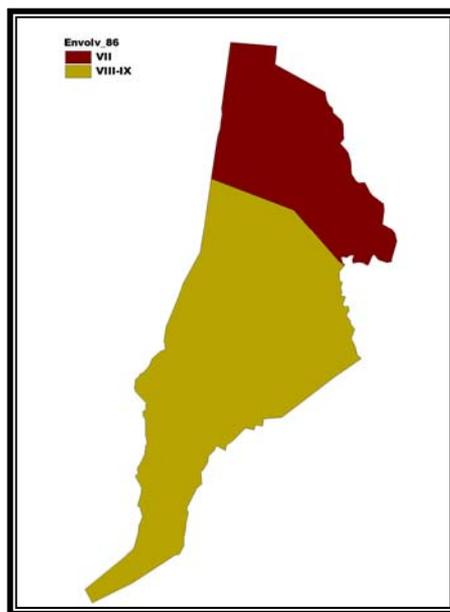


Figura 8.10.- Isosistas correspondientes al terremoto del 10 de octubre de 1986 (tomado de la base de datos del municipio de Nejapa realizada por la UCA).

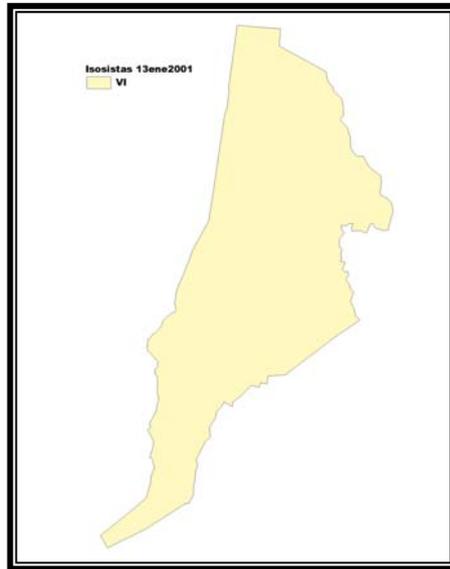


Figura 8.11.- Isosistas correspondientes al terremoto del 13 de enero de 2001 (tomado de la base de datos del municipio de Nejapa realizada por la UCA).

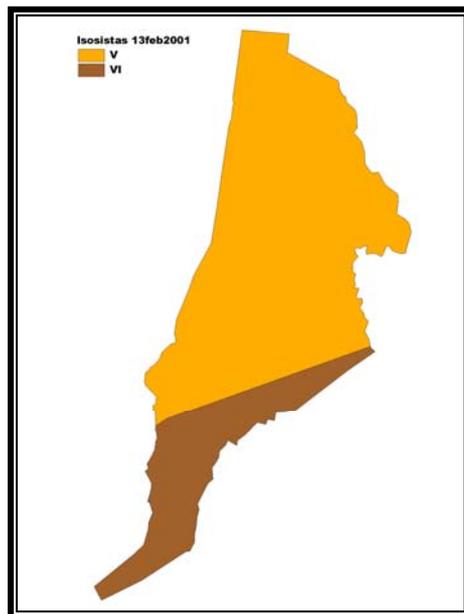


Figura 8.12.- Isosistas correspondientes al terremoto del 13 de febrero de 2001 (tomado de la base de datos del municipio de Nejapa realizada por la UCA).

8.3.4. Macrozonación sísmica

Los estudios de peligrosidad sísmica requieren, generalmente, un cálculo complejo habiéndose demostrado, en numerosas ocasiones, la variación que pueden experimentar los resultados ante pequeños cambios en alguno de los muchos parámetros que intervienen en la caracterización de la misma.

Esta dificultad hace que normalmente se adopten simplificaciones y que en la práctica, se caracterice la peligrosidad sísmica mediante un sólo parámetro, lo más representativo posible. Los parámetros más utilizados suelen ser la aceleración o la Intensidad, que no es, en sentido estricto, un parámetro de peligrosidad, aunque sí da una idea indirecta (y cualitativa) del movimiento del suelo, por el tipo de daño que describe para cada grado de escala que se utilice.

Otra de las simplificaciones que suelen hacerse en la evaluación de la peligrosidad sísmica, consiste en considerar su variación espacial dependiente únicamente de la distancia epicentral, lo que se conoce con el nombre de atenuación (efecto del medio) sin tener en cuenta otros factores, como son: la frecuencia de la onda sísmica, direccionalidad y magnitud de la fractura o estructura sismogénica, etc.

Existen diversas definiciones del término "peligrosidad sísmica". Cada una de ellas suele venir dada en función del tipo y condicionantes del estudio, sobre todo en lo que se refiere a los parámetros disponibles para su evaluación y a los métodos a utilizar en cada caso (métodos deterministas o métodos probabilistas).

Una definición que se adaptaría a nuestro estudio del término "peligrosidad sísmica" correspondería, con ciertas modificaciones, a la dada por Martín (1989): "probabilidad, en términos no siempre estrictamente matemáticos, de que en un determinado espacio de tiempo y como consecuencia de la sismicidad y del medio de propagación de las ondas sísmicas, se supere en determinada zona una intensidad macrosísmica dada o un determinado nivel de movimiento del terreno".

El resultado de la evaluación de la peligrosidad sísmica a pequeña escala, se denomina macrozonación sísmica. Esto se traduce en una distribución del área de estudio en una serie de zonas en cada una de las cuales la peligrosidad sísmica se considera homogénea.

Otro de los aspectos a tener en cuenta al analizar los actuales estudios de peligrosidad sísmica a pequeña escala es la no consideración en los mismos de la influencia formal de los factores locales (suelo, topografía, hidrogeología, etc.).

Dado que los objetivos del presente estudio no se centran en la evaluación de los parámetros que caracterizan la peligrosidad sísmica, se ha procedido a recopilar distintos mapas de peligrosidad sísmica realizados según diferentes modelos (Figuras 8.13., 8.14., 8.15., 8.16., 8.17. y 8.18.). Dichos mapas pueden servir como indicadores de la magnitud (en términos de aceleración) del evento sísmico esperado para distintos periodos de retorno.

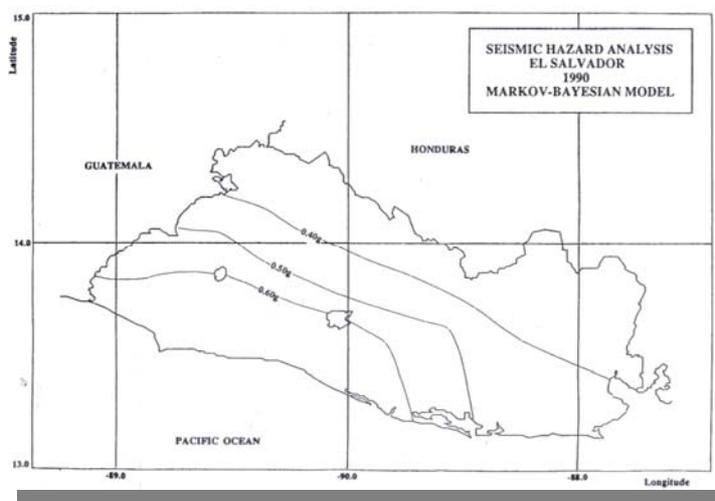


Figura 8.13.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 100 años según el modelo markov-bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

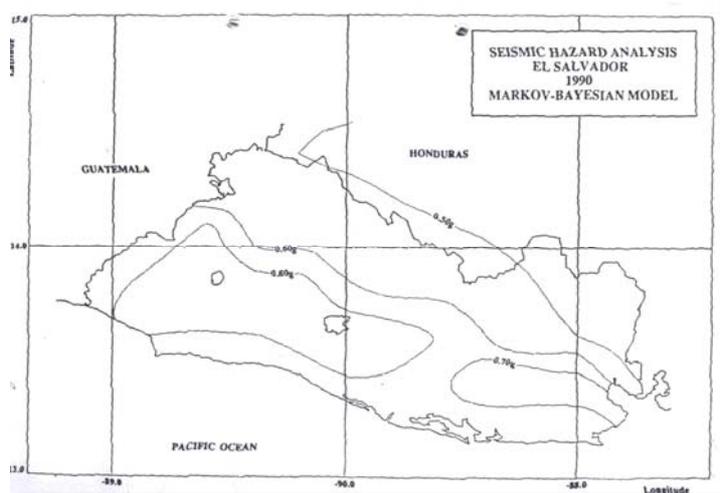


Figura 8.14.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 500 años según el modelo markov-bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

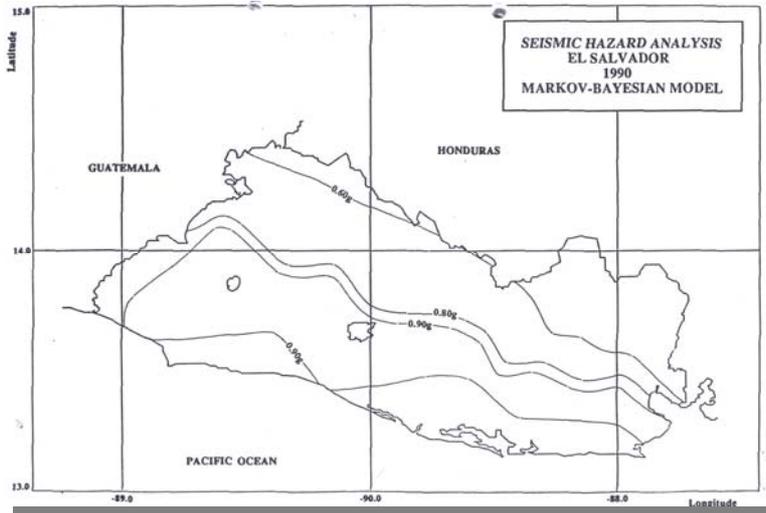


Figura 8.15.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 1000 años según el modelo markov-bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

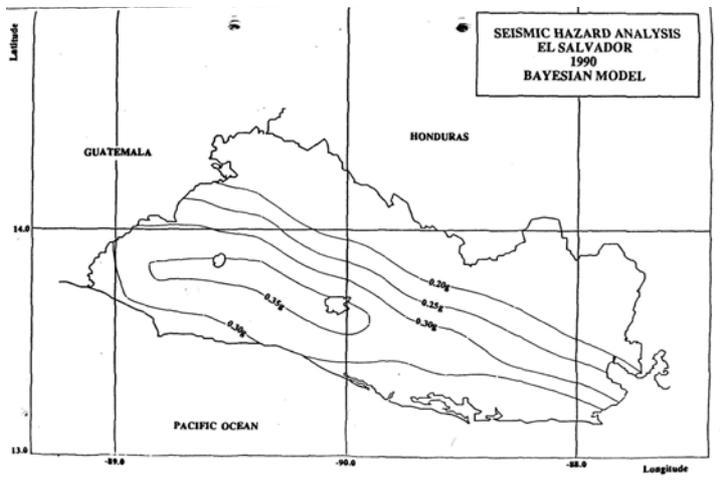


Figura 8.16.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 100 años según el modelo bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

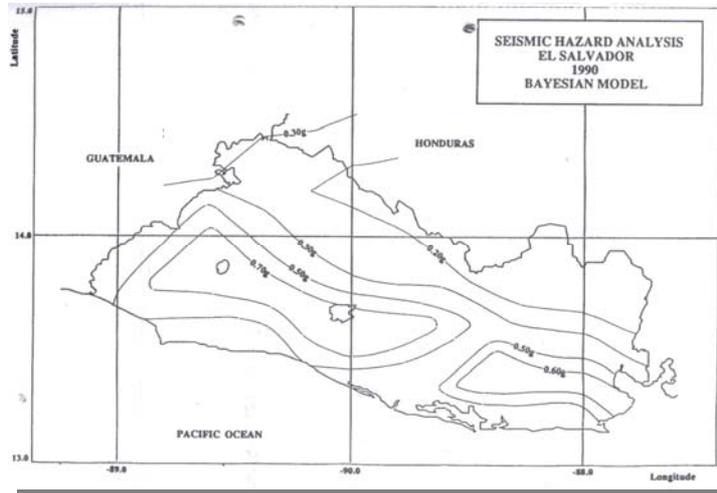


Figura 8.17.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 500 años según el modelo bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

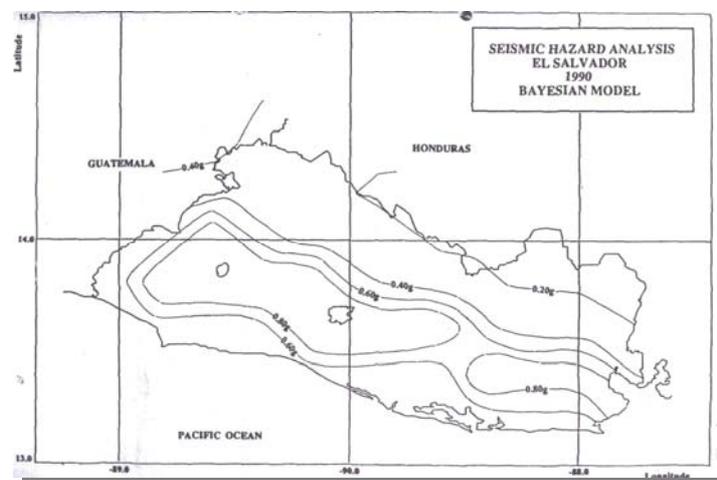


Figura 8.18.-Mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 1000 años según el modelo bayesiano (tomado de Alfaro et al, 1990)

8.3.5. Microzonación sísmica

Un cambio de litología, espesor, grado de fracturación, relieve, nivel freático y, como consecuencia, un cambio en la respuesta dinámica del terreno, lleva consigo una diferente reacción de éste ante las acciones sísmicas (Figura 8.19.). Estudios sobre la amplificación de la Intensidad en el mundo hablan de un incremento de la misma entre 2 y 3 grados en función de las condiciones locales del terreno. La microzonación sísmica evalúa la amenaza sísmica a gran escala, resaltando la influencia de estas condiciones. Como resultado se obtiene una serie de zonas de amenaza sísmica homogénea (microzonas).

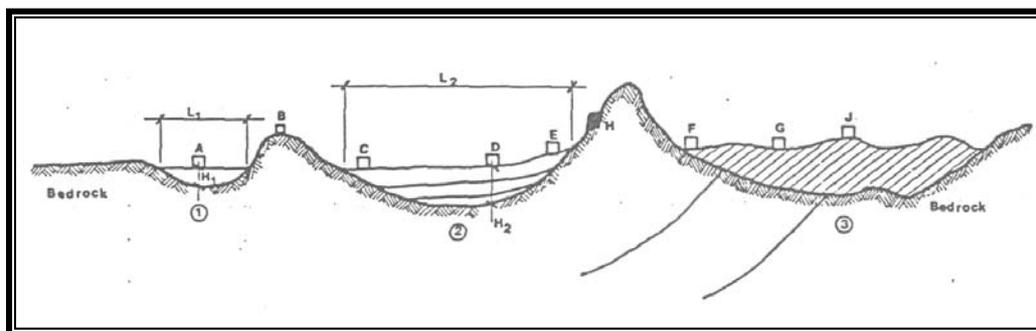


Figura 8.19.- Influencia de las condiciones locales en la respuesta sísmica del terreno (tomada de Dowrick, 1977).

- A mayor longitud (L_1 o L_2) de suelos blandos, menor efecto de borde del sustrato rocoso en el espectro de respuesta.
- La profundidad (H_1 o H_2) del sustrato afecta a la respuesta dinámica, de forma que el periodo de vibración del terreno aumenta con la profundidad.
- El buzamiento de las capas (Cuencas 2 y 3) afecta a las propiedades dinámicas.
- Cambios en los tipos de suelo (F y G).
- La topografía tanto del sustrato como de los suelos influye significativamente, particularmente en las zonas escarpadas en donde se puede producir una amplificación.
- El contenido de humedad, las presiones intersticiales y la situación del nivel freático influyen.

Para realizar la microzonación sísmica de un área determinada existen dos grupos de métodos: métodos directos y métodos indirectos.

Los métodos directos se basan en el registro de la onda sísmica real en el área que se desea estudiar, realizando la medida una vez que se ha establecido la red de sensores y aparatos de registro. Cuando se produce el terremoto se registran los parámetros en los que se va a definir el riesgo sísmico. Estos parámetros suelen ser aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo. Después de un determinado número de medidas se puede

establecer una serie de microzonas delimitadas por isóneas de valores del parámetro elegido. Otros métodos directos se basan en el registro de microsismos naturales o artificiales.

Los métodos indirectos se basan en la modelización físico-matemática de los factores que intervienen en la evaluación de la peligrosidad sísmica. El cálculo o la estimación de la forma en que afectan los distintos factores se puede obtener de los datos aportados por ensayos in situ o en laboratorio de las características dinámicas del suelo, así como de la correlación con áreas de condiciones similares o de la simulación del comportamiento de los suelos.

Para realizar la microzonación sísmica del área de estudio se ha recurrido a un método que tiene en cuenta los factores de amplificación local que influyen previsiblemente en la respuesta de cada tipo de terreno ante una acción sísmica, es decir, no se basa en una instrumentalización, ni en métodos cuantitativos de simulación. Se trata, por tanto, de un método clasificable en el grupo de los denominados indirectos.

8.3.5.1. Metodología

La microzonación sísmica llevada a cabo en el área de estudio está basada, como ya se ha comentado, en el análisis y valoración de los factores de amplificación, teniendo en cuenta la escala de trabajo (1:25.000). Como no existe un método cuantitativo para evaluar el grado de amplificación común de los factores que concurren en una determinada zona, se ha obtenido la microzonación mediante la superposición de distintas microzonaciones según escalas de amplificación relativas a cada factor. El resultado es un mapa que evalúa la respuesta sísmica del terreno de forma cualitativa, presentando diversas zonas en cada una de las cuales existen unas condiciones de amplificación homogénea y obteniéndose un gradación cualitativa del territorio respecto a zonas que amplifican más o menos las ondas sísmicas.

Los pasos seguidos para la elaboración del Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno pueden resumirse en los siguientes:

- Definición y valoración de los factores de amplificación
- Determinación de la amplificación esperable

8.3.5.2. Definición y valoración de los factores de amplificación

Se ha distinguido entre factores zonales y factores lineales o puntuales.

Factores zonales

Entre los factores zonales, se han tenido en cuenta los siguientes:

Factor litológico

Se ha comprobado en muchos lugares, la influencia que el tipo de suelo o roca tiene en la amplificación de las ondas sísmicas y, por lo tanto, en los efectos de los terremotos sobre las estructuras. Por esta razón, se ha procedido a la delimitación del tipo de materiales presentes en el área de estudio, basándose en la zonificación que figura en el Mapa Litológico (Mapa 2, Anexo 1) y realizando los correspondientes agrupamientos según la Norma Técnica para Diseño por Sismo editada por el Ministerio de Obras Públicas de El Salvador (1994). Previamente, se ha realizado una comparativa entre distintas normativas y trabajos, pudiendo comprobar en todas ellas una cierta coincidencia en la clasificación de los materiales, dado que la respuesta sísmica de los mismos es función de su grado de competencia.

La clasificación seguida según la normativa salvadoreña, así como el valor del coeficiente de sitio C_0 otorgado a cada categoría, y la asignación de los materiales presentes en la zona de estudio a cada una de las clases definidas, puede observarse en la Tabla 8.28. Se añade, además, una columna, correspondiente a la valoración relativa de cada tipo de material, tomando como referencia el valor de C_0 de los materiales rocosos (en este caso, las formaciones de basalto-andesitas) a los que se les asigna una mínima participación en la amplificación de las ondas sísmicas.

Los distintos materiales presentes en el área de estudio fueron clasificados según la normativa en base a las observaciones de campo, así como a partir de la caracterización realizada en Guzmán et al (1996) de los materiales presentes en el área metropolitana de San Salvador.

Debe señalarse, que el factor C_0 viene dado en la normativa para cuatro perfiles típicos de terreno que fueron definidos para el área metropolitana de San Salvador en base a los datos proporcionados por estudios geotécnicos existentes. A falta de más información, la clasificación de los perfiles de suelo y su correspondiente coeficiente de sitio C_0 se ha generalizado para todo el país. En este caso, el municipio de Nejapa se encuentra incluido dentro del área en la que fue desarrollada la anterior clasificación, no obstante, es algo que debe tenerse en cuenta para los estudios realizados en otras zonas.

Tabla 8.28.- Ponderación del factor litológico.

FACTOR LITOLÓGICO			
Clasificación según norma salvadoreña (1994)	Litologías del municipio	C _o	Valor
Suelo con más de 12 m de suelo cohesivo blando o suelo no cohesivo suelto y caracterizado por una V _c <150 m/s	Escorias T.B. (mayor espesor)	3.0	1.2
Suelo con un e=4-12 m de suelos cohesivos blandos a medianamente compactos o suelos no cohesivos sueltos	Coluvial T.B. (menor espesor)	3.0	1.2
Suelo con condiciones rígidas o muy densas con e≥30 m sobre el manto rocoso Suelo con condiciones compactas o muy compactas o medianamente denso con e<30 m	Tobas	2.75	1.1
Materiales de apariencia rocosa con V _c >500 m/s Suelo con condiciones rígidas o muy densas con e<30 m sobre el manto rocoso	Basalto-andesitas (C) Basalto-andesitas con piroclastos (SS) Basalto-andesitas con piroclastos y tobas (B)	2.5	1

(B) Formación Bálsamo

(C) Formación Cuscatlán

(SS) Formación San Salvador

Por otro lado, parece ser que la actual normativa salvadoreña está siendo revisada y puede sufrir modificaciones a corto plazo. Ante la posibilidad de que pudieran existir cambios sustanciales que afectaran a la clasificación de los materiales presentes en el municipio, se recurrió a clasificar los mismos según el International Building Code (2000), obteniendo los mismos valores que con la aplicación de la normativa salvadoreña, por lo que se mantuvo la misma.

Factor topográfico

La topografía del terreno influye notablemente en la intensidad del movimiento sísmico y puede mostrar un efecto que puede ser amplificador o atenuador. Se han realizado análisis teóricos cuyos resultados indican que ciertas formas o situaciones topográficas muestran hasta varios grados de amplificación respecto a las áreas circundantes.

En general, en los bordes de valle o de mesetas, las cimas de montes y valles con depósitos de suelos blandos se han observado efectos de amplificación de las ondas sísmicas respecto a sitios en terreno firme y llano y fondos de valle. De la misma manera, las pendientes y las alturas de los desniveles influyen en los efectos de amplificación de las ondas sísmicas.

La influencia de la topografía y geomorfología en la respuesta sísmica del terreno está recogida en numerosos trabajos y normativas, habiéndose seguido, en este caso, la ENV 1998-5:1994 del Eurocódigo 8 para clasificar y dar peso a este factor como puede observarse en la Tabla 8.29.

Tabla 8.29.- Ponderación del factor topográfico y geomorfológico (basado en la ENV 1998-5:1994).

FACTOR TOPOGRÁFICO Y GEOMORFOLÓGICO			
Pendiente y altura	Unidades morfológicas		Valor
$\alpha > 15^\circ$ $h > 30$ m	Colinas aisladas	$> 30^\circ$	1.4
	Crestones	$15^\circ - 30^\circ$	1.2
	Zonas próximas a divisorias pronunciadas		
	Laderas	Escarpes	1.2
	Escarpes		
Resto			1

α ángulo de la pendiente
h altura del desnivel

Debe señalarse, que no se ha tenido en cuenta la variación espacial del factor de amplificación. Esta variación supone el decrecimiento lineal de dicho factor con la altura hasta llegar a ser igual a la unidad en la base la unidad morfológica considerada. Tal variación no se ha tenido en cuenta, quedando del lado de la seguridad, debido a la dificultad que supone la representación cartográfica de la misma a escala 1:25.000.

En la zona estudiada y como puede observarse en el Mapa Geomorfológico (Mapa 3, Anexo 1), las morfologías presentes son: laderas, escarpes y colinas aisladas, en función de cuyo desnivel y pendiente ejercerán una mayor o menor influencia en la amplificación de las ondas sísmicas.

Factor hidrológico

El contenido de humedad, las presiones intersticiales y la presencia del nivel freático próximo a la superficie constituyen un agente de amplificación de las ondas sísmicas. Sin embargo, dicho factor no está contemplado en las normativas existentes, siendo complicada su ponderación. Por esta razón, se indica la influencia del mismo, pero no se considera en la generación de un mapa de respuesta sísmica del terreno, debiendo tener en cuenta su mayor incidencia en la época lluviosa, en la que el nivel del agua se encontrará más superficial.

Como dato indicativo, existen diversos trabajos, entre los que se encuentra el de Medvedev (1965), en los que se habla de un umbral de unos 10 m de profundidad del nivel freático, por encima del cual puede considerarse la influencia del agua sobre la respuesta sísmica del terreno.

Factores lineales y puntuales

Además de los factores zonales, deben tenerse en cuenta factores lineales y puntuales. Para ello, se considerarán elementos tectónicos tales como fallas, dado que constituyen discontinuidades en las que pueden darse efectos de amplificación.

8.3.5.3. Amplificación esperable

Para caracterizar cada microzona respecto a los factores de amplificación litológico y topográfico descritos, se ha procedido a realizar la evaluación numérica de cada uno de ellos descrita en el apartado anterior con el fin de obtener una valoración total a partir de la multiplicación del valor de cada factor.

Dicho producto se ha efectuado mediante un SIG, obteniendo una serie de valores que varían de 1.00 a 1.68. La representación cartográfica de estos valores ha permitido su clasificación en las categorías de amplificación esperable que pueden observarse en la Figura 8.20., representándose dichas categorías en el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno (Mapa 12, Anexo 1).

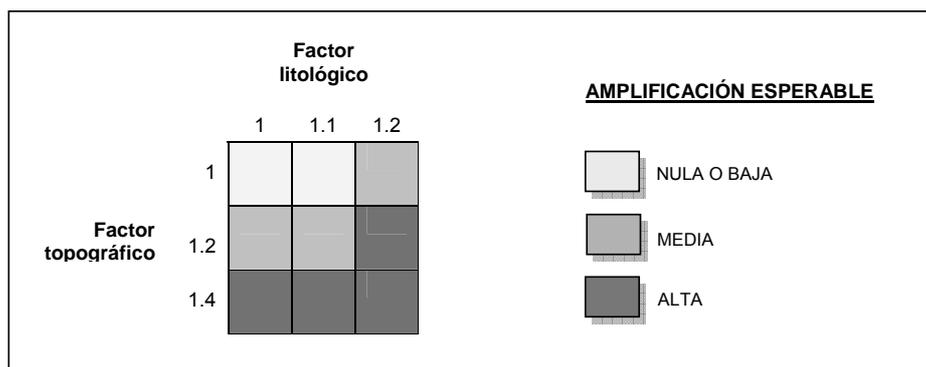


Figura 8.20.- Rangos de amplificación esperable.

En el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno (Mapa 12, Anexo 1) puede observarse que las zonas en las que se daría una mayor amplificación de las ondas sísmicas se sitúan principalmente en las laderas del volcán de San Salvador, en la parte alta del Cerro de Nejapa y en los cerros Redondo, La Tabla y Mulunga. Dichas zonas corresponderían a aquellos lugares en los que confluye la existencia de determinadas formas morfológicas, unida a la presencia de altas pendientes y/o de materiales no cohesivos sueltos. Debe considerarse, además, que las zonas situadas sobre o próximas a fallas o discontinuidades estructurales importantes, son zonas en las que la amplificación de las ondas será mayor. Por otro lado, se observa que las áreas con menor respuesta sísmica del terreno se sitúan principalmente en la mitad norte del municipio, correspondiendo a aquellas zonas ubicadas sobre los materiales más resistentes (formaciones de tobas o basalto-andesitas) y con menor pendiente.

Si comparamos el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno obtenido (Mapa 12, Anexo 1) con el Mapa de Envoltentes de Isosistas del terremoto de 1986 (Figura 8.10), correspondiente al máximo sismo registrado, podemos observar que las zonas con mayor intensidad registrada coinciden con aquellas en las que se espera una respuesta sísmica del terreno mayor. Estas áreas se encuentran ubicadas, en general, en la zona centro y sur del municipio, por debajo de la falla que modifica el curso del río San Antonio. Si tenemos en cuenta, además, que en los estudios de amplificación de la intensidad en el mundo se habla de valores de incremento de la misma entorno a 2 grados en función de las condiciones locales, podemos suponer que la máxima intensidad sentida en el municipio durante el terremoto de 1986 de I=IX, incluye los efectos de amplificación local, por lo que la mínima intensidad sería unos dos grados menor, es decir, igual a VII, en aquellas áreas donde la amplificación es menor o nula. Esto coincidiría, en líneas generales, con las zonificaciones observables en ambos mapas.

No obstante y sobre el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno obtenido, debe tenerse en cuenta, que la valoración de cada factor respecto a su peso en la posible amplificación posee, a pesar de estar representada por un número, un carácter relativo debido a la complejidad de su determinación. Por esta razón, debe tomarse la zonificación propuesta como una zonificación cualitativa del territorio respecto a zonas que amplifican más o menos las ondas sísmicas, tratándose, no obstante, de una información muy útil en los trabajos de planificación y ordenación territorial.

8.3.5.4. Riesgos geológicos asociados

Los daños causados por los terremotos no sólo se deben a la vibración sísmica en sí misma, sino que pueden producirse otros fenómenos que la acompañan o son inducidos por

ella. Entre estos fenómenos figuran los movimientos de ladera, que como ya se comentaba en el Apartado 8.2.3. pueden ser desencadenados por los sismos, pudiendo crear un notable incremento del riesgo en las áreas susceptibles de presentar nuevos movimientos o reactivación de movimientos aparentemente estabilizados.

Por esta razón, se ha considerado interesante superponer el Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera (Mapa 8, Anexo 1) y el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno (Mapa 12, Anexo 1), con el fin de identificar aquellas zonas en las que la respuesta del terreno ante los terremotos tendrá una mayor influencia en el desencadenamiento de movimientos de ladera. El nivel Nulo o Bajo corresponde a valores de susceptibilidad a los movimientos de ladera, Nulos o Muy Bajos y/o a una respuesta sísmica del terreno, Nula o Baja, lo cual es razonable teniendo en cuenta que en esos casos o bien no existirían los factores condicionantes mínimos en el terreno para que se produzcan inestabilidades, o bien no existiría una amplificación local significativa de las ondas sísmicas que pudiera contribuir al desencadenamiento de inestabilidades. El resto de las combinaciones dadas se han dividido en nivel Medio y Alto, habiéndose agrupando con fines de representación cartográfica en función de las condiciones conjuntas de inestabilidad asísmica y de respuesta sísmica del terreno (Figura 8.21.).

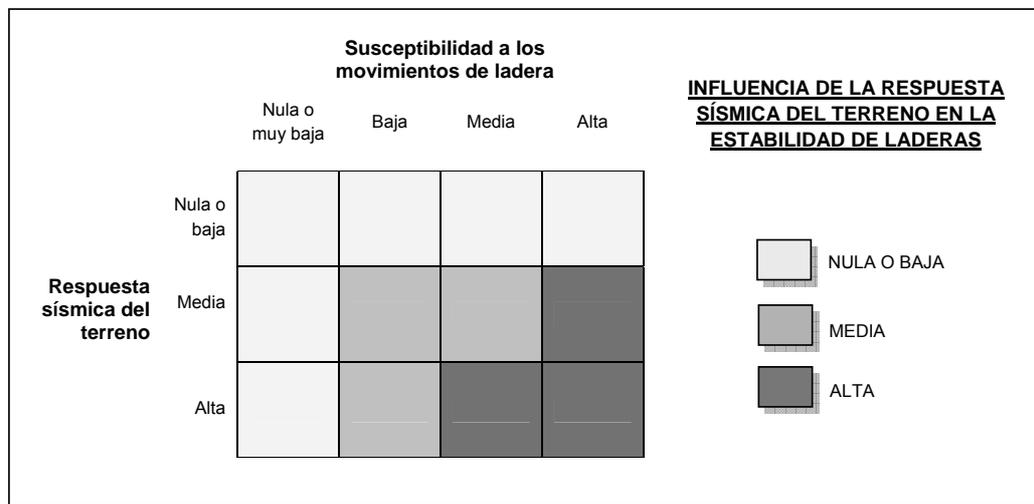


Figura 8.21.- Rangos de influencia de la respuesta sísmica del terreno en el desencadenamiento de movimientos de ladera.

Los resultados de dicha integración se muestran en el Mapa 13 (Anexo 1). En él puede observarse que las zonas donde un evento sísmico generaría una mayor inestabilidad de laderas son aquellas áreas de mayor relieve del municipio como son las laderas del volcán,

los cerros y las crestas, pero especialmente las zonas de mayor pendiente, correspondientes al Cerro de Nejapa, Picacho y quebradas El Aguacatón y La Quebradona. Los terremotos influirán, además, en gran medida en la estabilidad de taludes pudiendo desencadenar su rotura. Este aspecto no es representable cartográficamente a la escala del mapa, pero debe ser tenido en cuenta.

8.3.6. Vulnerabilidad de las edificaciones

Mediante observaciones en campo y consultas al arquitecto del municipio se ha realizado una estimación de los tipos de construcciones presentes en el área de estudio. Para ello, se ha seguido la clasificación propuesta en la Escala Macrosísmica Europea (EMS, 1998), y se ha diferenciado entre el casco urbano y la zona rural (Tabla 8.30).

Tabla 8.30.- Estimación de los tipos de construcciones presentes en el municipio de Nejapa, según la EMS (1998). Se trata de porcentajes estimados ya que no se han calculado mediante recuento individual.

		ZONA RURAL (%)	CASCO URBANO (%)
Mampostería	Adobe	80	70
	Bahareque (*)	15	10
	Reforzada o confinada (**)	-	10
Concreto Reforzado (***)	Estructuras de marco de concreto reforzado	Marco con nivel moderado de DSR	5
		Marco con alto nivel de DSR (****)	

(*) Al tratarse de una escala europea, algunos tipos de construcciones presentes en el país, no se encuentran incluidos en dicha escala, tal es el caso de las estructuras de bahareque. Por esta razón, estas construcciones se han asimilado al tipo de estructura de adobe de la EMS, considerada como la más parecida a éstas.

(**) Tipo de construcción denominada "saltex" en El Salvador.

(***) Tipo de construcción denominada "mixto" en El Salvador.

(****) DSR.- Diseño sismorresistente.

En el Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno (Mapa 12, Anexo 1) se han representado mediante un símbolo asociado a los núcleos de población, los porcentajes estimados de los distintos tipos de construcciones existentes, clasificadas de acuerdo con la mencionada EMS (1998).

Dicha escala incorpora una diferenciación en la resistencia de los edificios con respecto a vibraciones ocasionadas por los terremotos (vulnerabilidad) como ayuda a la

identificación de la respuesta sísmica de las construcciones. Para ello, diferencia las estructuras en las clases de vulnerabilidad que puede verse en la Figura 8.22.

Tipo de Estructura	Clase de Vulnerabilidad					
	A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERÍA	Cantos rodados, rocas	○				
	Adobe (ladrillo de tierra)	○	—			
	Roca simple		○			
	Roca masiva		○	—		
	Sin refuerzo, con unidades de rocas manufacturadas		○			
	Sin refuerzo, con pisos de concreto reforzado		○			
	Reforzada o confinada		○		—	
CONCRETO REFORZADO	Marco sin diseño sismorresistente (DSR)		○			
	Marco con nivel moderato de DSR		○		—	
	Marco con alto nivel de DSR		○		—	—
	Muros sin DSR		○			
	Muros con moderato nivel de DSR		○		—	
	Muros con alto nivel de DSR		○		—	—
ACERO					○	—
MADERA					○	—

Figura 8.22.- Diferenciación de estructuras en clases de vulnerabilidad (tomado de la EMS, 1998). En el sentido de vulnerabilidad decreciente (A-F):

- Las clases A, B y C representan la resistencia de una vivienda "típica" de adobe, una construcción de ladrillos y una estructura de concreto reforzado (RC).
- Las clases D y E representan aproximadamente descensos lineales en la vulnerabilidad como resultado de mejoras en los diseños sismorresistentes (DSR). También dan cabida a los casos de estructuras de madera bien construidas, mampostería reforzada o confinada, y estructuras de acero (conocidas por su resistencia a las vibraciones producidas por terremotos).
- La clase F representa la vulnerabilidad de una estructura con un nivel alto de diseño sismorresistente.

Para determinar la vulnerabilidad de una estructura, el primer paso es la determinación del tipo de edificio. Con la tipología definida, se entra en la Tabla de Vulnerabilidad (Figura 8.22.) que mostrará la clasificación más probable en términos de la clase de vulnerabilidad, así como en el rango en que se puede encontrar.

Según esto, la mayor parte de las viviendas del municipio presentarían un grado de vulnerabilidad alto (A, B), propio de las construcciones de adobe. Sólo en el caso del casco urbano, encontraríamos algunas estructuras con un nivel de vulnerabilidad menor (D, E). No obstante, debe tenerse en cuenta que la calidad de la construcción puede hacer que varíe la

respuesta que en un principio se espera de ella. Según el recuento de estructuras dañadas que se llevó a cabo en el país tras los terremotos del 2001 (Bommer et al, 2002), muchas de las construcciones de adobe y bahareque sufrieron un colapso total, mientras que las de tipo mixto (mampostería reforzada) generalmente sobrevivieron intactas. En este sentido, debe señalarse la importancia de que cada vez sean más, las construcciones que se realicen siguiendo normas sismorresistentes que reduzcan al máximo su vulnerabilidad, especialmente en el caso de aquéllas consideradas como estratégicas o de mayor trascendencia. Sobre este punto, las normas salvadoreñas señalan las categorías de ocupación que se describen a continuación.

Categorías de ocupación

La Norma Técnica para Diseño por Sismo (El Salvador, 1994) clasifica las construcciones en función de su uso y de la importancia que éste tiene en los momentos inmediatos y posteriores a un evento sísmico (Tabla 8.31.).

Tabla 8.31.- Categorías de ocupación (tomado de la Norma Técnica para Diseño por Sismo, El Salvador 1994)

CATEGORÍAS DE OCUPACIÓN	TIPO DE OCUPACIÓN O FUNCIÓN DE LA ESTRUCTURA
<p style="text-align: center;">I (Establecimientos esenciales o peligrosos)</p>	<p>Comprende aquellas edificaciones que son indispensables después de un sismo para atender la emergencia y preservar la salud y la seguridad de las personas. Incluye hospitales, centros de salud, estaciones de bomberos, centrales telefónicas y de telecomunicaciones, instalaciones escolares y militares y cualquier otra edificación y/o instalación de servicio público, almacenamiento de sustancias tóxicas que se requiere para superar la emergencia.</p>
<p style="text-align: center;">II (Edificios de ocupación especial)</p>	<p>Cualquier edificación que tenga niveles altos de ocupación o edificaciones que requieran su operación en el periodo inmediatamente posterior al sismo. Incluye: edificios gubernamentales, universidades, guarderías, mercados, centros comerciales con un área de más de 3000 m², almacenes con un área de piso de 500 m² o más de 10 de m de altura, salones que ocupan más de 200 personas, estadios con graderías al aire libre para 2000 personas o más, edificios de más de 4 pisos o más de 1000 m² por piso, museos, monumentos, terminales de transporte, instalaciones hospitalarias diferentes a las de la categoría de ocupación I, locales que alojen equipo especialmente costoso,...</p>
<p style="text-align: center;">III (Edificios de ocupación normal)</p>	<p>Construcciones que tengan niveles bajos de ocupación, incluye aquellas construcciones comunes destinadas a viviendas, oficinas, locales comerciales, hoteles, edificaciones industriales y todas aquellas construcciones no incluidas en las categorías de ocupación I y II.</p>

En el municipio se ha llevado a cabo un recuento de aquellos edificios construidos según normativas sismorresistentes (DSR), siendo los que pueden observarse en la Tabla 8.32.

Tabla 8.32.- Construcciones con diseño sismorresistente.

Categoría de ocupación	Construcciones con DSR
I	Casa comunal (clínica municipal) Instituto Escuelas
II	Alcaldía Mercado Guardería
III	Escuela de empresas Nave del polideportivo 2 viviendas particulares

A la vista del recuento, se observa que, en general, las construcciones consideradas como estratégicas o de vital importancia se han construido con diseño sismorresistente. No obstante, la sede que ocupa la policía no está edificada con este tipo de diseño. Igualmente, se comentan las deficientes condiciones constructivas de algunas escuelas, por lo que en la práctica no debieran considerarse como sismorresistentes.

Por otro lado, los daños esperables dependerán no sólo de la vulnerabilidad de las construcciones, sino también, del tamaño del terremoto (medido principalmente por el momento sísmico, intensidad o magnitud) y de su posible amplificación.

Mediante la observación del Mapa de Respuesta Sísmica elaborado (Mapa 12, Anexo 1), así como de su posible coincidencia con lo que podría ser una zonificación cualitativa en grados de intensidad para un determinado terremoto, podría, en cierta medida y teniendo en cuenta la escala de trabajo, evaluarse la ubicación los núcleos poblacionales, así como el tipo de construcción predominante, en relación con aquellas zonas del municipio más susceptibles de sufrir daños.

En este sentido y como indicador de la respuesta de las construcciones ante los movimientos sísmicos, existe el inventario de daños en edificaciones del municipio, que llevó a cabo la alcaldía tras los terremotos del 2001.

Edificaciones afectadas por los terremotos de 2001

El mencionado censo de edificios dañados fue registrado por núcleos poblacionales y en él aparecen contabilizados los edificios en función del grado de daño que presentan (Anexo 7):

- Destruídos en un 100%
- Destruídos en un 50%
- Destruídos en un 25%
- Destruídos en un 10%

Debe señalarse que la valoración del porcentaje de edificio dañado fue realizada en su mayor parte por personal no cualificado y sin seguir un modelo en cuanto a puntos inventariables, lo que las hace altamente subjetivas. Por otro lado, tampoco se tuvo en cuenta el tipo de construcción considerada, por lo que se valoraron de forma conjunta estructuras de distinto tipo, no pudiendo obtener conclusiones acerca de la vulnerabilidad de cada una de ellas.

Se ha realizado un análisis del daño en edificios por zonas dentro de un contexto litológico, topográfico y geomorfológico, ubicándolos en el Mapa de Respuesta Sísmica del terreno (Mapa 12, Anexo 1), y se han obtenido resultados similares en todos los casos. En ellos se observa, que independientemente de la litología en la que se encontrara la construcción considerada, éstas fueron dañadas en más de un 50% mayoritariamente (Figura 8.23.). Esto se debe a la influencia de los factores topográfico y geomorfológico, además de al hecho de que en la zona rural, el 100% de las construcciones son de adobe y bahareque, lo que las hace altamente vulnerables a partir de ciertas intensidades como las que se dieron de forma generalizada en todo el municipio durante los terremotos de 2001.

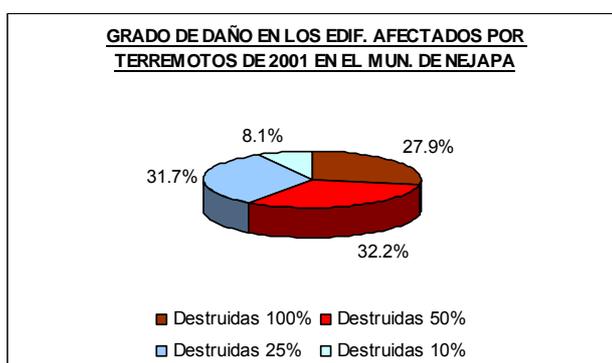


Figura 8.23.- Porcentajes de daño en los edificios afectados por los terremotos de 2001 en el municipio de Nejapa.

Eliminado: ¶

9. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.1. Formaciones Hidrogeológicas

9.1.1. Estratigrafía

La geología del subsuelo en Nejapa se describe en base a datos obtenidos en distintos estudios:

- perfiles litológicos de las perforaciones de los pozos pertenecientes al municipio (ver columnas litológicas en el Anexo 8).
- corte geológico X-X' obtenido en el "Estudio sobre aguas subterráneas en la zona metropolitana de San Salvador" (ANDA-PNUD, 1972).
- corte geológico Y-Y', realizado a partir de los pozos perforados (ver Anexo 9).
- interpretación de cortes geoelectrónicos A-A', B-B', C-C' y D-D' realizados por ANDA-PNUD en 1972 (ver cortes en el Anexo 9).

La serie descrita a continuación pertenece a la zona central del municipio (ver la ubicación de los cortes en el Mapa 14, Anexo 9), ya que es en este área, donde existen pozos perforados medianamente profundos. En la parte norte (Tutultepeque, El Bonete) sólo existen pozos excavados de poca profundidad que explotan el acuífero más superficial existente en el talpetate (tobas y material piroclasto, en general). En la zona del volcán de San Salvador no existen pozos de ningún tipo.

Tanto en los cortes geológicos como en los perfiles de los pozos se observa que la distribución de los materiales es muy compleja debido a la naturaleza volcánica de los mismos (Figura 9.1. y Anexo 9). En general, las capas atravesadas en los sondeos son:

- 0 m-15 m: Capa de material piroclástico-pumítico (arenas, lapilli, pómez, ceniza volcánica). También puede encontrarse pequeños bloques de lava basáltica. La granulometría de estas capas puede variar en función de la cantidad de finos (limo-arcilla) que se encuentra en la matriz. La permeabilidad dependerá de la granulometría pero, en general, la permeabilidad es moderada (en las capas más arcillosas la permeabilidad será baja y en las más arenosas, con bloques, la permeabilidad será buena).
- 15 m-40 m: Alternancia de lava escoriácea andesítico-basáltica con lava compacta basáltica. Las permeabilidades de estas capas son altas.
- 40 m-100 m: Capa de material piroclástico: cenizas, lapilli, arenas, pómez. En el centro del acuífero abundan las arcillas. Permeabilidad baja.
- 100 m->200 m: Lavas compactas y lavas escoriáceas de alta permeabilidad, con estratos de poca potencia de piroclásticos intercalados (5 m.).

En algunos perfiles se encuentran capas de lava basáltica de baja permeabilidad y puede encontrarse, también, alguna capa de espesor considerable (10-20 m) de toba volcánica de baja permeabilidad.

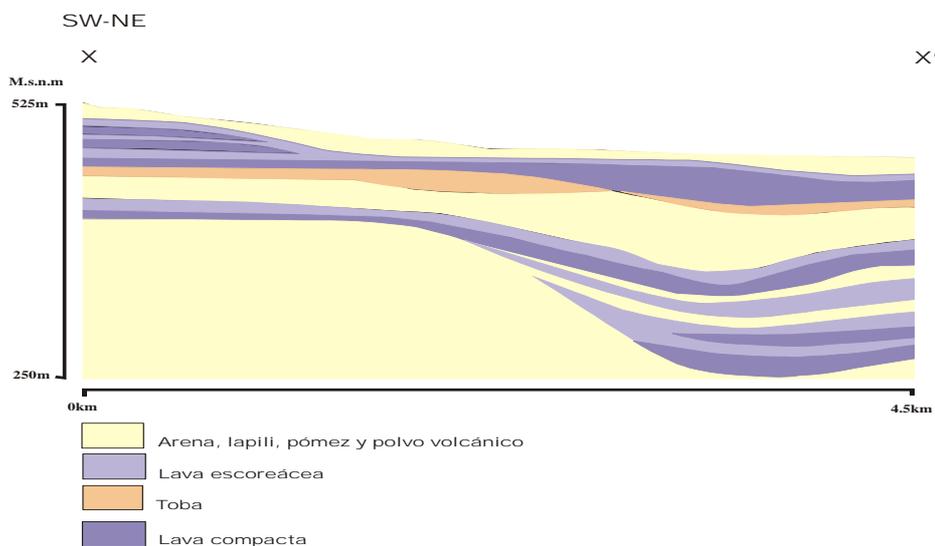


Figura 9.1.- Corte geológico X-X', ubicado en el Mapa 14 (Anexo 1)'.

9.1.1.1. Columnas litológicas

Observando las columnas litológicas que se han encontrado en la zona (ver Anexo 8) sacamos las siguientes conclusiones.

El nivel de agua medio en la mayoría de los pozos se encuentra a unos 20-30 m. de profundidad. En algún pozo este nivel está a 70 m. Esta diferencia de niveles en pozos cercanos, con poca variación de cota topográfica, se debería a que explotan niveles acuíferos situados a diferente profundidad y no conectados entre ellos.

En todas las columnas se observa que, en general, existe una potente capa de lavas alternada con finas capas de piroclastos, situada entre 100 y 150 m. de profundidad en la zona central. Esta correspondería a la mejor unidad acuífera, que puede llegar a tener más de 100 m. de potencia.

A nivel más superficial, también existen lavas situadas a 10-15 m. de profundidad, con espesores de 20 a 30 m. Estas lavas, en algunos casos, se encuentran secas o bien no se explotan por tener poca cantidad de agua (los niveles piezométricos están por debajo de éstas).

Entre las dos capas de lavas existe una potente capa de materiales piroclásticos con distintas granulometrías. En la parte central abundan las arcillas, y esto provoca que el acuífero profundo sea confinado. Así, en estas zonas, no existe conexión hidráulica entre el acuífero superficial y el profundo. La única manera de que puedan estar conectados es a través de fallas, pero no se conoce bien esta conexión.

En consecuencia, la recarga de las lavas profundas no se da en la parte central. En esta zona sólo se recarga el acuífero superficial. El acuífero profundo se recargaría en las zonas donde no existen las arcillas, y donde las lavas están menos profundas o existe una mayor cantidad de fracturas que conectarían ambos acuíferos. En este caso, como el nivel piezométrico está por debajo del nivel freático superficial, hay recarga de la zona superficial a la profunda.

9.1.2. Parámetros hidrogeológicos

A continuación se definen algunos conceptos hidrogeológicos utilizados en las pruebas de aforo (definiciones de Custodio y Llamas, 1996):

Permeabilidad hidráulica: Facilidad con que un material deja pasar agua a su través.

Transmisividad: Capacidad de un medio para transmitir agua. Es el producto de la permeabilidad por el espesor del acuífero

Coefficiente de almacenamiento: volumen de agua liberado por una columna de acuífero de altura igual al espesor del mismo y de sección unitaria, al disminuir la presión en una unidad.

Eficiencia del pozo: es el cociente entre el descenso teórico y el descenso medido en el pozo. En la eficiencia intervienen las pérdidas de penetración en el pozo más las pérdidas por circulación en la porción de acuífero próximo y dentro del propio pozo.

Caudal específico: es el cociente entre el caudal de agua bombeado y el descenso de nivel producido, medido en el pozo.

9.1.2.1. Datos de pruebas de aforo

Pozo Hacienda Atalpo

Este pozo se perforó en enero de 2000, utilizando el sistema de rotación con circulación directa. En los primeros 42 metros se encontró roca muy dura. El diámetro final de perforación es de 17_{1/2}".

Se realizó un registro eléctrico con un equipo GEOLOGGER 3030, que demostró que el acuífero estaba a media profundidad. El revestimiento del pozo es:

0-109 m.: Tubo ciego de acero al cobre de 12" de diámetro.

109-145.5 m.: Rejilla tipo puente de acero al cobre de 12". El acuífero se encuentra en esta zona.

145.6-147.5 m.: Tubo ciego de 12" de diámetro.

A partir de los datos obtenidos en la prueba de bombeo a caudal constante realizada en marzo de 2000, se calculó la transmisividad (T) y del coeficiente de almacenamiento (S). En el informe de ANDA se obtuvo una T=1130.00 GPD/pie (equivalente a 14 m²/día) a partir del método de Logan. Se ha vuelto a realizar la gráfica del ensayo, y calculando la T por Jacob (representación gráfica del descenso respecto al logaritmo del tiempo), interpretándose que se trata de un acuífero confinado:

$$T = 0.183 \times \frac{Q}{m} = 2 \text{ m}^2/\text{día}$$

Donde: Q = caudal = 267 m³/día
m = pendiente de la recta = 24.5 m.

Otra fórmula aproximada para tener la transmisividad es la fórmula de Galofré:

$$T = 100 \times \frac{Q(l/s)}{m} = 100 \times 3/24.5 = 12 \text{ m}^2/\text{día}$$

El coeficiente de almacenamiento es de: S = 2.25 x 10⁻⁸. En la prueba de bombeo a caudal variable se obtuvo una eficiencia del pozo de 69% con un caudal de explotación de 23.9 GPM (156 m³/día).

Pozo Embotelladora Salvadoreña

Pozo n°1

Se perforó en 1997 con sistema de rotación. Tiene 183 m. de profundidad (600'), diámetro de perforación 17_{1/2}". El entubamiento del pozo es:

0-110 m.: Tubería ciega.
110-177 m.: Rejilla. Zona acuífera.
177-183 m.: Tubería ciega.

Después de la perforación se realizó un ensayo de bombeo a caudal constante y uno a caudal variable. Del primero de ellos y aplicando el método de Jacob se obtuvo el siguiente valor de T:

$$T = 0.183 \times \frac{Q}{m} = 87.44 \text{ m}^2/\text{día}$$

Donde: Q = 3928 m³/día
m = 8.22 m.

Con la fórmula de Galofré:

$$T = 100 \times 45.45/8.22 = 553 \text{ m}^2/\text{día}$$

En este caso es más fiable el valor de T obtenido con la fórmula de Jacob.

El coeficiente de almacenamiento salió de 1.6×10^{-3} . Este valor indica que se trata de un acuífero semiconfinado. En la prueba de bombeo a caudal variable se obtuvo una eficiencia del pozo de 93.5%.

Pozo nº2

Según los datos del ensayo de bombeo a caudal constante realizado en este pozo en 1995, se calculó la T por el método de Jacob:

$$T = 0.183 \times \frac{Q}{m} = 45 \text{ m}^2/\text{día}$$

Donde: $Q = 1996 \text{ m}^3/\text{día}$
 $m = 8 \text{ m}$.

El coeficiente de almacenamiento se asumió de 0.01. Se trata de un acuífero libre o semiconfinado. En la prueba de bombeo a caudal variable se obtuvo una eficiencia del pozo de 87.5%.

Nejapa nº4 (La Granja)

En el ensayo de bombeo y aplicando el método de Jacob, se obtuvo la siguiente T:

$$T = 0.183 \times \frac{Q}{m} = 26 \text{ m}^2/\text{día}$$

Donde: $Q = 2298 \text{ m}^3/\text{día}$
 $m = 15.8 \text{ m}$.

Con la fórmula de Galofré:

$$T = 100 \times 26.6/15.8 = 17 \text{ m}^2/\text{día}$$

El coeficiente de almacenamiento se asumió de 0.001, indicando que se trata de un acuífero semiconfinado. En la prueba de bombeo a caudal variable se obtuvo una eficiencia del pozo de 90.92%.

Pozo El Coyolito

Se construyó en Mayo de 2002, y actualmente no está en funcionamiento. Tiene 189 metros de profundidad, con un diámetro de perforación de 12 pulgadas. Está entubado con tubería de acero al cobre y rejilla de acero inoxidable. La rejilla se sitúa a las siguientes profundidades:

91 m. - 116 m.

140 m. - 146 m.

158 m. - 183 m.

No se dispone de los datos de aforo, pero se da un valor de $T = 173 \text{ m}^2/\text{día}$ y una $S=2.38 \times 10^{-3}$, que indica semiconfinamiento.

9.1.2.2. Comentarios sobre las pruebas de aforo

El tipo de acuíferos en lavas fracturadas acostumbran a ser anisótropos e heterogéneos. La anisotropía es la variación de la permeabilidad hidráulica según la dirección que se observe. La heterogeneidad es la variación de las propiedades del medio de un sitio a otro. Pero a veces, en rocas permeables por fisuración, si ésta es densa, vertical y orientada al azar, se comporta aproximadamente como acuíferos isótropos y homogéneos.

Los valores de transmisividad obtenidos no son muy altos en estos pozos. Esto puede deberse a que el espesor del acuífero explotado es bajo, la permeabilidad hidráulica es baja o una mezcla de las dos. Además, en pozos incompletos (no explotan todo el espesor del acuífero) donde la permeabilidad hidráulica vertical es muy inferior a la horizontal, se comportan como si estuvieran en un acuífero en que su transmisividad fuera la correspondiente a la porción de acuífero enfrentada a la zona filtrante ($T = k * \lambda$, donde λ es la longitud de la rejilla). Esto puede aplicarse sobretodo a los acuíferos en materiales piroclásticos poco consolidados.

Según los datos de bibliografía existen pozos en la zona con valores de transmisividad de $1500 \text{ m}^2/\text{día}$ o más, valor elevado que correspondería a zonas acuíferas de lava fracturada o estratos muy permeables de material piroclástico. Una baja transmisividad provoca que el descenso del pozo en el bombeo sea superior, y por tanto, la bomba tiene que ubicarse a más profundidad, cosa que supone un mayor coste económico de explotación.

Los coeficientes de almacenamiento corresponden, en general, a acuíferos semiconfinados, es decir, los estratos superiores del acuífero explotado, tienen una cierta permeabilidad vertical, que permite la infiltración de agua a través de ellos (acuitardos).

En acuíferos confinados, el cono de descenso es más profundo y más extenso que en los acuíferos libres. La ventaja de tener acuíferos confinados o semiconfinados es que quedan aislados de posibles contaminaciones superficiales. Además, los acuitardos también actúan como filtros naturales de los contaminantes.

Los pozos poco eficientes no son económicamente rentables, porque para bombear el mismo caudal que un pozo eficiente se precisan mayores descensos de nivel y por tanto mayor altura de bombeo, o si se tiene limitado el descenso, el caudal obtenido es menor. Existen pozos poco eficientes por un mal diseño de construcción, pero también van perdiendo eficiencia al pasar los años, a causa de las incrustaciones en la rejilla o colmataciones de las aperturas por entrada de material fino. Para mejorar la eficiencia del pozo es necesario realizar limpiezas en éste.

9.1.3. Unidades hidrogeológicas

El área de estudio está muy relacionada geológicamente con el complejo del volcán de San Salvador. Las características hidrogeológicas están condicionadas por la naturaleza, espesor y relación entre los estratos de lava y piroclastos provenientes de éste.

Los flujos de lava intercalados con tobas y piroclastos pumíticos, son generalmente de tipo básico y están dispuestos radialmente entorno al cono del volcán, con espesores que varían desde unos pocos metros hasta más de 50 m.

Las dos formaciones hidrogeológicas más importantes en la zona son:

- Formación San Salvador. Se trata de lavas, tobas y piroclastos, pertenecientes al cuaternario volcánico (Holoceno reciente).
- Formación Cuscatlán. Formada por lavas, tobas y piroclastos, pertenecientes al terciario-cuaternario volcánico (Plioceno-Pleistoceno).

Formación San Salvador

Conforma el acuífero de Nejapa y está formada por:

- Depósitos sedimentarios formados por conos de deyección y material aluvial en los ríos. No son muy extensos, pero tienen una porosidad buena y una permeabilidad alta a media. Por sí solos no forman una unidad acuífera, por su escasa extensión, pero sí son una zona de recarga en función de su conexión con otros acuíferos.
- Cenizas dacíticas o tierra blanca con inclusión de piedra pómez predominando en la parte central del municipio, aunque se pueden encontrar en todo el territorio. Tienen una buena porosidad y una permeabilidad media a baja en función de la granulometría predominante. En general, forman acuíferos de bajo rendimiento. En pruebas de infiltración que se hicieron en la zona de Guluchapa en este tipo de material, se encontró una capacidad de infiltración bastante alta ($I = 0.67$ para ceniza, tobas y piroclastos).
- Tobas de color café, en forma de franjas estrechas que bajan desde la ladera del volcán, y cubren parte del área central del municipio. Tienen una porosidad buena y una permeabilidad media-baja. Forman acuíferos de bajo rendimiento.
- Lavas básicas-intermedias (basaltos y andesitas) que provienen del volcán de San Salvador y que cubren parte de sus laderas. La porosidad es casi nula y su permeabilidad primaria también, en cambio, tienen una permeabilidad secundaria muy alta, debido a la presencia de una gran cantidad de fisuras. Pueden formar acuíferos de alto rendimiento.

Formación Cuscatlán

Estos materiales dan lugar a un acuífero de rendimiento medio conectado al acuífero de Nejapa. Esta formación está compuesta por:

- Lavas básicas e intermedias y piroclastos en los cerros más septentrionales. Tienen una buena permeabilidad secundaria por fisuración y son acuíferos con rendimiento medio-alto.
- Epiclastitas volcánicas y piroclastitas que rellenan zonas aisladas en la parte norte del área de estudio y, en mayor proporción, el cauce del río Acelhuate. Tienen una porosidad y permeabilidad más baja que las de la formación San Salvador, ya que están más compactadas.

Formación Bálsamo

Está formada por:

- Lavas efusivas básicas e intermedias. Constituyen el basamento impermeable, presentando una porosidad y permeabilidad baja.
- Epiclastitas volcánicas y piroclastitas. Pueden tener buena porosidad, pero su permeabilidad es media-baja.

9.1.4. Geofísica

9.1.4.1. Interpretación de cortes de resistividad eléctrica

En el estudio hidrogeológico de la zona de Nejapa-Mapilapa (1975) se realizaron una serie de sondeos eléctricos verticales (SEV), en los que se obtuvieron cuatro cortes geoeléctricos de la zona central de Nejapa (ver Mapa 14, Anexo 9). Estos perfiles se han interpretado nuevamente en este estudio para definir la litología del subsuelo. La relación de estas litologías con las formaciones geológicas es complicada, teniendo en cuenta los datos de resistividad. Por este motivo, aunque se han intentado definir, es un dato que no debe tomarse como absoluto. También se dispone de un corte geoeléctrico de la zona de Calle Vieja realizado en el estudio de Esquivel (2000) (ver cortes geoeléctricos A, B, C, D y E, Anexo 9).

Perfil A-A'

Corta el municipio por la parte sur del núcleo urbano de Nejapa, en dirección WNW-ESE, desde Santa Rosa Arriba a la Aldea las Mercedes, con una extensión de 5.3 Km. Se han distinguido cinco capas litológicas en función de la resistividad y de las perforaciones de los pozos Mataderos Salvador n°1, Mapilapa (Cambio) y El Castaño. Las capas atravesadas son:

- Capa superficial interpretada a partir del mapa geológico, formada por piroclastitas ácidas (tierra blanca), epiclastitas volcánicas y rocas efusivas ácidas. Espesor de unos 5 metros. Se considera que existe infiltración en estos materiales, pero en otros estudios se dice que su permeabilidad es baja (considerada una formación estéril). Corresponde a la unidad s_4 de la formación San Salvador.

- Capa de 5 a 10 metros de espesor, que corresponde a flujos de lava andesítico-basáltica del volcán San Salvador, alternados con materiales piroclásticos. Es una formación de buena permeabilidad por fracturación. Se interpreta que corresponde a la unidad s_2 de la formación San Salvador.
- Capa de 20 a 30 m. de espesor formada por material aluvial-fluvial o piroclásticos retrabajados poco consolidados, con niveles de toba. Hacia el este, esta capa pasa lateralmente a arcillas. Es una capa de permeabilidad baja a regular (dependiendo de la cantidad de arcillas), que corresponde a la unidad s_4 o s_3 de la formación San Salvador.
- Capa de 50 a 90 m. de potencia de lava andesítico-basáltica del volcán San Salvador. Se trata de una alternancia de capas de lava escoriácea con lava compacta. Tiene una permeabilidad buena. Corresponde a la unidad s_2 de la formación San Salvador.
- Capa de unos 20 m. de espesor formada por arcillas al oeste, pasando a tobas y piroclásticos gruesos con delgados estratos de lavas. Son materiales de alta cohesividad. La permeabilidad es regular. Esta capa podría formar parte de la unidad c_1 de la formación Cuscatlán o a la b_1 de la formación Bálsamo (en este caso sería una formación estéril en general, a no ser que estuviera afectada por fallas).

Si se considera que la capa superficial de tierra blanca tiene un buen índice de infiltración, la recarga de agua de lluvia que se produzca en estos materiales circulará hasta alcanzar las lavas más superficiales, pero será difícil que acceda al acuífero profundo, sobretodo hacia el este, por la existencia de un estrato grueso de material predominantemente arcilloso. Por tanto, el acuífero estaría confinado o semiconfinado. La explotación de pozos en esta zona implica profundizar de 60 m. a más de 100 m. para llegar a las lavas profundas.

Perfil B-B'

Corta el municipio por la parte central, al norte del núcleo urbano de Nejapa, en dirección NW-SE, con una extensión de 3 Km. Se distinguen cinco unidades litológicas:

- Capa superficial de unos 5 metros de espesor máximo, formada por piroclastitas ácidas (tierra blanca), epiclastitas volcánicas y rocas efusivas ácidas. Corresponde a la unidad s_4 de la formación San Salvador.
- Capa fina de 5 m de espesor que corresponde a flujos de lava del volcán San Salvador, alternados con piroclásticos. Forma parte de la unidad s_2 de la formación San Salvador. Buena permeabilidad.

- Capa de 100 m. de espesor en el centro formada por material aluvial-fluvial o piroclásticos retrabajados poco consolidados, con niveles de toba. Es una capa de permeabilidad baja a regular (dependiendo de la cantidad de arcillas). Corresponde a la unidad s_4 de la formación San Salvador.
- Hacia el oeste, a unos 15 metros de profundidad, dentro de la unidad anterior penetra un flujo de lava, alternado con materiales piroclásticos de la unidad s_2 , con una potencia máxima de 40m. Permeabilidad alta.
- Por debajo de todo, y aflorando al este (llegando al cerro de Nejapa), se encuentran tobas, aglomerados y lavas terciarias, de baja permeabilidad, que corresponderían a la unidad b_1 y b_3 . Esta unidad puede considerarse el basamento impermeable.

Por tanto, en la zona ocupada por este corte sólo sería factible la explotación de agua subterránea en la zona W, donde se encuentra el flujo de lava. Hacia el este, la capa de tobas con arcillas hace que no exista un buen acuífero. La segunda capa de lavas de 5 metros de espesor es demasiado superficial (posibles problemas de contaminación) y poco potente para constituir un buen acuífero.

Perfil C-C'

Corta la parte central del municipio desde el cantón Conacaste al SW hasta Las Mariitas al NE, con una longitud de 4 Km. El perfil vertical cambia de sur a norte. Se distinguen unas seis unidades litológicas:

- Capa superficial. Al SW aflora la unidad s_4 , de unos 20 m. de potencia, formada por material piroclástico predominantemente fino, de permeabilidad media. En el centro aflora una fina capa de Q_f (prácticamente despreciable, por esta razón no se diferencia como unidad) y por debajo vuelve a aparecer.
- Al NE existe una capa de 5 m. a 10 m. de potencia, de lava intermedia-ácida y tobas con piroclásticos antiguos de permeabilidad regular, seguramente correspondientes a la unidad c_3 .
- Al SW penetra una capa de 50 m. a 70 m. de espesor correspondiente a flujos de lava del volcán San Salvador alternados con piroclásticos, correspondiente a la unidad s_2 . Presenta una buena permeabilidad.
- A la misma altura de la capa anterior pero hacia el NE, el flujo de lava desaparece y lateralmente se pasa a una capa de 30 m. a 60 m. de potencia formada por arcillas.

Seguramente forma parte de la unidad s_4 o c_1 con predominancia de finos. Permeabilidad baja a nula.

- Capa al SW de unos 100 m. de espesor (por debajo de las lavas) correspondiente a tobas y piroclásticos antiguos con delgados estratos de lavas. Se interpreta que podría pertenecer a la unidad c_1 o bien a la b_1 . Tiene una permeabilidad regular a baja, dando una productividad irregular.
- Capa de lava compacta y lava escoriácea de unos 80 m. de potencia. Esta capa podría formar parte de la unidad s_2 , presentando con una buena permeabilidad.

Por tanto, en la zona atravesada por este corte se puede encontrar material permeable a unos 20 m. de profundidad, pero las lavas profundas con más posibilidad de agua estarían a más de 100 m. de profundidad.

Perfil D-D'

Este corte es paralelo al C-C' y su interpretación es parecida.

- Capa superficial de menos de 5 m. de potencia, correspondiente a la unidad s_4 y permeabilidad de media a baja. En la parte central del perfil y sub-superficialmente hay una capa muy resistiva que podría ser de tobas y aglomerados terciarios de baja permeabilidad.
- Flujo de lava andesítico-basáltica de la unidad s_2 con alternancia de lava escoriácea y lava compacta. Puede estar muy fracturada, sobretodo en la parte superior. Su potencia máxima es de unos 120 m. Permeabilidad elevada. Lateralmente el flujo de lava desaparece y pasa a tobas y piroclastos con arcillas, que podrían ser de la formación s_4 o c_1 .
- Capa de unos 80 m. de espesor correspondiente a piroclásticos con muchas arcillas. Se interpreta que podría pertenecer a la unidad c_1 o s_4 . Tienen una permeabilidad regular a baja, dando una productividad irregular.
- Lateralmente la capa de tobas anterior pasa a flujo de lava basáltica escoriácea de 60 m. de potencia, correspondiente a la unidad s_4 . Buena permeabilidad.

El acuífero seguiría estando a más de 100 m. de profundidad.

Perfil E-E'

Es un corte W-E en la zona de Calle Vieja. Tiene una longitud de 800 m. Las capas atravesadas son:

- En el centro aflora una fina capa de unos 4 m. de potencia, de lava escoriácea perteneciente a la unidad s_2 .
- Por debajo, y aflorando en el W y en el E del corte, existe una capa de toba pumítica y material piroclástico, de unos 30 m. a 40 m. de potencia, de permeabilidad regular. Podría formar parte de la unidad.
- Capa de arcillas de 80 m. de potencia en el centro y unos 5 m. en los extremos del corte.
- Capa de lava escoriácea de 100 m. de espesor en los extremos W y E, y de 10 m en el centro, perteneciente a la unidad s_4 y con permeabilidad elevada. En el centro se intercepta una capa altamente resistiva que se interpreta como lava compacta de muy baja permeabilidad.
- Capa de arcillas de baja permeabilidad.

9.1.4.2. Conclusiones de los cortes geoelectricos

Existe una gran variación espacial de los materiales que se encuentran en profundidad debido a su propia génesis.

Según los cortes geoelectricos, las zonas de los cortes más cercanas al volcán de San Salvador presentan buenos acuíferos en lavas escoriáceas y lavas compactas basáltico-andesíticas a una profundidad media de unos 50 m. (en algunos puntos se puede encontrar a 20 m.).

En zonas más alejadas del volcán de San Salvador, en el centro del acuífero, existe una potente capa de arcillas intercalada con material piroclástico más o menos consolidado, que, en general, es poco permeable a impermeable por lo que tiene un bajo interés como acuífero. Por debajo de éstas, a unos 100-150 m de profundidad, según la zona considerada se encuentran flujos de lavas basálticas de buena permeabilidad. En algún punto, estas lavas se encuentran a 50 m. de profundidad. Posiblemente esta capa sea la mejor para su explotación.

9.2. Hidrodinámica

9.2.1. Inventario de puntos de agua

El inventario de puntos de agua se basa en:

- Puntos de agua propios recopilados en una campaña de campo realizada entre marzo y abril de 2003. Los datos obtenidos se pueden ver en el Anexo 10. Estos puntos pertenecen mayoritariamente a pozos excavados y surgencias (ver Mapa 15, Anexo 1).
- Recopilación de puntos de agua procedentes de estudios existentes en la zona. Estos pozos han sido visitados y georreferenciados en este estudio.
- Otros puntos de varios estudios que no han podido ser georreferenciados.

Uno de los problemas encontrados al recopilar datos de estudios anteriores, ha sido correlacionar los pozos existentes con los obtenidos en este trabajo (no hay coincidencia entre nombre de pozos o características de éstos). Este hecho, unido a la falta de coordenadas geográficas (ningún estudio presentaba las coordenadas de los puntos, y buscados en el GIS no coinciden) implica que pueden existir errores. También se ha observado que en estos estudios no se midió el nivel piezométrico, sino que usaron niveles de varios años anteriores, sobretudo de los años 70 (los obtenidos en el estudio para abastecer el área metropolitana de San Salvador, realizado por ANDA-PNUD). Como ninguna institución se ha dedicado a realizar medidas de los niveles de agua a lo largo del tiempo, los datos de pruebas de aforo en los pozos perforados son los únicos para poder conocer la evolución temporal del acuífero. Estos datos son puntuales y corresponden a distintos años de medida.

En las Tablas 9.1. y 9.2. se presentan los pozos perforados de la zona. En aquellos en los que se conoce el año de medida del nivel de agua, se indica junto a su nombre. Esta medida se obtuvo de estudios sobre pruebas de bombeo o aforos realizados anteriormente, en los cuales se midió la profundidad del agua antes de empezar el ensayo. En el Anexo 8 están las columnas litológicas encontradas de algunos de estos pozos.

Tabla 9.1.- Pozos perforados recopilados de otros estudios y propios.

Nombre	Longitud	Latitud	Prof. (m)	Diámetro entub. (Pulg.)	Nivel estático(m)	Cota topog (m)	T(m ² /d)	S	Nivel piezom (m)
Beneficio Nejapa	13°49'5"	89°13'50"	79	10	1.60	435	1407	0.015	433.4
Nejapa 2(El Castaño 2)(1975)	13°48'15"	89°14'12"	109.73	16	16.90	450	2830	0.0054	433.1
El Castaño	13°48'19"	89°14'18"	50	14	48.30	480			431.7
Nejapa 4 (1999)	13°48'58"	89°14'31"	91.44		29.54	520			490.46
Nejapa 4 (1996)			119.78	16			26	0.001	
Mataderos 2	13°48'55"	89°14'51"	76.20	10	28.50	510	310		481.5
Mataderos 1(1971)	13°49'4"	89°14'46"	78.64	10	24.38	510			485.62
Nejapa 9. El Cambio	13°49'2"	89°15'12"	204.22	8	24.38	490	555		465.62
Nejapa 7. El Cambio 2	13°49'11"	89°14'54"	252.37		24.38	465			440.62
Ingenio San Esteban	13°49'44"	89°13'48"	125	8	4.50	430			425.5
Hacienda Mapilapa, n°1(1999)	13°49.940	89°13.624	143		25.6				
Hacienda Mapilapa(explor)	13°49'45"	89°14'14"	292	2	5	439	22		434
Hacienda Mapilapa	13°49'20"	89°14'58"	252	8	25.40	465			439.6
Embosalva 1(1997)	13°49'11"	89°14'33"	182.68	12	30.48	465	73	1.6E ⁻³	434.52
Embosalva 2(1995)	13°49'6"	89°14'33"	76	10	25.91	463	45	0.01	437.09
Nejapa 8	13°49'38"	89°14'32"	206	16	55.32	456	540	0.001	400.68
Hacienda Atalpo(2000)	13°49'53"	89°14'1"	148	12	53	440	14	2.25E ⁻³	387
Ing.El Castaño (1975)	13°48'54"	89°14'3"	131	4	17.70	450			432.30
Hda.El Castaño 2 (1975)			110	16	16.90	445	2830	5.4E ⁻³	428.1
El Castaño 1(1975)							2729	4.1E ⁻³	
Ing.El Castaño (manantial) (1989)			9		4.57		1000 a 2000		
Escuela El Castaño (1997)			90		No se encontró agua				
El Salitre			91.44		27.2	438.88			411.68
Nejapa 7	13°49'8"	89°14'56"	107	4	24.40	464			439.60

Nombre	Longitud	Latitud	Prof. (m)	Diámetro entub. (Pulg.)	Nivel estático(m)	Cota topog (m)	T(m ² /d)	S	Nivel piezom (m)
Nejapa 8	13°49'42"	89°14'30"	293	4	23.88	451.6			427.12
ELS-2 17	13°49'38"	89°14'10"	125	8	7.51	433			425.49
ELS-2 25	13°49'33"	89°14'7"	90	4	2.54	433			430.46
Felipe López	13°49'14"	89°15'6"	40	6	33	473			440
Hacienda Marisol	13°48'45"	89°15'51"		12	85.62	533			447.38
El Coyolito(2000)	13°49.378	89°14.472			72		173	2.38E ₃	
2 de Mayo (1997)	13°51.483	89°12.795	40 m	4	8				

Nota: algunos de los niveles estáticos que aparecen en la tabla no se sabe exactamente cuándo fueron medidos, pero parece ser que algunos se tomaron en los años 70 y, por lo tanto, no tienen nada que ver con la realidad actual. En los pozos en los que sí se sabía la fecha de medida, se ha anotado. Las coordenadas se han obtenido de los datos del G.I.S de Nejapa realizado por la UCA y en algunos puntos se tomaron los datos en campo. Existen dos ensayos de perforación en un pozo llamado Nejapa 4, pero que no coinciden en diseño de construcción, por lo que se cree que son dos pozos distintos.

Tabla 9.2.- Pozos perforados inventariados en el campo

Nombre	Longitud	Latitud
Mecafé (•)(+)	13°48.391	89°14.004
Pozo 7 (•)	13°49.137	89°14.970
Pozo 8	13°49.595	89°14.653
Pozo 9 El Cambio 1	13°49.038	89°15.179
Pozo 6. La granja (•)	13°48.783	89°14.741
Suchinango (*)	13°47.605	89°13.969
Suchinango (*)	13°47.618	89°13.959
Castaño 2(Samaria)	13°48.933	89°14.067
Pozo 4 (Salitre) (•)	13°48.777	89°14.423
Pozo 1. El Castaño. Nacimiento(•)	13°49.090	89°14.010
Nacimiento 3 (•)pedras	13°49.077	89°13.968
MIDES(abastecim.)	13°51.461	89°13.610
MIDES (P-1-P)	13°51.480	89°13.634
MIDES (P-3-P)	13°51.511	89°13.319
Seisbaueca (no productivo)	13°48.871	89°14.066

(*) Pozo nuevo que aún no está en funcionamiento.

(•) Análisis químico 2003.

(+) Este pozo tiene una profundidad de 85 m. y el nivel de agua está aproximadamente a 72m.

Nota: Por la dificultad de relacionar algunos pozos que se han observado en campo con los que estaban en otros estudios, se ha realizado esta nueva tabla. Parece que los pozos que coinciden en las dos tablas son el pozo 7, pozo 9 (El Cambio 1), pozo 8, El Castaño 2(samaria). No se ha podido medir el nivel del agua porque los pozos están en funcionamiento, o bien no se tiene acceso a ello.

Se ha recopilado una serie de aforos realizados en los pozos. Los resultados obtenidos de estos estudios se han presentado en el Apartado 9.1. de formaciones hidrogeológicas:

- Informe de perforación, pozo PBM-9. Escuela de Comunidad 2 de Mayo (1997).
- Informe de aforo, pozo embotelladora Salvadoreña (1995).
- Informe de perforación del pozo embotelladora Salvadoreña (1996).
- Informe de vídeo pozo nº1, Mapilapa.
- Informe de aforo del pozo nº4 (1999).
- Resumen de perforación del pozo el Coyalito (2002).
- Pruebas de bombeo en Hacienda Atalpo (2000).

9.2.2. Hidrodinámica del acuífero central de Nejapa

No ha sido posible realizar una buena piezometría debido a que los pozos perforados pertenecen a ANDA y no se tuvo acceso a ellos. Además, se encuentran en estado de explotación.

Se han interpretado los mapas de isopiezas ya existentes en la zona:

- Mapa isopiezas realizado por ANDA-PNUD en 1972 (Mapa 16, Anexo 1).
- Mapa de isopiezas realizado en el año 2000 (base datos GIS de la UCA, Mapa 17, Anexo 1).

En estas piezometrías, el flujo de agua subterránea tiene una dirección NE.

En las dos piezometrías se observa que en la zona más cercana al volcán de San Salvador la equidistancia entre las isopiezas es menor que en la zona centro-norte del acuífero. El gradiente hidráulico calculado en 1972, cerca del volcán es de 0.03 y en el estudio del 2000 es de 0.02. En la planicie, el gradiente de 1972 es de 0.01 y en el 2000 es de 0.008. La separación mayor entre isopiezas denota una mayor transmisividad del acuífero (ya sea por un aumento del espesor del mismo, por aumento de la conductividad hidráulica o ambos a la vez). No obstante, la piezometría de 1972 está realizada con datos medidos durante el estudio. En cambio, en el trabajo del año 2000 se realizó con datos de niveles de agua de distintos años (no medidos en el estudio). Por este motivo, no se sabe hasta qué punto son comparables los resultados.

Según se observa en la piezometría del 2000, el río San Antonio es efluente, es decir, recibe agua del acuífero. En parte del recorrido del río, sobretodo en su nacimiento, se encuentra seco, debido a la gran cantidad de pozos existentes en el área, que hacen disminuir el nivel piezométrico (efecto del cono de bombeo). Es posible que sea el acuífero de lavas, tobas y piroclastos superficial el que alimente al río, y que el acuífero profundo tenga poca influencia.



Fotografía 9.1.- Nacimiento del río San Antonio

La profundidad media a la que se encuentra el agua (niveles de los pozos perforados) es de 30 m. por debajo de la superficie del terreno, según la piezometría existente.

En el Mapa 18 (Anexo 1), se han ubicado los pozos perforados inventariados. Utilizando los niveles medidos en los años más recientes (1995-2002), se ha intentado realizar un nuevo mapa de isopiezas. Este mapa no ha sido realizado rigurosamente (faltan puntos de agua y

los utilizados, no pertenecen a una misma fecha de medida), pero sirve como esquema indicativo de la dinámica actual del acuífero en función de los últimos datos disponibles. No presenta muchos cambios respecto al realizado en el año 2000, pero pretende ilustrar la influencia de los pozos de bombeo sobre la piezometría (aunque este área de influencia puede ser mayor o menor en función de datos reales actualizados).

Los pozos utilizados son los que aparecen en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3.- Inventario de pozos utilizados.

Pozo	Año medida
Nejapa-4	1999
Embosalva-2	1995
Embosalva-1	1997
Hac. Atalpo	2000
Mapilapa	1999
Coyolito	2002

Igual que en los mapas anteriores, el flujo natural de las aguas subterráneas es dirección NE fluyendo desde el volcán San Salvador sobre el valle del río San Antonio. En el

mapa se ha marcado la zona donde se concentra la mayor cantidad de pozos de bombeo de ANDA (un 80% de los pozos perforados se encuentra en esta zona). La gran cantidad de pozos y su explotación intensiva provoca una distorsión del flujo natural de agua subterránea, creando una depresión piezométrica entorno a los bombeos.



Pozo ANDA en el nacimiento río San Antonio

Fotografía 9.2.- Pozo de ANDA en el nacimiento del Río San Antonio

Después de la isopieza de 400 m. situada más al norte existe una falla, cuyas características y funcionamiento se desconocen. Como tampoco se dispone de niveles piezométricos cercanos a ella, no se sabe la influencia que ejerce sobre el acuífero. Podría ser una zona de conexión entre el acuífero superficial y el profundo. De esta manera, produciría un aumento del nivel piezométrico en el acuífero profundo hacia el norte del plano de falla, para seguir disminuyendo después. También podría ser que se

tratara de una falla normal con hundimiento del bloque norte, cosa que provocaría que los niveles acuíferos productivos se hubieran desplazado a más profundidad.

La mayoría de los pozos perforados tienen una profundidad superior a los 100 m., llegando algunos, a más de 200 m. Estos pozos están explotando un acuífero profundo situado en lavas y piroclastos.

El pozo n°1 de Hacienda Mapilapa tiene una profundidad de agua medida en marzo de 1999 de 25,6 m. y en diciembre de 2002 de 28.3 m. Esto significaría que el nivel de agua subterránea ha bajado más de 2.5 m. en 3 años y medio. Basándonos en los datos de este pozo existiría una disminución de 0.8 m/año. Este dato es discutible porque la medida de marzo pertenece a época seca y la de diciembre corresponde justo después de las lluvias. Como este pozo explota distintos niveles acuíferos (rejilla del pozo a profundidades de 33, 65, 87 y 137 metros), es posible que el agua de lluvia llegue a infiltrarse rápidamente en el acuífero superficial y por tanto la influencia de las lluvias sea considerable. Por este motivo, el resultado no es del todo fiable y debe tomarse con precauciones.

Para una buena caracterización del acuífero y su funcionamiento sería conveniente realizar medidas actualizadas de los niveles de agua de los pozos, instalar piezómetros de control repartidos por la zona y, a partir de aquí, realizar medidas anuales (como mínimo) para poder observar la evolución temporal del acuífero y poder tomar las medidas pertinentes.



Fotografía 9.3.- Mujeres lavando en el nacimiento Tres Piedras

9.2.3. Hidrodinámica del acuífero de la zona norte

En esta zona no existen pozos perforados y por este motivo se ha trabajado con los excavados. Por tanto, a diferencia de la zona central, se explota el acuífero más superficial (de todas formas, en la zona central y sur del municipio también existen pozos excavados de poca profundidad).

Se han inventariado un gran número de pozos excavados (profundidad del pozo de 10 m, en general) en materiales de cenizas volcánicas y piroclastos (talpetate). La profundidad máxima que tienen estos pozos es el nivel superior de lavas, por la dificultad de profundizar sin maquinaria de perforación en estos materiales. También se han inventariado nacimientos de agua que representan la intersección de la superficie freática con la cota topográfica. Las isofreáticas son paralelas y muy cercanas a la topografía, característico de acuíferos tan superficiales. El flujo de agua descende de los cerros y lomas a las zonas bajas y las quebradas, donde sale a la superficie (ver Mapa 19, Anexo 1)

En la zona norte se diferencian dos subcuencas superficiales, separadas por una divisoria de aguas que pasa por la hacienda Tutultepeque. De esta manera, parte de las aguas de lluvia que caen en la zona fluyen en dirección W, y otra parte, en dirección E, hacia el río Acelhuate. La posible explotación de aguas subterráneas, estaría en las partes más bajas, al este de la hacienda Tutultepeque, hacia el río Acelhuate, ya que allí se concentraría el agua proveniente del cerro Redondo (al norte) y de las lomas que quedan más al sur.

En el "Estudio hidrogeológico para introducción de agua potable en el municipio de Nejapa", se recomendó explotar un pozo en la zona del acuífero central (cerca de las Mariitas) para abastecer al norte del municipio, ya que en Tutultepeque, el caudal que podría dar un pozo perforado sería inferior a la demanda. Esto se dedujo a partir de un cálculo del balance hídrico con una subcuenca de recarga en la zona de 2.5 km².

De todas maneras, para validar estas suposiciones, es necesario una buena caracterización del área norte, mediante la realización de sondeos eléctricos verticales (para conocer la geología en profundidad y las posibilidades de agua) y sondeos de investigación (perforaciones de pequeño diámetro para alcanzar el nivel de agua).

En las Fotografías 9.4 a 9.19 se muestran algunas imágenes de estos pozos y nacimientos.



Fotografía 9.4.- Pozo n° 3. Pozo excavado a 10 m del río Acelhuate. El agua sale de las paredes de la toba volcánica. De este pozo se abastece el norte del municipio en época seca



Fotografía 9.5.- Pozos n° 3 y 4. Mujeres lavando junto al pozo n° 4.



Fotografía 9.6.- Basura acumulada alrededor de un árbol situado en el borde del río Acelhuate, cerca del pozo n° 3.



Fotografía 9.7.- Nacimiento n° 28, Las Veguitas. Situado al lado del torrente. El agua sale de la toba volcánica.



Fotografía 9.8.- Charca en el Bonete. Quebrada El Rosario. El agua proviene del Cerro Teberinto. Los nacimientos de la zona están en tobas.



Fotografía 9.9.- Pozo nº 30. En verano, el nivel de agua está a 4.20 m, pero en invierno, rebosa. Se encuentra al pie del Cerro Redondo.



Fotografía 9.10.- Nacimiento nº 37. No se seca nunca. El agua sale del basalto alterado. Caudal 0.8 l/s.



Fotografía 9.11.- Zona junto al nacimiento nº 37.



Fotografía 9.12.- Surgencia del Bonete.



Fotografía 9.13.- Surgencia del Bonete.



Fotografía 9.14.- Surgencia del Bonete.



Fotografía 9.15.- Surgencia del Bonete.



Fotografía 9.16.- Materiales de la zona del Bonete, donde sale agua. Toba volcánica y piroclastos.



Fotografía 9.17.- Surgencia del Bonete.



Fotografía 9.18.- Surgencia nº 60. Zona de Tutultepeque. El agua sale de la toba volcánica. Por encima de la toba existe una potente capa de basalto columnar.



Fotografía 9.19.- Surgencia del Bonete.

9.3. Balance hídrico

9.3.1. Límites del acuífero y condiciones de contorno

Para realizar el balance es necesario definir bien los límites del acuífero. La determinación de la recarga por infiltración de lluvia se realiza delimitando una serie de áreas caracterizadas por la predominancia de una litología y definidas por los límites del acuífero.

En el presente trabajo no se ha realizado una piezometría más actualizada de la ya existente porque no se pudo acceder a los pozos perforados, debido a que están en explotación. Además, en la zona norte del municipio no existe ningún pozo perforado para poder determinar el nivel del agua en el acuífero profundo (sí se ha podido realizar la del acuífero superficial). Por este motivo, los límites se basan en datos anteriores y en la interpretación de cómo puede ser el funcionamiento actual. Estos límites son los siguientes (ver Mapa 20, Anexo 1):

- Límite de no flujo al W limitando con el acuífero de Quezaltepeque. Corresponde a una divisoria de aguas subterráneas ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$). En este caso, la divisoria corresponde a la piezometría realizada en el 1972 por ANDA-PNUD, pero se considera válida a falta de otros datos.
- Límite de no flujo al E limitando con la zona de Apopa ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$). A falta de la piezometría se ha interpretado que esta divisoria coincidiera con el límite de la cuenca del río San Antonio y con el límite impermeable del cerro de Nejapa. Existe un trabajo de 1985 (“Evaluación de los recursos de agua subterránea en la zona noreste del volcán de San Salvador”) donde se define esta divisoria de aguas subterráneas a partir de la piezometría justo en el límite de cuenca superficial. Parece lógico establecer el límite de cuenca subterránea coincidente con la cuenca superficial, porque las rocas y depósitos volcánicos que constituyen el conjunto de las formaciones geológicas encontradas en la zona de estudio, presentan un gradiente más o menos equivalente a la superficie topográfica.
- Al sur, en la zona del volcán de San Salvador, el límite es, también, la delimitación de la cuenca del río San Antonio. Es límite de no flujo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$).
- En el norte se ha definido un límite de carga constante ($Q = \text{cte.}$). Salida de agua hacia la zona norte.
- El río San Antonio no lo consideramos un límite sino que forma parte del sistema acuífero, con condición de caudal constante.

9.3.2. Extracción de agua para abastecimiento urbano e industria

Tabla 9.4.- Extracción de agua en pozos (Fuente ANDA).

Producción pozos Nejapa	Q(l/s)	Fecha aforo
Captación Castaño 1, Nejapa.	98,93	19/04/1999
Pozo Castaño 2, Nejapa.	75,37	19/03/2001
Pozo 6, Nejapa	11,84	06/11/2000
Pozo 7, Nejapa.	0,00	02/10/2001
Pozo 8, Nejapa.	7,11	02/10/2001
Pozo 9, Nejapa.	18,26	02/10/2001
Tres Piedras, Nejapa. RB 1	3,68	21/03/2000
TOTAL	215.19	

Suponiendo que se está bombeando las 24 horas del día durante todo el año, el caudal extraído resulta ser de 6.78 Hm³/año (ver Tabla 9.4).

Extracción de la planta Embosalva (según Esquivel, 2000) = 480 m³/año = 0.00048 Hm³/año.

Extracción Mecafé: tienen un tanque de 67.5 m³ que se llena en 8 horas y esto da un caudal de 2.34 l/s. Teniendo en cuenta que extraen agua sólo los meses de noviembre, diciembre y enero, y que cada 3 días rellenan el tanque, el caudal de extracción anual es de 0.006 Hm³/año.

Total de extracción para abastecimiento e industria: **6.79 Hm³/año.**

9.3.3. Pérdidas en red de abastecimiento

Según Esquivel (2000) se considera que un 15 % del volumen de agua para abastecimiento se infiltra al acuífero debido a las pérdidas que se producen en las tuberías por deterioro de éstas.

$$0.15 \times 6.79 \text{ Hm}^3/\text{año} = 1.02 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

En últimas declaraciones realizadas por personal de ANDA, las cañerías son obsoletas, y se pierde de un 50% a un 60% del agua servida debido a las fugas. En este caso, el volumen de agua que retorna al acuífero es de:

$$0.50 \times 6.79 \text{ Hm}^3/\text{año} = 3.4 \text{ Hm}^3/\text{año} \text{ (parte de este volumen se evapotranspira).}$$

Para el cálculo del balance se utilizará un valor medio entre los dos anteriores de **2.21 Hm³/año**.

9.3.4. Infiltración por precipitación. Balance hídrico

La determinación de la escorrentía subterránea en este estudio se ha basado en el método utilizado por Duarte (1998) en el "Estudio hidrogeológico del acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador".

Se han diferenciado cinco zonas distintas dentro del área del acuífero, dependiendo del tipo de suelo y geología (Mapa 21, Anexo 1). Esta zonificación es simplificada, y servirá para aplicar el balance hídrico en cada una.

- a) Zona I. Perteneciente al área del volcán de San Salvador. Los materiales predominantes en esta zona son cenizas volcánicas y piroclastos, y lavas básicas-intermedias (basaltos y andesitas) con piroclastos, estas últimas aflorando principalmente en las quebradas. Esta zona ocupa un área de 21.26 km². Se le asocia una infiltración del 0.60 % (ANDA-PNUD, 1972).
- b) Zona II. En la parte central del municipio de Nejapa predominan las cenizas volcánicas y materiales piroclastos de la formación San Salvador, aunque en los cerros más al norte de la zona aflora la formación Cuscatlán (tobas y lavas intermedias-ácidas). Esta zona ocupa un área de 19.40 km². Se le asocia una infiltración del 0.67 % (Duarte, 1998).
- c) Zona III. Depósitos aluviales cuaternarios. Son suelos más arenosos. El área ocupada por estos materiales dentro de la cuenca del río San Antonio es de 1.44 km². Fuera de la cuenca, ocupan un área de 8.45 km², alrededor del río Acelhuate. Se le atribuye un 0.70% de infiltración (Duarte, 1998).
- d) Zona IV. Parte de ésta, se encuentra fuera de la cuenca del río San Antonio, en la zona norte del municipio. Se ha considerado que 7.67 km² forman parte de la cuenca y 16.48 km² quedan fuera. Aflora predominantemente la formación Cuscatlán, con rocas efusivas andesíticas, aunque también afloran materiales de la s₄ (Formación San

Salvador). No se sabe el índice de infiltración de estas lavas, pero al ser más antiguas que las de la Formación San Salvador se propone una infiltración del 0.40% (ANDA-PNUD, 1972).

- e) Zona V. Materiales que forman principalmente el cerro de Nejapa, pertenecientes a la Formación Bálsamo. Son lavas efusivas básicas e intermedias. Dentro de la cuenca del río San Antonio ocupan una área de 3.68 km². Se les atribuye una infiltración de 0.28 % (Duarte, 1998).

9.3.4.1. Índice de infiltración

La precipitación es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico. Para el balance hídrico interesa la *precipitación efectiva*, que es la porción de la precipitación que logra infiltrarse en el suelo y, por tanto, es disponible para ser utilizada por las plantas o bien para recargar el acuífero. Los factores que intervienen en su determinación son: intensidad de precipitación, velocidad de la intensidad de precipitación, cobertura vegetal y topografía. La precipitación efectiva se calcula multiplicando el índice de infiltración y la precipitación media mensual para una serie de años.

Para el cálculo del índice de infiltración es necesario obtener la capacidad de infiltración (f_c). Este valor se consigue mediante la realización de pruebas de infiltración en campo, cosa que no se ha podido realizar en el presente estudio. Por este motivo, se han utilizado los valores obtenidos en pruebas realizadas por Duarte (1998) con el método de Porchet (descrito en Hidrología Subterránea de Custodio-Llamas, 1996, Vol. I, pág. 345) en 3 tipos de materiales diferentes que se pueden encontrar en el área de estudio (depósitos aluviales cuaternarios, cenizas y materiales piroclásticos de la formación San Salvador y lavas terciarias). Para el resto de materiales se han usado los índices de infiltración que se obtuvieron en el Informe proyecto zona norte realizado por ANDA-PNUD en 1972.

La fórmula utilizada para encontrar el índice de infiltración de los depósitos aluviales, los materiales de s_4 y las lavas terciarias es:

$$\%I = (-2.74 \times 10^{-5} f_c + 0.2284) \ln(f_c) + 0.000159 f_c - 0.586 \quad (\text{Gunther Shosinsky})$$

donde: %I: Porcentaje que se infiltra de la precipitación

f_c : Capacidad de infiltración básica (mm/día)

Para los aluviones se obtuvo una f_c de 280 mm/d, para los materiales pertenecientes a s_4 de 0.67 mm/d y para las lavas terciarias de la formación Bálsamo de 0.28 mm/d.

Como para la formación s_4 los valores en el estudio de Duarte (1998) y en el de ANDA-PNUD son muy distintos, se realizan dos balances considerando cada uno de los índices de infiltración. De esta manera, los valores de infiltración usados en el presente estudio para cada una de las zonas son los que aparecen en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5.- Valores de infiltración

Zona	Material geológico	%I (J.R. Duarte, 1998)	%I (ANDA-PNUD, 1972)
I (*)	Lavas, cenizas y piroclásticas de la formación San Salvador		0.60
II	Cenizas volcánicas, tobas y mat. Piroclástico (s_4)	0.67	0.05
III	Depósitos aluviales cuaternarios	0.7	0.15
IV (*)	Rocas efusivas de la formación Cuscatlán		0.4
V	Rocas efusivas de la formación bálsamo	0.28	0.12

(*) Para la zona I y IV en el balance a partir de datos de %I de J.R. Duarte se usan los valores de ANDA-PNUD

9.3.4.2. Precipitación efectiva

Una vez determinados los índices de infiltración se calcula la precipitación efectiva multiplicando estos valores por la precipitación media mensual. Se dispone de los valores de precipitación de tres estaciones distintas: El Boquerón, Apopa-Insinca e Ilopango. En este estudio se pretendía utilizar los valores de El Boquerón para la zona I y los de Apopa para el resto de las zonas, teniendo en cuenta que la precipitación y la evapotranspiración en la parte alta del volcán y las de la zona central del municipio, topográficamente más baja, son distintas. Pero por falta de los datos de temperatura y de evapotranspiración potencial en éstas, se han usado los valores correspondientes a la estación de Ilopango para todas las zonas. Por tanto, la infiltración por precipitación en la zona de recarga, debe ser superior a la obtenida con los datos existentes. Los valores de precipitación media mensual para una serie larga de años son los que aparecen en las Tablas 9.6 – 9.11.

Tabla 9.6.- Estación El Boquerón

Latitud N: 13°44.1'
 Longitud W: 89°16.9'
 Elevación m.s.n.m.: 1800

MES	ene	feb	mar	abr	May	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
P (*)	4	3.5	15.8	52.9	189.3	410.9	398	389.6	443	220.9	47	14.6	2189.5

* Precipitación media mensual en mm para una serie de años de 1974-1992

Tabla 9.7.- Estación Apopa Insinca

Latitud N: 13°47.8'
 Longitud W: 89°10.8'
 Elevación m.s.n.m.: 420

MES	ene	feb	mar	abr	May	jun	Jul	ago	Sep	oct	nov	dic	Total
P (*)	3.9	3.3	12.4	45.2	176.1	270.5	291.6	315.4	306.2	171	43.8	8.5	1647.9

* Precipitación media mensual en mm para una serie de años de 1973-2002

Tabla 9.8.- Estación Ilopango

Latitud N: 13°41.9'
 Longitud W: 89°074.1'
 Elevación m.s.n.m.: 615

MES	ene	feb	mar	abr	May	jun	Jul	Ago	Sep	oct	nov	dic	total
P (*)	4	1.3	7.6	30.3	147.9	279.9	314.5	313.3	331.5	200.4	44.1	8.9	1683.7

* Precipitación media mensual en mm para una serie de años de 1969-2002

Tabla 9.9.- Precipitación efectiva según datos de %I de 1998

MES	Ene	feb	mar	Abr	may	jun	Jul	Ago	sep	oct	nov	dic
P _(Boquerón)	4	3.5	15.8	52.9	189.3	410.9	398	389.6	443	220.9	47	14.6
P _e Z-I	2.4	2.1	9.5	31.7	11	246	238.8	233.8	265.8	132.5	28.2	8.8
P _(Apopa)	3.9	3.3	12.4	45.2	176.1	270.5	291.6	315.4	306.2	171	43.8	8.5
P _e Z-II	2.6	2.2	8.3	30.3	117.9	181.2	128.4	211.3	205.2	114.6	29.3	5.7
P _e Z-III	2.7	2.3	8.7	31.6	123.3	189.3	134.1	220.8	214.3	119.7	30.7	5.9
P _e Z-IV	1.6	1.3	4.9	18.1	70.4	108.2	76.6	126.2	122.5	68.4	17.5	3.4
P _e Z-V	1.1	0.9	3.5	12.7	49.3	75.7	53.6	88.3	85.7	47.9	12.3	2.4

Tabla 9.10.- Precipitación efectiva según datos de %I de 1972

MES	ene	feb	mar	Abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
P _(boqueron)	4	3.5	15.8	52.9	189.3	410.9	398	389.6	443	220.9	47	14.6
P _e Z-I	2.4	2.1	9.5	31.7	11	246	238.8	233.8	265.8	132.5	28.2	8.8
P _(Apopa)	3.9	3.3	12.4	45.2	176.1	270.5	291.6	315.4	306.2	171	43.8	8.5
P _e Z-II	0.2	0.2	0.6	2.3	8.8	13.5	9.6	15.8	15.3	8.5	2.2	0.4
P _e Z-III	0.6	0.5	1.8	6.8	26.4	40.6	28.7	47.3	45.9	25.6	6.6	1.3
P _e Z-IV	1.6	1.3	4.9	18.1	70.4	108.2	76.6	126.2	122.5	68.4	17.5	3.4
P _e Z-V	0.5	0.4	1.5	5.4	21.1	32.5	22.9	37.8	36.7	20.5	5.2	1

Tabla 9.11.- Precipitación efectiva con datos estación de Ilopango

MES	ene	feb	mar	Abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
P _(Ilopango)	4	1.3	7.6	30.3	147.9	279.9	314.5	313.3	331.5	200.4	44.1	8.9
P _e Z-I (Duarte)	2.40	0.78	4.56	18.18	88.74	167.94	188.70	187.98	198.90	120.24	26.46	5.34
P _e Z-II (Duarte)	2.67	0.87	5.08	20.24	98.78	186.94	210.05	209.25	221.41	133.85	29.45	5.94
P _e Z-II (ANDA)	0.20	0.07	0.38	1.52	7.40	14.00	15.73	15.67	16.58	10.02	2.21	0.45
P _e Z-III (Duarte)	2.81	0.91	5.34	21.28	103.87	196.57	220.87	220.02	232.80	140.74	30.97	6.25
P _e Z-III (ANDA)	0.60	0.20	1.14	4.55	22.19	41.99	47.18	47.00	49.73	30.06	6.62	1.34
P _e Z-IV (Duarte)	1.60	0.52	3.04	12.12	59.16	111.96	125.80	125.32	132.60	80.16	17.64	3.56
P _e Z-V (Duarte)	1.14	0.37	2.17	8.66	42.29	80.02	89.92	89.57	94.78	57.29	12.61	2.54
P _e Z-V (ANDA)	0.48	0.16	0.91	3.64	17.75	33.59	37.74	37.60	39.78	24.05	5.29	1.07

9.3.4.3. Evapotranspiración

Es la suma de la evaporación y la transpiración y, por tanto, sólo es aplicable correctamente a una determinada área del terreno cubierta por vegetación. Cuando ésta no existe, sólo se habla de evaporación. Este valor depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta. De esta manera, Thornthwaite (1948) introduce el término de evapotranspiración potencial (ETP), que es la que se daría si hubiera un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Será, por tanto, un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración, y que se conoce con el nombre de evapotranspiración real (ETR). La diferencia entre ETP y ETR es la demanda de agua para riego (Custodio y Llamas, 1996).

Los datos de evapotranspiración potencial que se utilizan en el balance hídrico corresponden a promedios mensuales del período 1970-2001 registrados en la estación del aeropuerto de Ilopango y calculados por el método de Hargreaves (Tabla 9.12.).

Tabla 9.12.- Estación Ilopango

Latitud N: 13°41.9'
 Longitud W: 89°074.1'
 Elevación m.s.n.m.: 615

MES	Ene	feb	mar	abr	may	jun	Jul	Ago	sep	oct	nov	dic	Total
ETP	133	135	167	165	158	141	152	148	129	133	123	124	1708

9.3.4.4. Contenido de humedad del suelo

Este término se utiliza para referirse al agua retenida por el suelo y, así, distinguirla del agua subterránea propiamente dicha. Se puede determinar en laboratorio, pero es aconsejable hacerlo en el campo. Los valores de contenido de humedad del suelo característicos son la capacidad de campo (contenido de humedad de un suelo que ha perdido su agua gravífica) y el punto de marchitez permanente (grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno y en consecuencia las plantas no pueden extraerla). El agua utilizable por las plantas es la que queda restando la capacidad de campo del punto de marchitez permanente (Custodio y Llamas, 1996).

En el presente trabajo no se han podido medir estos valores, y por este motivo se vuelven a usar los valores del 1998 para las zonas II, III y V. En las zonas I y IV se asigna el mismo valor que en la zona V por falta de datos.

Para encontrar la humedad en cm. se usa la expresión de Rodríguez (1997), obteniéndose los valores que figuran en la Tabla 9.13.

$$\text{Humedad (cm.)} = \frac{\text{humedad(\%)} \times \text{Prof. radicular(cm)} \times \text{densidad Suelo(g/cm}^3\text{)}}{100}$$

Tabla 9.13.- Valores de la capacidad de campo y punto de marchitez.

Zona	Prof. raíces (cm.)	Densidad suelo (g/cm ³)	CC(%)	CC(cm.)	PMP(%)	PMP(cm.)
II	15	1.08	15.3	2.51	7.01	1.13
III	15	1.21	18.08	3.28	8.54	1.55
V	50	1.40	19.27	13.48	10.85	5.89

CC: capacidad de campo

PMP: punto de marchitez permanente

9.3.4.5. Cálculo de la recarga

El balance hídrico utilizado se basa en el método de Penmann y Grindley, considerando una variación lineal de la evapotranspiración potencial con respecto a la evapotranspiración real. Esta relación establece que a medida que el contenido de humedad del suelo se aproxima a su punto de marchitez, se incrementa la dificultad de las plantas para obtener agua del suelo a través de las raíces, por lo que éstas cierran sus estomas con el fin de guardar humedad, es decir, existe menos evapotranspiración (Duarte, 1998).

La implementación del balance hídrico se inicia en el mes de abril (estación seca), porque en este mes, la humedad inicial del suelo coincide o se aproxima al punto de marchitez permanente.

En las Tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 (Anexo 11) se presentan los valores de recarga para cada una de las zonas. Los resultados obtenidos, utilizando los índices de infiltración del estudio de 1998, establecen que la totalidad de la recarga se produce en las zonas I, II y III, con valores de recarga de 144.64, 251.14 y 302.67 mm/año respectivamente, que corresponden a las lavas cuaternarias de la s_2 , a las cenizas volcánicas de s_4 y a los depósitos aluviales en la zona del río San Antonio. En cambio, en las zonas IV y V, la recarga es nula (baja permeabilidad de las lavas terciarias y poca infiltración de los suelos que tienen en su superficie). No obstante, el valor de infiltración nulo en la zona IV es discutible. Sería necesario hacer un análisis en detalle de esta zona.

En el balance realizado con los índices de infiltración de ANDA-PNUD de 1972, los resultados son muy distintos, ya que la recarga sólo se produce en la zona I (lavas y cenizas del volcán de San Salvador), dando un valor de 144.64 mm/año y siendo nula en el resto de las zonas.

El volumen total de recarga se calcula multiplicando la infiltración en mm/año por la superficie ocupada por cada tipo de material. Los valores obtenidos son:

$$\text{Zona-I} = 0.14464 \text{ Hm}^3/\text{km}^2 \times \text{año} \times 21.26 \text{ km}^2 = 3.07 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\text{Zona-II} = 0.25114 \text{ Hm}^3/\text{km}^2 \times \text{año} \times 19.40 \text{ km}^2 = 4.87 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\text{Zona-III} = 0.30267 \text{ Hm}^3/\text{km}^2 \times \text{año} \times 1.44 \text{ km}^2 = 0.44 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\text{Zona-IV} = 0 \text{ Hm}^3/\text{año} \text{ (parte de la zona está situada fuera de la cuenca del río San Antonio).}$$

$$\text{Zona-V} = 0 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\text{Volumen total Duarte} = \mathbf{8.38 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

$$\text{Volumen total ANDA} = \mathbf{3.07 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

El índice de infiltración es el valor determinante para obtener los resultados de la recarga. Aunque en las zonas I, IV y V usemos el mismo valor de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad del suelo y profundidad de las raíces, la recarga en I es alta, siendo, en cambio, nula en IV y V. Parece lógico considerar que los piroclastos y los aluviales tienen un índice de infiltración elevado, y no considerarlo nulo como en el trabajo realizado por ANDA-PNUD en 1972. De esta manera, se incrementa el volumen de agua infiltrada dentro de la cuenca del río San Antonio, en 5.31 Hm³/año. Puede ser que este valor

esté sobreestimado, por falta de datos de infiltración en la zona. Más adelante se discute este balance.

9.3.5. Salida por límite de caudal constante

El límite norte del acuífero de Nejapa se considera de caudal constante, es decir, que sale un volumen de agua hacia la zona situada fuera de la cuenca del río San Antonio.

El caudal de agua subterránea que descarga al norte, se calcula a partir de la piezometría.

Para su determinación se ha utilizado la Ley de Darcy (1856), válida considerando un flujo laminar. Ésta establece que la velocidad de flujo (v_d) es directamente proporcional al gradiente hidráulico (i) y a la conductividad hidráulica (k):

$$v = k \cdot i = -k \cdot \frac{dh}{ds}$$

Considerando que la transmisividad (T) es el producto de la permeabilidad hidráulica por el espesor saturado, el caudal que circula por una sección determinada de longitud L será:

$$Q = T \cdot i \cdot L$$

Para eso, se ha definido una sección perpendicular a las líneas de flujo de agua subterránea (Mapa 20, Anexo 1). Los límites de esta línea trazada con una longitud de 4.000 m. son: la divisoria de aguas subterráneas al NW (condición de no flujo, no entra ni sale agua por este límite) y el límite impermeable que forma el cerro de Nejapa (condición de no flujo). El gradiente hidráulico se ha calculado utilizando el mapa de isopiezas del año 2000, dando un valor de 0.008. El valor de transmisividad es difícil de obtener debido a varios factores, entre ellos, que los pozos de la zona seguramente no son totalmente penetrantes y, por tanto, el valor de transmisividad de los ensayos de bombeo es inferior al del acuífero, o bien es una mezcla de transmisividades de los diferentes mantos atravesados. Además, el rango de valores que se han obtenido es muy variable. Se han utilizado tres valores de transmisividad para comparar los resultados.

Utilizando un valor de $T = 200 \text{ m}^2/\text{día}$, que es el valor medio de los pozos más cercanos a la sección de escurrimiento, obtenemos un caudal de:

$$Q = 200 \text{ m}^2/\text{d} \times 0.008 \times 4000 \text{ m} = 6400 \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{2.3 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

Según ANDA-PNUD (1972), la transmisividad media de los pozos que explotan el nivel de lavas cuaternarias es de 1500 m²/día. Teniendo en cuenta este valor, el caudal que pasaría por la sección es:

$$Q = 1500 \text{ m}^2/\text{d} \times 0.008 \times 4000 \text{ m} = 4800 \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{17.52 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

Si se usa el valor de transmisividad medio de todos los pozos (Esquivel, 2000) de 586 m²/día:

$$Q = 586 \text{ m}^2/\text{d} \times 0.008 \times 4000 \text{ m} = 18752 \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{6.8 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

Este caudal de salida que fluye a través de la sección, también se puede calcular con el balance hídrico, pudiendo, así, compararlo con los resultados obtenidos hasta ahora. Esto se realiza en el Apartado 9.3.7.

9.3.6. Salida por el río

El río San Antonio es efluente según se puede ver en el trazado de las isopiezas, es decir, recibe agua procedente del acuífero. Por este motivo, se tiene que considerar un caudal de salida del acuífero al río, que corresponde al flujo base del mismo (volumen de agua que lleva en período seco). Este caudal se puede medir mediante aforamiento del río en distintos tramos. Estas medidas no ha sido posible realizarlas, por tanto, su determinación se realiza en base a la piezometría. Calcular el caudal con este método no da resultados muy fiables, debido a que se necesitarían datos de permeabilidad hidráulica del material del lecho del río, entre otros. El valor obtenido con este procedimiento, considerando una $T=20 \text{ m}^2/\text{d}$ (ya que en el acuífero superficial la transmisividad se considera más baja) es de **0.017 Hm³/año**. Este valor también se puede obtener como incógnita del balance hídrico. Esto se muestra en el siguiente apartado.

9.3.7. Balance de masas final

Entradas:

- Infiltración lluvia = 8.38 Hm³/año
- Retorno de riego (no valor)
- Pérdida de red de alcantarillado = 2.21 Hm³/año

Salidas:

- Bombeos = 6.79 Hm³/año
- Salida al río = 0.017 Hm³/año
- Salidas a otro acuífero

Entradas - Salidas = Variación del almacenamiento

En un año hidrológico el balance es nulo y, por tanto, las entradas se igualan a las salidas (Figura 9.2).

$$8.38 + 2.21 - 6.79 - 0.017 - Q_{\text{salida aq}} = 0$$

$$Q_{\text{salida aq}} = 3.78 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

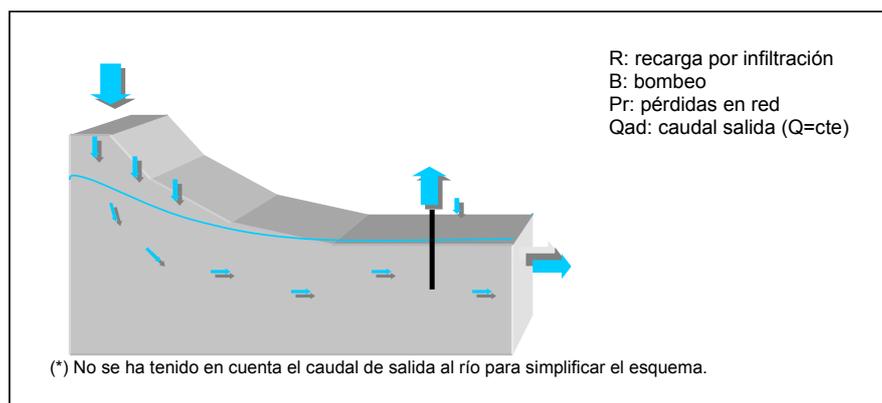


Figura 9.2- Esquema del balance de masas (Hm³/año)

Con formato: Sangría:
Primera línea: 0 cm

Según este balance, el caudal de agua que fluye hacia el acuífero situado en la zona norte es de 3.85 Hm³/año. Como este caudal también se puede calcular a partir de la piezometría de la zona como se ha hecho en el apartado anterior, deducimos que el valor de transmisividad en la zona es aproximadamente de 325 m²/día, dando un caudal de descarga de 3.79 Hm³/año (valor que más se aproxima al calculado con el balance).

El caudal de descarga o recarga del río se puede obtener también del balance, considerándolo como incógnita. De esta manera, el resultado es:

$$8.38+2.21-6.79-3.79- Q_{\text{salida río}} = 0$$

$$Q_{\text{salida río}} = 0.01 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

Este valor es parecido al obtenido en el apartado anterior. En cualquier caso, como se ha comentado, la mejor manera de obtener el caudal de salida al río desde el acuífero es aforando el río.

9.3.8. Discusión sobre el balance

En el balance hídrico, para el cálculo de la cantidad de agua de lluvia que se infiltra, se consideró que todo el área central formada por el material de la formación s_4 y el aluvial cuaternario, tenía un índice de infiltración elevado. Aún así, en esta zona de estudio, existe un paquete de arcillas potente, entre las coladas basálticas-piroclastos superficiales y los acuíferos más profundos. Esto impediría la percolación del agua de lluvia al nivel acuífero principal. La conexión hidráulica sólo sería posible por la presencia de fracturas que comunicasen ambos acuíferos. Teniendo en cuenta que el nivel piezométrico del acuífero superior está por encima del nivel piezométrico del acuífero profundo, se produciría una circulación de agua de los niveles superficiales a los profundos.

Para determinar la presencia de fallas que permitan esta conexión hidráulica, sería necesario obtener datos de niveles piezométricos en distintos pozos, medidos durante un período de tiempo, que permitieran relacionarlos con la respuesta a las lluvias. Por ejemplo, si en un pozo que explota el acuífero profundo situado por debajo de las arcillas aumenta rápidamente su nivel piezométrico varios metros en período de lluvia, podría pensarse en una conexión hidráulica a través de fallas entre el acuífero superficial y el profundo. De esta manera, la recarga es rápida, pero la descarga se produciría lentamente durante el resto del año. Debido a que no se dispone de estos datos, no es posible realizar hipótesis. Para ello, sería necesario instalar piezómetros de control y pluviómetros en la zona.

En este sentido puede ser que el balance realizado con valores altos de infiltración en las cenizas, piroclastos y aluviales esté sobreestimado, y que fuera más correcto considerar la infiltración sólo en la zona del volcán como se muestra a continuación:

Entradas:

- Infiltración lluvia = $3.07 \text{ Hm}^3/\text{año}$
- Pérdida de red de alcantarillado = $2.21 \text{ Hm}^3/\text{año}$

Salidas:

- Bombeos = 6.79 Hm³/año
- salidas a otro acuífero ?
- salida al río = 0.017 Hm³/año

Entradas-Salidas = variación del almacenamiento

En un año hidrológico el balance es nulo y, por tanto, las entradas son iguales a las salidas (Figura 9.3.):

$$3.07 + 2.21 - 6.79 - 0.017 - Q_{\text{salida aq}} = 0$$

$$Q_{\text{salida aq}} = -1.53 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

Esto supondría que no sale agua del acuífero de Nejapa a la zona norte, sino al revés, y en función de la recarga de esta zona y de los recursos hídricos que disponga, se estaría produciendo un vaciado del reservorio de agua subterránea, no sólo en el acuífero que se está explotando, sino también en el de la zona norte.

Se considera más acertada esta última hipótesis, aunque el valor de vaciado podría no ser tan elevado porque el paquete de arcillas no existe en toda la zona, y porque cabe la posibilidad de una conexión por fallas entre ambos acuíferos.

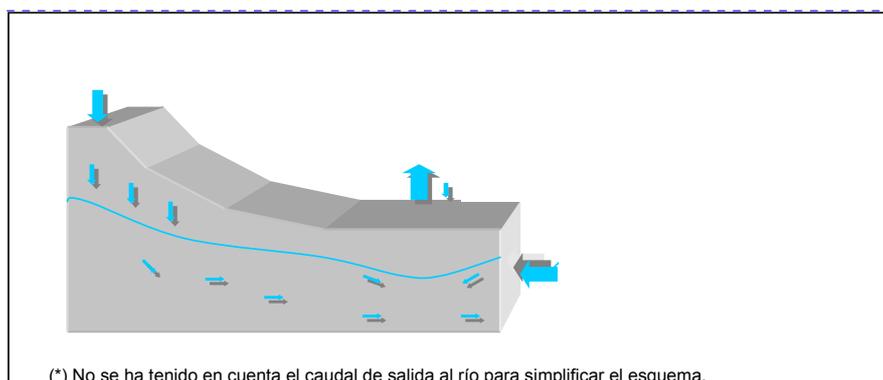


Figura 9.3.- Esquema del balance de masas (Hm³/año)

Eliminado: <sp>

Con formato: Sangría:
Primera línea: 0 cm

También se ha considerado que en la zona IV, formación Cuscatlán (aflorando hacia el norte del municipio), no se produce infiltración de agua de lluvia. Sobre estos materiales no se tienen datos de capacidad de infiltración. Sin embargo, toda esta zona está fracturada, como puede verse en el mapa geológico, y podría haber conexión entre la superficie y las zonas más profundas.

9.4. HIDROQUÍMICA

9.4.1. Composición general del agua subterránea

En el agua subterránea natural, las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Algunos de estos iones están casi siempre presentes, y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos comunes en todas las muestras. A estos se les llama *iones fundamentales* y son los que figuran en la Tabla 9.14.

Tabla 9.14.- Iones fundamentales.

Iones fundamentales			
Aniones		Cationes	
Cloruro	Cl ⁻	Sodio	Na ⁺
Sulfato	SO ₄ ⁻²	Calcio	Ca ⁺
Bicarbonato	CO ₃ H ⁻	Magnesio	Mg ⁺

Frecuentemente los aniones nitrato (NO₃⁻) y carbonato (CO₃⁻²) y el catión potasio (K⁺) se incluyen dentro de los iones fundamentales aun cuando en general su proporción es pequeña. También se puede incluir el ión ferroso (Fe⁺⁺).

Como gases más comunes que se encuentran en las aguas subterráneas podemos señalar el anhídrido carbónico (CO₂) y el oxígeno disuelto (O₂).

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran en proporciones más pequeñas (menos del 1 % del contenido iónico total) y se llaman *iones menores*. Los iones menores más importantes son: NO₃⁻, CO₃⁻², K⁺, Fe⁺⁺, NO₂⁻, F⁻, NH₄⁺ y Sr⁺⁺, sus concentraciones están entre 0.01 y 10 ppm.

Se le llama *elementos traza* a aquellos que aunque están presentes, son difícilmente medibles por medios químicos usuales. Los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., son en general, elementos traza (<0.0001 ppm).

Todo lo expuesto se refiere a aguas naturales más frecuentes. En aguas subterráneas contaminadas, esto puede cambiar notablemente (Custodio y Llamas, 1996).

9.4.2. Hidroquímica de las aguas subterráneas del municipio de Nejapa

La calidad de las aguas subterráneas del municipio de Nejapa se ha determinado en base a diferentes datos:

- Serie de análisis realizados en el período 1997 a 2001 por ANDA (unidad de descentralización y reconstrucción UDES/ANDA) en los pozos y plantas de bombeo (P.B.): P.B. Tres piedras, P.B. El Castaño II. P.B. El Calvario, captación El Castillo, Captación El Castaño, Pozo n°7, pozo n°8, pozo n°9, Estación Central, Pozo excavado María Cuellar (el Anonal), manantial El Tanque (María Lucía Cuellar, el Anonal), pozo perforado Plansabar (cantón Camotepeque, Hda. Mapilapa), pozo n°6 (cantón El Conacaste). Se dispone de análisis físico-químico y bacteriológico. En el Anexo 12 se presentan las fichas de los análisis y los gráficos de evolución de algunos elementos en el tiempo.
- Análisis obtenidos del estudio "Investigación aplicada sobre el impacto ambiental de contaminación del agua en los ríos Sucio, Acelhuate y Cuaya" (1997) y que fueron realizados en el año 1996. Se dispone de análisis físico-químicos. En éstos se observa que muchos pozos exceden la norma salvadoreña en los valores de pH, Pb, Fe, Mn, Ba y Cd.
- Campaña de muestreo de puntos de agua efectuada en este estudio. Se han muestreado los pozos de Mecafé, Pozo n°9, Pozo n°4, Ingenio el Castaño, Pozo n°7 y Nacimiento Tres Piedras.

9.4.2.1. Características físico-químicas del agua subterránea de Nejapa

En la Tabla 9.15. se muestran los últimos análisis realizados en los pozos de ANDA.

Tabla 9.15.- Análisis realizados en los pozos de ANDA.

POZOS	CE ($\mu\text{S/cm.}$)	Ph (uph)	Cl ⁻ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
PB Tres Piedras (15/03/01)	247	6.79	6.36	8.97	13	21.95	85.03
PB El Castaño II (13/09/01)	261	6.93	9.13	9.59	14	26.48	95.83
PB Calvario (15/10/01)			7.19	11.22	13	16.88	75.35
Pozo El Castillo (3/07/02)	373	6.67	15.98	27.56		33.6	131.80
PB El Castaño I (20/11/01)	217	6.86	5.4	10.25	19	17.42	79.36
Pozo 7 (15/02/00)	270	6.84	6.02	16.47	7	24.04	121
Pozo 8 (20/11/01)	247	7.14	2.82	12.61	16	19.95	120.34
Pozo 9 (20/11/01)	244	7	6.19	11.51	18	22.09	108.54
Estación central (6/11/01)	728	6.71	19.53	45.95	106	56.24	284.93
María L. Cuellar (15/10/99)	280	6	5.57	9.86	75	23.86	59.5
Manantial el Tanque (6/10/99)	290	6.66	10.22	7.93	31	16.89	64.26
Mapilapa (17/03/00)	270	7.39	2.32	11.99	3	21.8	158.46
Pozo 6 (24/05/00)	260	6.65	6.94	8.43		21.38	99.68

Fuente: Administración de acueductos y alcantarillados (ANDA). No se dispone de las coordenadas de los pozos.

El agua relacionada con terrenos basálticos, en general, es poco salina (menos aún en granitos). La mayoría del Na, Ca y Mg pasan al agua, mientras que el K es retenido y el Fe es precipitado. En general, la sílice no sobrepasa los 60 ppm. El Cl⁻ y el SO₄⁻² son escasos, a no ser que existan sulfuros metálicos que por oxidación aporten este último.

Observando los valores de los iones fundamentales en la tabla se define una agua bicarbonatada cálcica, aunque su valor de calcio no es elevado (no se dispone de los análisis para el ion sodio, para poder definir correctamente la naturaleza geoquímica de esta agua, pero es probable que abunde por ataque a feldespatos, feldespatoides y otros silicatos). En aguas dulces el ión bicarbonato puede variar entre 50 y 350 ppm. El equilibrio entre el pH, CO₂, CO₃H⁻² y CO₃⁻² es determinante de la corrosividad o la incrustabilidad del agua. Es un agua de dureza ligera a moderada, porque su contenido en CO₃Ca está casi siempre por encima de las 100 ppm. También es agresiva, ya que en general el pH es inferior a 7. El pH está, en su mayoría, dentro del límite recomendado, a excepción del pozo de María L. Cuellar que tiene un pH por debajo del límite admisible.

Respecto al ión cloruro, su concentración normal en aguas dulces varía entre 10 y 250 ppm. Si pasa de 300 ppm comunicaría un sabor salado al agua. En las aguas de Nejapa, la concentración es baja.

La conductividad eléctrica en agua dulce a 18°C es de 100 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La CE crece un 2%/ °C al aumentar la temperatura. También crece con el contenido de iones disueltos. En este caso, la CE es característica de un agua muy dulce.

El ión sulfato presenta valores muy bajos dentro del rango de aguas dulces (entre 2 y 150 ppm).

El ión calcio y magnesio presentan valores bajos dentro del rango de las aguas dulces (entre 10 y 250 ppm para el calcio y 1 a 100 ppm para el magnesio).

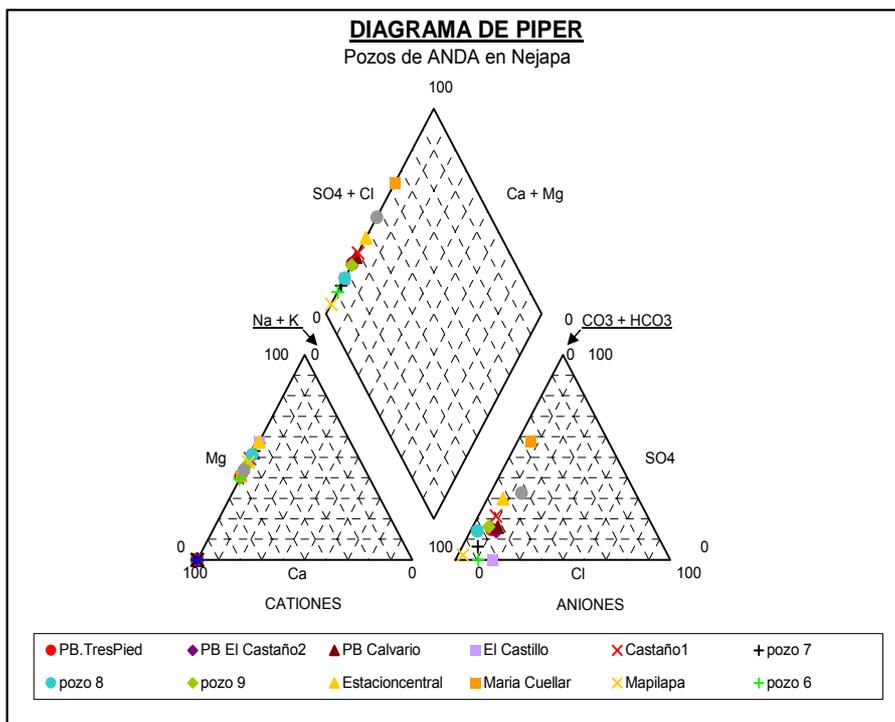
El contenido en sílice, aunque está dentro del rango permitido para el consumo, es bastante elevado, ya que en la mayoría de aguas naturales su contenido varía entre 1 y 40 ppm, pudiendo llegar a 100 ppm, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. Este alto contenido en sílice se debe a la naturaleza del terreno por el que circula el agua (rocas basálticas-efusivas). El mayor inconveniente del sílice está relacionado con su incrustabilidad en calderas y calentadores.

Las aguas subterráneas normalmente solo tienen disuelto Fe^{++} (a veces FeOH^+), pero a pH elevado casi no existe hierro disuelto. Las concentraciones normales en aguas naturales están entre 0 y 10 ppm, siendo de menos de 0.5 en aguas aireadas. En los análisis que se dispone de los pozos de ANDA el contenido en hierro está dentro de la norma (0.05-0.3 ppm) pero en muchos casos en el límite permitido o recomendado. Su nocividad se manifiesta en la aparición de manchas de herrumbre y depósitos orgánicos fangosos con $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Puede ocasionar incrustaciones duras. En general, más de 0.5 ppm son nocivas o molestas.

En el resto de los pozos, los análisis están dentro de los límites, excepto en la planta de bombeo Tres Piedras que sobrepasa en la turbiedad (123 mg/l SiO_2), en el pozo 9 con una turbiedad elevada (122 mg/l SiO_2) y en el pozo 7 con un pH bajo (6.49 uph).

Se han representado los diagramas de Piper y Shoeller-Bercaloff, para definir geoquímicamente las aguas subterráneas (Figura 9.4. y Figura 9.5.). En Piper se observa que todas las muestras quedan agrupadas más o menos en una misma zona del gráfico, quedando representadas en el campo más probable de los análisis de aguas potables, excepto en el pozo de María Cuellar. La composición de las aguas, como ya se dijo, es bicarbonatada cálcico-magnésica. No se pueden estudiar bien las relaciones entre las muestras porque faltan elementos por analizar (K y Na).

Figura 9.4.- Diagrama de Piper.

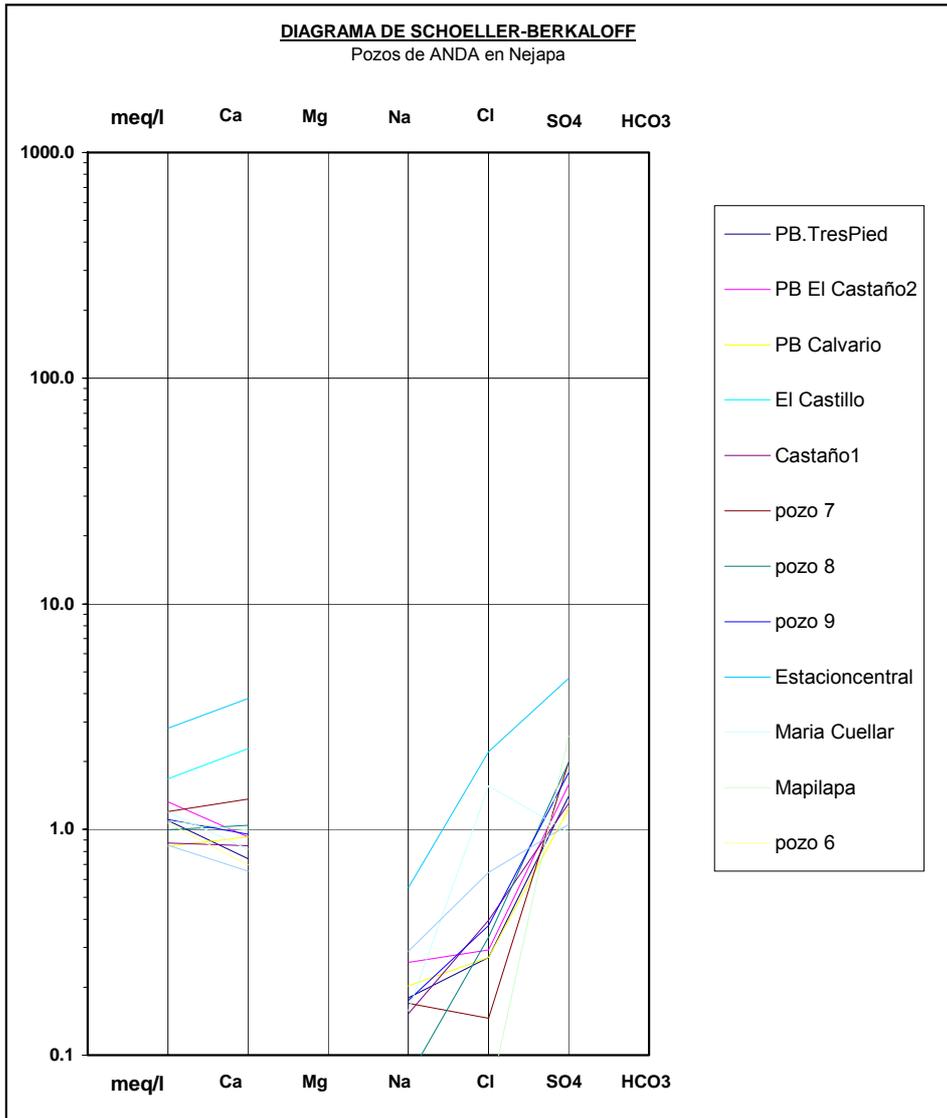


En la Tabla 9.16. se muestran los resultados de los análisis realizados a siete pozos muestreados el día 7 de abril de 2003. Los resultados obtenidos están dentro de la norma CONACYT NSO 13.07.01.98 y la normativa de la OMS.

Tabla 9.16.- Resultados de los análisis realizados.

POZO	Alcalinidad total CaCO ₃ (mg/l)	Bicarbonato H ₂ CO ₃ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cloruros (mg/l)	Sulfatos (mg/l)	Dureza CaCO ₃ (mg/l)	Flúor (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	CE (μS/cm)	pH
Nacimiento 3 Piedras	0.0	0	6	1	12.096	0.1334	142.19	0.17	0.0	-	231.71	6.79
P-7	0.0	0.0	7	1.0	12.096	0.1314	172.95	0.15	0.0	0.0	260.85	6.78
Mecafe	0.0	0.0	6	1.0	12.096	0.1920	139.46	0.22	0.0	0.0	227.55	6.45
P-9	0.0	0.0	8	1.0	12.096	0.1826	183.21	0.14	0.0	0.0	252.52	6.48
P-4	0.0	0.0	9	1.0	12.096	0.1232	177.74	0.15	0.0	0.0	260.95	6.70
Ing.Castaño	0.0	0.0	6	1.0	12.096	0.1437	144.93	0.16	0.0	0.0	228.93	6.47
P-7	0.0	0.0	7	1.0	18.143	0.821	167.49	0.16	0.0	0.0	238.65	6.50

Figura 9.5.- Diagrama de Shoeller-Bercaloff.



En el pozo n°7 y nacimiento Tres Piedras se analizó la cantidad en hierro, níquel, manganeso y cobre. No se encontraron restos de estos elementos.

Datos de estudios anteriores

Los resultados de los análisis realizados en el estudio de Esquivel (1997) pueden observarse en la Tabla 9.17.

Tabla 9.17.- Análisis del estudio de Esquivel (1997).

Código de muestra	AP-12	AP-13	AP-14	AP-15	AP-16	AP-17	AP-18	AP-19
Fecha de muestreo	30/09/96	30/09/96	30/09/96	30/09/96	22/11/96	22/11/96	22/11/96	10/12/96
PARÁMETRO								
T°C	25.6	27.9	26.5	25	28	27	27	27
Ph	2.56*	4.75*	4.64*	5*	5-6*	6.5-7	6	5.8*
Turbidez, NTU	3.75	1.36	0.86	1.33				
Sólidos Totales	1.95	0.51	2.76	0.22				508
Cianuro (mg/l)	0.003	0.001	0.001	0				0.001
Boro (mg/l)	0	0	0	0				0.3
Cromo VI, mg/l	0	0	0	0				0
Aluminio (mg/l)	0	0	0	0				0
Plomo (mg/l)	0.15*	0.05	0.025	0.081	0.18	0.04	0.12*	0.018
Zinc (mg/l)	0.05	0.35	0.2	0.45				0.3
cloruros (mg/l)	52	1.37	17.7	5.8				10.7
Nitratos (mg/l)	2.2	9.24	13.2	14.52				3.9
Hierro (mg/l)	2.96*	1	0.55*	0.4*				0.3*
Manganeso (mg/l)	28.1*	0	0	0				0
Fluoruros (mg/l)		0.79	0.55	0.47				0.4
Níquel (mg/l)	0.26	4.19	3.66	0.39				0.315
Cobre (mg/l)	0.2	0.3	0.1	0.2				0.03
Coliformes totales	500	20	<20	<20				>23
Coliformes fecales	500	20	<20	<20				>23
Bario (mg/l)	3.7*	0.9*	6	6*				6*
Cadmio (mg/l)	0.088*	0.038*	0.006*	0.013*	0.09*	0.015*	0.05*	0.006*
Nitrógeno amoniacal					0.00029	0.000102	0.000483	36.35

* Valores fuera de la norma

- AP-12: Pozos al sur del relleno sanitario, Suchinanguito, Nejapa.
- AP-13: Pozo ANDA, cantón Galera Quemada, Nejapa
- AP-14: Pozo ANDA, cantón El Cambio, Nejapa
- AP-15: Pozo ANDA, El Playón, Nejapa
- AP-16: Pozo Colonia Cuesta Blanca, Nejapa
- AP-17: Pozo Colonia Petacones, Nejapa
- AP-18: Pozo de Jesús Fuentes, norte del relleno, Nejapa
- AP-19: Pozo línea de tren, 200 m relleno sanitario, cantón Suchinanguito, Nejapa

9.4.2.2. Características bacteriológicas del agua subterránea de Nejapa

Los resultados de los últimos análisis realizados en distintos pozos de ANDA pueden verse en la Tabla 9.18. Método de análisis: tubos múltiples.

Tabla 9.18.- Análisis realizados en distintos pozos de ANDA.

PARÁMETRO	3 piedras 22/6/00	Castaña 20/11/01	Castaña 2 7/12/01	Pozo 7 22/6/00	Pozo 8 20/11/01	El calvario 7/12/01	Lotif. Castillo 3/7/02	Pozo perforado 16/3/00	Pozo 6 22/6/00	Estación central 4/9/98	El Calvario 7/12/01
Cloro	0.8	Cruda	2.5	cruda	Cruda	0.5	Cruda	cruda	Cruda	1.1	0.5
Colif.totales (NMP)	<2.2	8	<1.1	<3	<2	<1.1	13	2.4E ⁺⁵	240	<2.2	<1.1
Colif.fecales (NMP)	<2.2	<2	<1.1	<3	<2	<1.1	2	1100	<3	<2.2	<1.1
Turbiedad	0.16	0.94	0.14	0.2	0.15	0.17	0.34	0.29	0.29	0.52	0.17

(*) Fuente: Administración de acueductos y alcantarillados (ANDA).

En el Anexo 12 se presentan las fichas de análisis y los gráficos de evolución de estos contaminantes.

9.4.2.3. Potabilidad del agua

La potabilidad del agua se determina en base a criterios químicos y bacteriológicos. Ambos criterios pueden ser excluyentes por separado, aunque los efectos sobre el hombre sean diferentes: casi inmediatos en aguas bacteriológicamente impotables, y diferidos en las químicamente no potables.

A continuación se expone unas tablas de comparación en reglamentaciones de aguas potable (valores en ppm):

Características físico-químicas

En la Tabla 9.19. se muestra una comparativa entre diferentes reglamentaciones de aguas potables (valores en ppm).

Características bacteriológicas

Los criterios de calidad bacteriológica del agua se basan en la determinación de aquellos microorganismos que puedan afectar directamente a la salud del hombre o que, por su presencia, puedan señalar la posible existencia de otros (Custodio y Llamas, 1976).

Tabla 9.19.- Comparativa entre diferentes reglamentaciones.

PARÁMETROS	O.M.S ⁽¹⁾		ESPAÑA ⁽²⁾		NORMA SALVADOREÑA ⁽³⁾
	Conveniente	Admisible	Conveniente	Admisible	
Arsénico (As)		0.2		0.2	
Bario (Ba)		1.00			
Cadmio (Cd)		0.01			
Carbón extraído con cloroformo (CCE)	0.2	0.5			
Cianuro (CN)		0.01		0.01	
Cloruros (Cl)	200	600	250	350	250
Cobre (Cu)	1.0	1.5		1.5	1
Color (pt-Co)	5	50	5	15	
Cromo (Cr +6)		0.05		0.05	
Detergentes (ABS)	0.5	1		ND	
DQO (O ₂)			3	3	
Dureza (CaCO ₃)					400
Fenoles	0.001	0.002		0.001	
Fluoruro (F)	0.5 a 1	1.5	1	1.5	1.5
Hierro (Fe)	0.3	1	0.2(Fe+Mn)	0.3(Fe+Mn)	0.3
Magnesio (Mg)	50	150	50	100	50
Manganeso (Mn)	0.1	0.5			0.1
Nitratos (NO ₃)		45	30	30	45
+ Olor	Aceptable		Inodora	Inodora	
PH a 18°C	7-8.5	6.5-9.2	7-8.5	6.5-9.2	6-8.5
Plata (Ag)					
Plomo (Pb)		0.1		0.1	
Residuo seco	500	1500	750	1500	
Sabor	Aceptable				
Selenio		0.05			
Sulfatos (SO ₄)	200	400			250
Turbidez (SiO ₂)	5	25			1-5
Zinc (Zn)	5.0	15			

(1) O.M.S.- International Standards for drinking-water. Ginebra, 1963.

(2) Código alimentario español, 1967.

(3) Norma CONACYT NSO 13.07.01.98.

En la normativa de la O.M.S., la determinación del grupo coliforme como indicador bacteriológico y el MPN (número más probable) para valorar su intensidad, responden a esas necesidades.

Para fijar los límites correspondientes al MPN en 100 ml., se distinguen dos casos, según que el agua problema haya sido tratada o no previamente.

- En agua tratada no deberán encontrarse bacterias coliformes en el 90% de las muestras examinadas en un año o bien el MPN debe ser menor que 1. Simultáneamente ninguna muestra tendrá un MPN superior a 10, ni se sucederán muestras consecutivas con un MPN comprendido entre 8 y 10, en cuyo caso deberán analizarse un número mayor de ellas.
- En aguas sin tratamiento, el MPN será menor de 10 en el 90% de las muestras examinadas en un año. Ninguna de ellas superará el índice de 20. Las bacterias coliformes fecales serán menos del 40% del número de microorganismos coliformes mostrados por el MPN. No se permite un MPN mayor de 15 en muestras consecutivas. Si aparece un MPN de 20 o mayor, debería estudiarse la posibilidad de un tratamiento correctivo.

En cuanto al cloro residual se recomienda que no exceda de 0.5 mg/l y no sobrepase 1 mg/l.

Según los análisis realizados por ANDA en distintos pozos, el nivel de cloro residual excede o iguala el límite recomendable, y en dos de ellos, Estación central y El Castaño 2, sobrepasa el límite admisible en su último análisis efectuado. Si se observa la evolución de las distintas muestras en todos los pozos realizadas desde 1996, se excede o están en el límite del valor recomendado o admisible (ver gráficos de evolución, Anexo 12).

Los coliformes totales en el pozo 6 y en la captación El Castillo son muy elevados en agua cruda. En el pozo 9 después de 1998 no se sobrepasa el límite, pero anteriormente eran excesivos en agua cruda. En el pozo 8 los valores son correctos excepto en el año 2000 donde en agua cruda se alcanzó 1100 MPN. El pozo 7 y la planta de bombeo Castaño 2, actualmente tienen valores aceptables. La planta de bombeo el Castaño y el nacimiento Tres Piedras tienen valores altos.

El valor de turbidez es aceptable en todos los casos.

9.4.3. Calidad de las aguas superficiales

En el presente estudio no se han realizado análisis de aguas superficiales. Pero en el estudio de Esquivel (2000) se tomaron muestras del río San Antonio en época seca y lluviosa.

Los resultados obtenidos en los análisis efectuados el 4 de abril del 2000 muestran una contaminación del río. Se sobrepasan los límites de potabilidad de DBO, DQO, Coliformes totales y fecales, nitrógeno total, oxígeno disuelto. Además, también excede los límites para otros usos tales como pesca, riego de hortalizas o abrevaderos.

Estos análisis y su interpretación se pueden encontrar en el estudio ya mencionado.

En el municipio de Nejapa existe una depuradora de aguas residuales domésticas, situada al norte del núcleo urbano, que recoge parte de las aguas que se generan. Está diseñada para 10.000 usuarios. Pero muchos de los habitantes del núcleo no están conectados por el coste económico que esto les representa. El agua de entrada va a parar a un pozo, después pasa por una reja de separación de sólidos gruesos (desarenador-separador de grasas) y de aquí al reactor biológico. Este reactor está separado en cuatro partes conectadas: las dos primeras partes actúan como reactor, separando las natas, mientras que las otras dos tienen la función de decantador secundario. De aquí, el agua pasa por un pequeño río artificial para oxigenar, y va a parar al biofiltro (humedal con un tipo de planta llamada Taiwan y escoria volcánica) impermeabilizado en el fondo. El agua efluente se vierte al río San Antonio. En la Tabla 9.20. se pueden observar los resultados de un análisis del agua de entrada y salida del 11 de junio de 2002.

Tabla 9.20.- Análisis del agua de entrada y salida.

Parámetro	Agua de entrada	Agua de salida
DQO (mg/l)	535	74
PH	7.42	6.88
T (°C)	27	27
DBO ₅ (mg/l)		51

Los valores de DQO y de DBO₅ de salida están un poco por encima de la norma. En las Fotografías 9.20 a 9.22, se muestran algunas imágenes del biofiltro.



Fotografía 9.20.- Filtro biológico de la depuradora de Nejapa.



Fotografía 9.21.- Filtro biológico de la depuradora de Nejapa.



Fotografía 9.22.- Filtro biológico de la depuradora de Nejapa.

9.4.4. Interpretación

La composición química del agua subterránea es función de la naturaleza de la roca o terreno por el que circula. En Nejapa se trata de aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas, agresivas (pH casi siempre por debajo de 7), muy dulces, con valores elevados de sílice, y con contenidos de hierro en muchos casos en el límite de lo permitido.

Son aguas que tienen que tratarse porque su contenido en coliformes totales y fecales es elevado en general. La captación El Castillo tiene valores extremadamente altos durante toda la serie de años muestreados.

No se ha determinado la calidad de aguas superficiales en este estudio, pero observando los resultados del año 2000 (O. Esquivel) y las características de las aguas subterráneas en algunos puntos, se interpreta que las aguas son de mala calidad.

Tampoco se han podido realizar analíticas de los pozos superficiales excavados, que existen sobretodo en la zona norte del municipio. Debido a que la población utiliza estas aguas para el consumo, deberían realizarse análisis periódicos de algunos de estos pozos, especialmente de los más cercanos al Río Acelhuate y San Antonio, y al relleno sanitario.

Son interesantes los resultados expuestos en el trabajo "Condiciones ambientales del Basurero de Nejapa" realizado en 1998 por ULS/CIMA (Universidad Luterana Salvadoreña. Centro de capacitación e investigación del Medio Ambiente), en el que se expone la contaminación del acuífero debido a los lixiviados del basurero clausurado situado al sur del núcleo urbano. En cualquier caso, esta contaminación afectaría sobretodo al acuífero de Apopa, por la dirección del flujo de aguas subterráneas.

10. CONCLUSIONES

10.1. Geología y tectónica local

Después de haber estudiado el área desde el punto de vista geológico mediante la utilización de fotografía aérea y la realización de trabajo de campo para la identificación in situ de materiales y estructuras, se llegó a las siguientes conclusiones:

- En general, la zona está constituida por materiales volcánicos efusivos, formados principalmente por depósitos piroclásticos con un grado de consolidación bajo y niveles basalto-andesíticos que presentan diferentes grados de alteración.
- El volcán de San Salvador está constituido por capas alternantes de basalto-andesitas y piroclastos, lo que lo definen como un estratovolcán. El buzamiento de estos materiales es radial, partiendo desde la caldera hacia la parte baja del edificio volcánico.
- Existen tres conos de escorias: los cerros Mulunga, La Tabla y Tutultepeque. Estos materiales presentan una gran porosidad, baja cohesión y un alto grado de rozamiento interno.
- El cerro de Nejapa está constituido por basalto-andesitas con piroclastos y tobas.
- Los cerros restantes están formados por basalto-andesitas.

- En los dos últimos casos, en las laderas de los cerros se observan bloques de basalto-andesita aflorantes debido a la alteración y desmantelamiento de estas formaciones. En el cerro de Nejapa y en el Picudo se ha observado la presencia de basalto-andesitas alteradas en forma de capas de cebolla debido a los procesos exógenos.
- Una gran parte del municipio, principalmente las zonas llanas, está cubierta por la Tierra Blanca Joven, siendo visibles en algunas zonas espesores importantes
- Las tobas afloran, en su mayor parte, en la zona noreste del municipio, presentándose en capas de potencia métrica.
- Se ha observado que las fallas existentes en el municipio llevan un rumbo NNW-SSE en su conjunto.
- Este conjunto de fallas definen la estructura y dirección del drenaje superficial y subterráneo y, en general, la extensa planicie que ocupa el municipio.
- Tectónicamente, en el municipio existen dos estructuras geológicas de importancia. En la parte sur, la falla principal que corta el volcán de San Salvador, Buena Vista y La Puerta de la Laguna y que determina las cuencas hidrológicas de los ríos Sucio y Acelhuate. En la parte norte, existe una serie de fallas que atraviesan diagonalmente la región, una de las cuales corta al Cerro de Nejapa y otra que crea un relieve positivo hacia el área central del municipio, determinando la subcuenca del río San Antonio.

10.2. Geomorfología local

Una visión general de la zona de estudio nos muestra que está compuesta por un edificio volcánico y cerros que corresponden a antiguos volcanes desmantelados, rodeados de una planicie. Existe en la zona norte un relieve intermedio en el cual se encajan quebradas que van a desembocar al río Acelhuate.

En resumen, se puede decir que:

- El área de estudio presenta tres zonas claramente diferenciadas en cuanto a sus características geomorfológicas:
 - Volcán y cerros
 - Llanura del centro del municipio
 - Relieve suave en el norte del municipio y en la ladera baja del volcán

- Por otro lado, se han diferenciado las siguientes unidades geomorfológicas:
 - Colinas aisladas
 - Conos de deyección
 - Escarpes
 - Ladera del volcán
 - Llanura
 - Quebradas del volcán
 - Relieves suaves

- Se trata de un relieve joven, caracterizado por la presencia de un edificio volcánico activo y por cerros, que son antiguos volcanes, en proceso de dismantelamiento.

- Los principales procesos modeladores del terreno están relacionados con la dinámica torrencial asociada a los eventos tormentosos.

- Las laderas con mayor pendiente, sobre todo las pertenecientes al volcán y cerro de Nejapa, presentan movimientos gravitatorios de pequeñas dimensiones que afectan al modelado de la zona.

- Las inestabilidades gravitatorias son procesos naturales que buscan el equilibrio natural de las laderas y de la red de quebradas, modificando las pendientes hacia valores cada vez más pequeños.

- Los ríos San Antonio y Acelhuate son los únicos cauces con agua permanente durante todo el año.

- El río San Antonio, que es el que recorre principalmente el municipio, presenta un curso meandriforme con una llanura de inundación en la zona media de su cauce, encajándose en las tobas en su parte final al acercarse a su desembocadura en el río Acelhuate.

- Existen procesos de erosión y depósito dentro de este río a causa de la evolución natural de los ríos meandriformes, que divagan por toda la llanura de inundación.

- El río San Antonio recibe todas las aguas de lluvia procedentes de las quebradas existentes en la parte sur y centro del municipio.

- Durante la época de lluvias, el río San Antonio inunda las vegas situadas en su cauce central, depositando parte de la carga que lleva en esas zonas.

10.3. Hidrografía

La red hidrográfica superficial del municipio se caracteriza por dos tipos de dinámicas: dinámica torrencial y dinámica fluvial. La dinámica torrencial manifestada por la existencia de quebradas se caracteriza por:

- Los parámetros cualitativos caracterizan a las quebradas por presentar una red de drenaje con cierta dependencia estructural, fuertes pendientes, y un potencial erosivo alto, principalmente en las partes altas y medias de las quebradas, donde el cauce se encaja en el propio substrato. El carácter erosivo queda reflejado también 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.
- Los parámetros cuantitativos reflejan una red bien jerarquizada, así como una cuenca alongada que implica una mayor brusquedad en las crecidas. La razón de relieve indica una disminución en el poder denudativo con la bajada de desnivel.

Por otro lado, la dinámica fluvial, considerada para el río San Antonio, se caracteriza por:

- Recibe aportes, tanto de las quebradas que tienen su nacimiento en el Boquerón, al sur, como de las quebradas que provienen del Cerro de Nejapa, al este, y las que se originan en los cerros Ojo de Agua y Las Mesas, al oeste.
- En un primer tramo, el río discurre por la llanura con una morfología meandriforme. En este tramo, el lecho es predominantemente arenoso, si bien pueden aparecer tramos con grava y otros con limo. Esto revela continuos procesos de transporte y depósito. De la misma manera, pueden aparecer tamaños superiores, como cantos de varios centímetros o bloques, que provienen de los aportes de las quebradas en los momentos de mayor actividad de las mismas. Estos materiales también son transportados por el río en las etapas de grandes avenidas.

- En un segundo tramo, el río se encaja en la roca, presentando un trazado más rectilíneo. En él, los sedimentos encontrados son similares a los que aparecen en el anterior. En las zonas donde forma pequeños desfiladeros, suele aflorar la roca madre en el lecho, presentando zonas de acumulación de arena y grava en las áreas donde se remansa o donde se abre el valle. En este tramo también aparecen materiales de tamaños superiores, como cantos decimétricos y bloques métricos.

10.4. Amenaza por movimientos de ladera

En general, los movimientos de ladera presentes en el municipio son los siguientes:

- Deslizamientos traslacionales: afectan principalmente a los suelos que se encuentran sobre la formación de basaltos-andesitas con piroclastos, aflorantes en las quebradas del volcán de San Salvador y sobre la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas, presentes en el Cerro de Nejapa.
- Desprendimientos: afecta a la formación de basaltos-andesitas con piroclastos, los conos de escorias y la tierra blanca.
- Rodamientos: se generan en la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas, aflorantes en el Cerro de Nejapa, y en la formación de basaltos-andesitas presente en la mitad norte del municipio
- Flujos: se ha observado un único movimiento situado en la parte superior del perfil de alteración de la formación de basaltos-andesitas con piroclastos y tobas que se encuentra en el cerro de Nejapa.

Para estimar la susceptibilidad del área de estudio a los movimientos de ladera se han considerado los siguientes factores condicionantes: litología, pendientes, orientaciones, procesos activos de origen hídrico y vegetación. A partir de la integración mediante SIG de los mapas que representan estos factores, se ha obtenido un Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera en el que se observa que las zonas de mayor susceptibilidad en el municipio (susceptibilidad alta) corresponden a principalmente a la ladera media y alta del Cerro de Nejapa y a las áreas con mayor pendiente del volcán de San Salvador, concretamente a las partes altas de las quebradas La Ronda y La Quebradona, y de El Picacho.

Se ha modelizado mediante el programa LaharZ, el comportamiento de los posibles lahares que pudieran generarse en las dos principales quebradas del volcán dentro del municipio, suponiendo diferentes volúmenes de material movilizados y, por tanto, diferentes periodos de retorno. Este estudio ha dado como resultado que en el peor de los casos, el lahar que se desplazaría por la quebrada El Aguacatón, se dirigiría hacia el casco urbano del municipio. Si éste es producido por el menor volumen considerado llegaría a una distancia de unos 2 km del pueblo y si fuera producido por el de mayor volumen afectaría a la carretera Apopa-Quezaltepeque, quedando en los umbrales del casco urbano. No obstante, es importante valorar estos datos como orientativos, dadas las limitaciones del programa.

Por otro lado, se ha empleado el método de Mora y Varhson (1993), que tiene en cuenta factores condicionantes y desencadenantes, aunque no puede llegar a hablarse de peligrosidad puesto que no considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. No obstante, los valores de los desencadenantes considerados, sismos y precipitaciones, corresponden a eventos máximos registrados históricamente, por lo que podría considerarse un análisis de peligrosidad dentro de una hipótesis de amenaza máxima dentro del registro conocido. En los resultados de la aplicación de este método, se observa que la mayor parte del municipio se clasifica como de amenaza media, moderada y muy baja, correspondiendo las zonas de amenaza alta a las laderas del volcán de San Salvador, Cerro de Nejapa y escarpes existentes en el municipio.

En general podría decirse que las condiciones más favorables para la ocurrencia de movimientos de ladera serían precipitaciones intensas al final del invierno (en terrenos saturados), especialmente si ha habido o hay actividad sísmica.

10.5. Amenaza por inundación

En resumen, se ha concluido que:

- El municipio es atravesado por dos ríos. Al este, el río Acelhuate, que sirve como frontera con el municipio de Guazapa y, en la parte central y sur, el río San Antonio.
- Existe una red de quebradas que bajan del volcán y de las zonas altas del municipio y que sólo llevan agua en la época de lluvias cuando se producen las precipitaciones.
- Las zonas de amenaza por inundación se sitúan en las áreas que rodean las orillas del río San Antonio y las cercanas a las quebradas.

- Los problemas que plantean las quebradas están relacionados con inundaciones en los puntos en los que éstas intersectan calles o vías de comunicación. En estos puntos se suelen producir inundaciones cuya duración es la de la tormenta (1-2 horas) y/o una erosión de la calle, debido al poder erosivo del agua, dejándola cortada e inservible, muchas veces, durante toda la temporada de lluvias.
- Existen calles como Calle Vieja y alguna del pueblo de Nejapa, que funcionan como quebradas durante los eventos tormentosos, siendo las únicas vías de desagüe de las aguas de lluvia.
- En concreto, en Calle Vieja, se producen inundaciones debido a las cuales, el agua entra en las casas, alcanzando una altura de unos 20 cm.
- Existen construcciones dentro de los cauces de las quebradas, con el peligro que ello conlleva para los habitantes de esas viviendas.
- Durante las crecidas del río San Antonio se ven afectadas las tierras que están en la zona de meandros del mismo. En este lugar, el cauce tiene muy poca profundidad debido al poco desnivel que hay y el río tiende a ocupar su llanura de inundación, que en ocasiones está cultivada.
- Si no se da un mantenimiento a los puentes o éstos no se dimensionan correctamente, la acumulación del material que arrastra el río puede taponar el puente, provocando inundaciones en sus inmediaciones.

10.6. Amenaza sísmica

Respecto a la historia sísmica del área de estudio, la intensidad máxima asignada en la zona considerada ha sido de VIII-IX y la magnitud máxima de Mw 7.6, ambas correspondientes al terremoto del 10 de octubre de 1986.

La microzonación sísmica evalúa las áreas con igual respuesta sísmica, es decir, identifica aquellas áreas en las que las ondas sísmicas se amplificarán más, causando más daños, debido a condiciones locales tales como la litología, topografía, geomorfología y contenido en agua. Para ello, se avalúa por separado cada uno de estos factores, integrando posteriormente mediante SIG los mapas que los representan y obteniendo un Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno. Los resultados de este mapa muestran que las zonas en las que se daría una mayor amplificación de las ondas sísmicas se sitúan principalmente en las

laderas del volcán de San Salvador, en la parte alta del Cerro de Nejapa y en los cerros Redondo, La Tabla y Mulunga. Dichas zonas corresponderían a aquellos lugares en los que confluye la existencia de determinadas formas morfológicas, unida a la presencia de altas pendientes y/o de materiales no cohesivos sueltos. Debe considerarse, además, que las zonas situadas sobre o próximas a fallas o discontinuidades estructurales importantes, son zonas en las que la amplificación de las ondas será mayor.

Por otro lado, la vulnerabilidad de las edificaciones de Nejapa ante los terremotos es alta, debido a que se trata, en su mayor parte, de construcciones de mampostería de tipo adobe o bahareque. No obstante, aquellos edificios considerados según la normativa salvadoreña (1994) como esenciales o peligrosos (categoría de ocupación I), tales como la clínica municipal, escuelas, instituto, se han realizado según diseños sismorresistentes.

10.7. Caracterización de los recursos hídricos

El acuífero superficial no da buenos caudales de explotación, por ser poco potente y porque su permeabilidad hidráulica es baja. Además, es susceptible de contaminación a través de la superficie.

En la parte central del municipio existe una capa de piroclastos finos y arcillas que puede tener más de 100 metros de potencia.

El acuífero profundo se recarga en las zonas donde no existe esta capa de arcillas. La recarga principal corresponde a la zona del volcán de San Salvador, pero no se descarta que pueda existir infiltración en el centro y norte del municipio, en las cenizas volcánicas y piroclastos de la formación San Salvador, y en las lavas de la formación Cuscatlán.

En caso de existir conexión hidráulica, la recarga se produciría de los acuíferos superficiales a los profundos, porque el nivel piezométrico de éstos, está por debajo.

La profundidad media del nivel de agua en la zona central es de unos 30 metros desde la superficie del terreno (acuíferos profundos).

Los distintos pozos perforados se ubican en la zona central del acuífero. Los coeficientes de almacenamiento indican que se está explotando acuíferos libres y semiconfinados ($S = 0.01-0.001$), a excepción del pozo Hacienda Atalpo, que corresponde a un acuífero cautivo con un coeficiente de almacenamiento del orden de 10^{-8} . En cualquier

caso, hay valores de S intermedios debido a que los pozos tienen distintas zonas de admisión en varios niveles (acuíferos conectados por la zona de rejilla).

Las transmisividades de los pozos también varían mucho, desde valores de 2830 m²/d a 14 m²/d. Los valores promedio son de 500 m²/d. Sucede lo mismo que con el coeficiente de almacenamiento (valores promedio de distintos niveles acuíferos).

El acuífero o acuíferos superficiales son libres o semiconfinados, en función de la granulometría de la capa de piroclastos superficiales.

Las rejillas de la mayoría de los pozos se sitúan en las lavas y escorias, siendo éstas el mejor nivel acuífero. Los pozos perforados confirman que estas lavas se encuentran, en general, a una profundidad de más de 50 m. Sin embargo, las lavas con mayor producción se cree que están a más de 100 m. de profundidad, tal como se ha deducido de los cortes geoelectrónicos.

Los niveles piezométricos de los pozos perforados no tienen validez para realizar un mapa de isopiezas, debido a que no se ha podido medir el nivel actual del agua, y los valores que se dispone corresponden a años diferentes en cada pozo, siendo tomados algunos en los años 70.

En las piezometrías realizadas en estudios anteriores (años 1972 y 2000), el gradiente hidráulico calculado en 1972 en la parte más cercana al volcán es de 0.03 y en el estudio del 2000 es de 0.02. En la planicie, el gradiente del 1972 es de 0.01 y en el 2000 es de 0.008. Esto supone una transmisividad superior en la zona central. También supone una disminución del caudal de agua subterránea en los últimos años.

Según se observa en la piezometría del año 2000, el río San Antonio es efluente, es decir, recibe agua del acuífero. En su nacimiento el río está seco por efecto del cono de bombeo, que hace disminuir el nivel piezométrico de la zona.

Las formaciones hidrogeológicas que pueden formar acuíferos en la zona son la formación San Salvador y la formación Cuscatlán.

La formación Bálsamo se considera impermeable y es el basamento del área de estudio.

El flujo natural de agua subterránea es dirección NE. En el centro del acuífero se crea una distorsión de la piezometría, produciendo un cono de bombeo debido a la intensa explotación.

La formación Cuscatlán predomina en la zona norte del municipio. No existen pozos profundos ni sondeos eléctricos verticales. Sólo se tiene datos de pozos excavados de poca profundidad y nacimientos de agua.

En el volcán de San Salvador no se tiene información geológica del subsuelo, ya que no se pueden hacer sondeos eléctricos verticales debido al pendiente, ni tampoco se ha detectado nacimientos y pozos. Se deduce que en el volcán y en sus faldas, las lavas están a poca profundidad y llegan a aflorar en las quebradas, pero son lavas secas, muy duras, que se tendrían que atravesar para llegar al acuífero profundo. Por esta razón, no se han realizado pozos en esta zona.

Según el balance hídrico considerado, la extracción de agua en el municipio supera la recarga del mismo. Esto produciría un vaciado del acuífero de Nejapa.

La composición química de las aguas subterráneas es bicarbonatada cálcico-magnésica, agresiva, muy dulce, con valores de sílice y contenidos en hierro en muchos casos, al límite de lo permitido.

Los contenidos en coliformes totales y fecales son elevados.

El botadero de Nejapa, situado al NE del volcán de San Salvador, no afecta a los pozos de abastecimiento de la zona de Nejapa, porque queda fuera del límite del acuífero (divisoria de aguas subterráneas). El flujo de agua se dirige hacia Apopa y, por tanto, es en esta zona, donde hay riesgo de contaminación. De hecho, según el informe realizado por ULS/CIMA sobre "Condiciones ambientales del Basurero de Nejapa. Resultados de la investigación de agua, aire y suelo", los pozos y fuentes cercanos están muy contaminados.

11. RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones y resultados obtenidos a lo largo de este estudio, se ha realizado una propuesta de recomendaciones con el fin de mitigar la problemática existente, así como tratar de mejorar la calidad de vida de los habitantes del municipio y conservar los recursos naturales del mismo. Con estas recomendaciones se pretende proporcionar una herramienta técnica para el ordenamiento territorial y la planificación del desarrollo local que actualmente gestiona la alcaldía.

En la elaboración de estas propuestas se han tenido en cuenta los recursos naturales de la zona, así como las necesidades de la población. Para llevarlas a cabo, ha de actuarse a corto, medio y largo plazo, tanto por parte de las comunidades como de los organismos locales, departamentales y nacionales. Es importante que exista una buena conexión entre todos los actores, y que cada uno sea consciente y se haga cargo de las responsabilidades que le atañen.

Las recomendaciones han sido agrupadas según tres líneas de actuación:

Recomendaciones para la planificación territorial, enfocadas a la conservación de los recursos naturales, prevención de riesgos y a servir como herramienta en los estudios de desarrollo urbano y rural.

Recomendaciones de actuaciones sobre el terreno, enfocadas a mitigar el riesgo y desacelerar los procesos de erosión en las laderas.

Recomendaciones de actuaciones de seguimiento, enfocadas a dar una continuidad al presente estudio y a implementar los resultados del mismo.

11.1. Planificación territorial

En este aspecto, se considera necesario concienciar e involucrar a las partes competentes tanto a nivel gubernamental (SNET, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, Ministerio de Economía, Ministerio de Educación, Alcaldías, etc.), como a nivel no gubernamental (ONG's dedicadas al medio ambiente y al desarrollo social, comunidades, etc.), para que se trabaje en la misma dirección y se sumen capacidades y recursos, a favor de una mejor gestión de los mismos.

En este sentido, conviene recordar que el riesgo por diversas amenazas geológicas está aumentando en El Salvador, debido a la rápida expansión de la población en áreas altamente susceptibles y en las que dicha susceptibilidad se incrementa, a su vez, por la deforestación y la urbanización incontrolada. De aquí, la importancia del desarrollo de este tipo de trabajos que puedan ser utilizados como herramientas técnicas en la Ordenación Territorial y la Planificación Urbana, que a su vez son el instrumento legal para la gestión y las políticas de desarrollo local.

Se anima a tomar las medidas adecuadas, y apoyarlas a través de políticas y leyes traducidas en reglamentos y mecanismos para llevarlas a cabo, en consenso con expertos, políticos y población civil, cuidando igualmente de la observación de su cumplimiento.

En esta línea y para el caso de Nejapa, se dan una serie de directrices para ser usadas en la ordenación territorial y planificación urbana del municipio.

Respecto a la amenaza por inundación

Como se ha comentado, el río San Antonio experimenta una serie de crecidas con los eventos tormentosos, de diferente magnitud en función del periodo de retorno considerado. Esto sucede dentro de una dinámica normal del río, sin que represente una amenaza para bienes o personas, siempre que se respeten las zonas de inundación naturales del río y las dimensiones de su cauce. En este sentido, se recomienda respetar la dinámica fluvial, no ocupando la llanura de inundación y no modificando la geometría del cauce.

Debe evitarse, igualmente, aprovechar las quebradas o las lomas de los parte aguas para realizar el trazado de las calles, ya que favorecen la canalización de las aguas de forma rápida y preferente, disminuyendo la capacidad de infiltración y generando la pérdida de suelo y deterioro de las calles, además de problemas de inundación en las mismas.

Respecto a la amenaza por movimientos de ladera

Se han elaborado una serie de mapas como son el Mapa de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera (Mapa 8, Anexo 1) y el Mapa de Amenaza por Lahares (Mapa 9, Anexo 1). Estos mapas muestran, en general, aquellas áreas del municipio con mayor o menor susceptibilidad a sufrir inestabilidades de ladera, así como el alcance que pueden tener algunas de ellas. Los mapas elaborados, de gran utilidad en los trabajos de planificación del territorio, muestran que las áreas con menor riesgo de sufrir inestabilidades son las zonas centro y norte del municipio, excepto en aquellos puntos de mayor relieve, definidos por crestas y cerros aislados.

Se ha explicado, además, a lo largo del informe, la importancia de recursos naturales, tales como el suelo y la vegetación, así como la influencia de este último en la erosión y estabilidad de las laderas. Se recomienda, por tanto, considerar una planificación de los usos del suelo, con la doble función de abastecer a la población de los insumos necesarios y no agotar los recursos naturales, sino contribuir a su enriquecimiento. Por esta razón, se insta a evitar la quema de campos, así como el cultivo de especies no permanentes en las laderas mayor pendiente, incentivando los cultivos permanentes y la reforestación con vegetación autóctona en estas áreas.

Respecto a la amenaza sísmica

Se ha realizado un estudio de microzonación sísmica que ha dado como resultado un Mapa de Respuesta Sísmica del Terreno (Mapa 12, Anexo 1). En este mapa puede observarse que las zonas en las que se produciría una amplificación menor de las ondas sísmicas se sitúan en el norte del municipio. En el centro y sur aparecen algunas áreas aisladas de baja amplificación, pero que habría que evitar en el caso de que se encuentren en la base de zonas con relieve, ya que el material movilizado por inestabilidades de ladera que pudieran desencadenarse podría afectar a las zonas adyacentes.

En general, y teniendo en cuenta los resultados del estudio, mostrados en los Mapas de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera y Respuesta Sísmica del Terreno (Mapas 8 y 12, Anexo 1), se observa que la zona con menor susceptibilidad a los movimientos de ladera y en la que se produciría una menor amplificación de las ondas sísmicas sería la zona norte del municipio, hacia donde se recomienda un posible desarrollo del mismo.

Por otro lado, debe evitarse la presión sobre las zonas de alto riesgo que deberían ser definidas como zonas de protección o de actividad restringida, constituyendo, en la mayoría de los casos, zonas verdes no habitadas. En este sentido, se recomienda evitar o reducir el crecimiento hacia cotas superiores de la ladera del volcán, Cerro de Nejapa, y cerros aislados ya que, además de que ello implicaría un aumento de la exposición, conlleva un cambio en los usos del suelo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de inestabilidades.

11.2. Actuaciones sobre el terreno

Los procesos de erosión, movimientos de ladera, inundaciones y terremotos ocurren de forma natural propiciados por diversos factores que han sido detallados a lo largo del estudio. No obstante, se puede intervenir de manera directa sobre el terreno con el fin de que estos procesos ocasionen el menor daño posible a la población e infraestructuras. Estas recomendaciones deben ser retomadas por la Alcaldía, así como por las instituciones competentes y los miembros de las comunidades y núcleos urbanos.

En esta línea, se dan indicaciones de actuación en cauces y laderas, recomendándose la intervención sobre los puntos de riesgos localizados en el municipio durante el desarrollo de este proyecto.

Actuaciones en el río

Se recomienda tomar medidas de protección contra la erosión de los cauces para evitar la inestabilidad de las laderas por descalce, especialmente en las zonas de curva del río en las que se ha detectado esta problemática. Este es el caso de una parcela que está siendo afectada por la pérdida de terreno debida a la erosión fluvial y que pudiera llegar a afectar a la vivienda que se ubica en ella (Anexo 2).

Por otro lado, y a la vista de los problemas que se observan en algunos puentes que son sobrepasados por el agua en momentos de crecida, se recomienda dar un mantenimiento a éstos, especialmente, tras los eventos tormentosos de mayor intensidad, para conservar sus secciones limpias y libres de materiales arrastrados, tales como piedras y troncos de árboles que transporta la corriente durante estos eventos y que disminuyen la capacidad de paso de las aguas a través del puente, aumentando la altura del flujo aguas arriba e incrementando el riesgo por inundación en esa zona.

Por la misma razón, es importante realizar un buen dimensionamiento de los puentes teniendo en cuenta los caudales de agua que pueden esperarse para diferentes periodos de retorno, de forma que puedan dar paso a las aguas.

En este sentido, cabe decir que no sólo es importante el buen dimensionamiento de las obras, sino también que exista un control de obra para que lo realizado se ajuste a lo que se había proyectado. Este es un fallo que se ha detectado durante el trabajo de campo en alguna obra y que puede ser fácilmente corregido.

Actuaciones en las quebradas

Como se ha explicado en el Apartado 8.1.1, existen numerosos puntos con problemas de inundación en las intersecciones de caminos y quebradas, que los hacen intransitables durante las tormentas. En este sentido, se recomienda mejorar la situación en que se encuentran aquellos puntos cuyo funcionamiento resulta de vital importancia en el caso de que se produzca una emergencia. Algunos de esos puntos aparecen señalados en el Anexo 4, y para ellos se sugiere una mejora notable en su pavimentación, la construcción de puentes o la ampliación de las secciones de drenaje de los ya existentes, cuando éstas no son suficientes.

En cuanto a los problemas que presentan algunas calles, como Calle Vieja, que funcionan como quebradas durante el invierno, se recomienda reubicar las viviendas hacia lugares más seguros en los casos de mayor gravedad, o bien realizar canalizaciones que conduzcan el agua, de manera que ésta no pase entre las viviendas o dañe el camino haciéndolo intransitable para los carros.

Por otro lado, en el caso de la vivienda de El Salitre señalada en el Apartado 8.1.1, se recomienda alargar los drenajes realizados algo más arriba en la misma calle, para que puedan conducir las aguas hacia la quebrada sin que éstas pasen por dicha vivienda.

En general, se considera recomendable la creación de un sistema de drenaje en carreteras y caminos, con el fin de evitar que estas vías de comunicación sean líneas preferenciales para la circulación de los flujos durante las lluvias, así como para controlar el comportamiento del agua de escorrentía superficial. Se recomienda realizar esas canalizaciones especialmente en aquellos caminos que son utilizados de forma habitual como quebradas por el agua de escorrentía y que constituyen la única vía de escape de ciertos sectores en caso de necesidad de evacuación. Estos drenajes deberían ser zanjas con un sistema permeable, constituido por arena compactada bajo grava. Dichos sistemas requieren un mantenimiento principalmente de limpieza para evitar que sean obstruidos.

Especialmente urgente es el caso de la vivienda situada en una de las quebradas de San Jerónimo Los Planes, también señalada en el Apartado 8.1.1. Esta vivienda debería ser reubicada de inmediato dado el riesgo por inundación y movimientos de ladera que conlleva el emplazamiento en el que se haya situada.

Por otro lado, se considera aconsejable el mantenimiento e incentivación de la práctica de llevar a cabo obras biofísicas en los márgenes del cauce mediante la plantación de especies de rivera (bambú, sauces, etc.) para minimizar la erosión y evitar el desbordamiento de la importante carga sólida que transportan los flujos en las grandes avenidas.

Actuaciones en las laderas

Además de las indicaciones generales dadas en el Apartado de Planificación, de forma concreta y para movimientos de ladera específicos se dan las siguientes recomendaciones.

En el caso de los rodamientos, que afectan principalmente al Cerro de Nejapa, Barbarrubia y Cerro Las Mesas y, dado que éstos se producen como consecuencia del descalce de los bloques debido a la pérdida de suelo, se recomienda tomar medidas de protección contra la erosión de las laderas. Dichas medidas consisten principalmente en mantener una vegetación permanente, pero también pueden realizarse obras biofísicas de contención y conservación del suelo como barreras vivas, acequias, muros secos, etc. Las acequias son obras que deben construirse paralelas a las curvas de nivel, con la doble función de retener las partículas arrastradas por la erosión y aumentar la infiltración para una adecuada conservación de los suelos. Las barreras vivas y muros tienen la finalidad a corto plazo de reducir la acelerada evolución de las pequeñas quebradas que afectan la ladera, reteniendo material y disminuyendo la pendiente. A medio plazo, se genera una vegetación, que además de proteger los suelos contra la erosión genera insumos para la población. Estas medidas ayudarían igualmente a prevenir la aparición de deslizamientos y flujos.

En el caso de los desprendimientos de tierra blanca que afectan a los taludes de caminos y carreteras, se recomienda diseñar éstos con un ángulo menor a 38° , valor del ángulo de rozamiento que define la resistencia de estos materiales, según los datos encontrados en bibliografía.

Para los desprendimientos de bloques de basalto y piroclastos existentes en las quebradas, así como para los desprendimientos de partículas de escorias que se producen en el frente de explotación del Cerro Redondo, más que una actuación sobre el terreno, y dado que no existen elementos expuestos que deban protegerse, se recomienda una adecuada planificación del territorio en estas zonas de alta susceptibilidad, tal como se detalla en el apartado anterior.

11.3. Actuaciones de seguimiento

11.3.1. Respecto a los riesgos geológicos

El presente informe será entregado a diferentes organismos con el fin de hacer pública toda la información que se recoge y dar una continuidad al proyecto. La Alcaldía de Nejapa, como contraparte, se hace cargo del seguimiento e implementación del proyecto, así como de la actualización de bases de datos y cartografías mediante el SIG. Será igualmente entregado a la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), al Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), así como a otros organismos, instituciones y ONG's, con intereses en la zona o en el desarrollo de este tipo de estudios.

Para que la continuidad del proyecto sea más efectiva, se hace un llamamiento a los habitantes de las comunidades del municipio, así como a los técnicos de la oficina de proyectos y promotores sociales que trabajan en las comunidades. La falta de registros históricos de eventos pasados es una de las dificultades que se encuentran en este tipo de estudios, por lo que sería de gran utilidad para posteriores análisis un registro de eventos con información acerca de:

- Zonas inundadas, ya sean hogares, carreteras o caminos, asociando dicha información a la fecha del suceso, y al volumen y duración de las precipitaciones.
- Ocurrencia de movimientos de ladera, fecha y causas asociadas: precipitaciones, sismos, etc. con indicación de la magnitud y duración de dichos eventos.
- Edificaciones dañadas durante los sismos, indicando el tipo de construcción afectada y en qué grado lo está (preferiblemente siguiendo la EMS, 1998), así como las intensidades sentidas en el municipio.

Con la finalidad de obtener registros de precipitaciones más precisos se recomienda instalar una estación pluviométrica donde se registren intensidades de lluvia. Igualmente, se insta a los organismos competentes a mantener activa y en buen estado la estación de aforo del río San Antonio para que pueda proporcionar datos útiles. En cualquier caso, es recomendable invertir en monitoreo volcánico (emanación de gases, temperatura del agua en manantiales, deformación,...), sísmico, meteorológico (precipitaciones, intensidades,...) e hidrológico (caudales medios y caudales pico aforados en diferentes circunstancias, y registro periódico de otros parámetros).

En general, se aconseja un seguimiento de los procesos estudiados ya sean zonas de inundación, movimientos de ladera o sismos. Especialmente, se considera necesario el seguimiento de aquellas áreas que presentan problemas como pueden ser Calle Vieja, la vivienda ubicada en la quebrada de San Jerónimo, intersecciones de caminos-quebradas, etc.

Igualmente, se insta a realizar una actualización continua de los mapas elaborados mediante SIG, en cuanto a nuevos registros de fenómenos naturales o a todas las actuaciones que se lleven a cabo, tales como nuevas construcciones, cultivos, pozos, etc.

Por otro lado, se recomienda la creación de comités de gestión local del riesgo, encargados de gestionar situaciones de emergencia y organizar a la población. En esta línea, se considera importante el desarrollo y aplicación de sistemas de alerta temprana, así como la elaboración de un código de conducta y emergencia.

Igualmente, se aconseja la realización de capacitaciones dirigidas a los técnicos municipales para la correcta gestión del entorno, y a la población, en general, a través de escuelas y comunidades para dar a conocer las amenazas existentes.

Por último, y a la vista de todo el estudio se sugiere una revisión de la normativa municipal, y la vigilancia y observación de su cumplimiento.

11.3.2. Respecto a los recursos hídricos

No se recomienda aumentar los caudales de explotación de los pozos existentes, ni perforación de nuevos pozos en el acuífero, hasta tener datos actualizados de los niveles piezométricos, y poder evaluar el estado actual del mismo.

Se debería llevar un control de los niveles piezométricos (mínimo dos medidas anuales, una en la estación seca y otra en la lluviosa) para empezar a tener un registro de la evolución de los niveles de agua en el tiempo. Estos datos serían muy valiosos para la caracterización del acuífero y su funcionamiento, con el fin de realizar una buena gestión del recurso hídrico.

Se recomienda realizar análisis de agua periódicos en los piezómetros de control y el pozo del relleno sanitario, para controlar posibles infiltraciones de los lixiviados. También es importante hacer algunos análisis en pozos excavados que se encuentran al E-SE del relleno sanitario, porque son usados para abastecimiento, y susceptibles de contaminación por lixiviados.

Igualmente, es aconsejable la realización de sondeos eléctricos verticales o sondeos de investigación en la zona norte del municipio, donde no existe ninguna información del subsuelo.

En la construcción de nuevos pozos debe instalarse tubo piezométrico para poder medir el nivel de agua, incluso cuando el pozo esté bombeando.

En los nuevos pozos perforados, debe aislarse el anular en superficie para evitar filtraciones directas. También deben aislarse los acuíferos superficiales, susceptibles de contaminación, ya que puede producirse una circulación de agua de éstos hacia los niveles profundos, a través del empaque de grava del anular.

Sería recomendable, además, estudiar con más detalle el funcionamiento de las fallas con respecto a la conexión hidráulica entre acuíferos.

Por último, las aguas subterráneas extraídas, deben tratarse porque su contenido en coliformes totales y fecales es elevado.

BIBLIOGRAFÍA

AFPS, 1995. Guidelines for seismic microzonation studies.

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), (2002). "Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales en el ámbito municipal de Nicaragua. Guía para el especialista". Proyecto de Apoyo Local para el Análisis y manejo de los Riesgos Naturales (ALARN). Managua, Nicaragua.

Alcaldía municipal de Nejapa. Environment versus economic progress. Observations and recommendations to the by pass freeway in the municipality of Nejapa.

Alfaro, C.S.; Kiremidjian, A.S.; White, R.A. (1990). "Seismic zoning and ground motion parameters for El Salvador". The Jonh A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.

ANDA (1972). Informe proyecto zona norte.

ANDA (1975). Anexo: Cálculo y gráficas de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona Nejapa-Mapilapa.

ANDA (1997). Perforación de 25 pozos. Informe de perforación del pozo PBM-9.

ANDA. (1998). Estudio hidrogeológico del área del proyecto "residencial Nejapa", jurisdicción de Nejapa, depto. De San Salvador.

ANDA. (1999). Estudio hidrogeológico del área del caserío El Anonal, cantón Camotepeque, jurisdicción de Nejapa, depto. De San Salvador.

ANDA (1999). Informe final aforo pozo núm. 4.

ANDA. Informe técnico final. Pozo núm.4.

ANDA (2000). Informe prueba de bombeo pozo hda. Atalpo, Nejapa.

Aparicio (2001). "Fundamentos de hidrología de superficie". Limusa. Noriega Editores.

Aquino, J.A. y Chávez, C.E. (2001) Licuefacción: estudio y aplicación a los terremotos de enero y febrero de 2001. Trabajo de graduación. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", San Salvador, El Salvador.

Arce, J.M. (2002). "Estudio hidrogeológico para la introducción de agua potable en el municipio de Nejapa". Departamento de San Salvador, El Salvador.

Association Francaise du Genie Parasismique, AFPS (1995). "Guidelines for seismic microzonation studies".

Barrios, H.L.; Henríquez, M.I.; Hidalgo, M.H. (1987). "Investigación Geológica y Geotécnica del Río Acelhuate y Quebrada Arenal de Monserrat. Localización de zonas críticas y recomendación de obras de protección". Proyecto. U.C.A.

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

Bellaubí, F. (2000). "Caracterización de los recursos hídricos del municipio de Nejapa" en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, 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.

Bommer, J.J.; Hernández, D.A.; Navarrete, J.A. and Salazar, W.M. (1996). "Seismic hazard assessments for El Salvador". Geofísica Internacional, Vol. 35, Num. 3, pp. 227-244.

Bommer, J.J.; Rodríguez, C.E. (2002). "Earthquake-induced landslides in Central America". Engineering Geology 63, pp. 189-220.

Bommer, J.J.; Benito, M.B.; Ciudad-Real, M.; Lemoine, A.; López-Menjívar, M.A.; Madariaga, R.; Mankelov, J.; Méndez de Hasbun, P.; Murphy, W.; Nieto-Lovo, M.; Rodríguez-Pineda, C.E.; Rosa, H. (2002). "The El Salvador Earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. Soil dynamics and earthquake engineering 22, pp. 389-418.

Borilla Rivera, B.E. (1987) Aplicación del modelo hidrodinámico a la cuenca del río Lempa.

Brizuela, B., Escalante, A., Menjívar, L. (2002). "Análisis de la amenaza por deslizamientos en el Municipio de Nejapa". Informe de la UCA (inédito).

Building Seismic Safety Council (2000). "NEHRP recommended provision for seismic regulations for new buildings and other structures". Program on improved Seismic Safety Provisions. Building Seismic Safety Council. Washington D.C. 2001.

Campus, J.U. (1969) Estudio hidrogeológico comparativo de las cuencas de los ríos Sucio y Acelhuate y su influencia en la investigación del agua subterránea. UES.

Cañas, L.A. (2000) Diagnóstico y alternativa de solución para la rehabilitación de los sistemas de captación y producción de estaciones de bombeo, de la administración nacional de acueductos y alcantarillados (ANDA) en el área metropolitana de San Salvador.

Carrillo, S. (2001). "Estudio de manejo de los recursos naturales del municipio de Nejapa" en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, El Salvador.

Casa Castro, S.A. de C.V. (1995). Pozo Embotelladora Salvadoreña, S.A., Nejapa, Dpto. de San Salvador.

Comisión Técnica Asia. "Análisis sobre las causas de la tragedia ocurrida el 19 de septiembre en la colonia de Montebello Poniente y áreas circundantes.

Comisión Sismológica Europea. Subcomisión de Ingeniería Sísmica. Grupo de Trabajo sobre Escalas Macrosísmicas. "Escala Macrosísmica Europea 1998 (EMS-98)". Luxemburgo, 2003.

Comité regional de recursos hidráulicos. (1985) Evapotranspiración potencial en El Salvador.

Cornejo, L.A. y Rodríguez, R.A. (2002) Identificación de problemas geotécnicos asociados a actividad sísmica. Trabajo de graduación. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", San Salvador, El Salvador.

Coto Salamanca, E.G. (1994) Evaluación de la explotación y disponibilidad de agua subterránea y análisis de pruebas de bombeo en el acuífero del AMSS.

Custodio, E; Llamas, R.M. Hidrología subterránea. Tomo I, II.

Duarte, J.R. (1998). "Estudio hidrogeológico del acuífero de Guluchapa". San Salvador, El Salvador.

Esquivel, O. (1997) Investigación aplicada sobre el impacto ambiental de la contaminación del agua en las cuencas de los ríos Sucio, Acelhuate y Cuaya.

Esquivel, O. (2000). "Diagnóstico Detallado del Problema: Mejoramiento y Uso Racional del Río San Antonio". Informe 1.

Esquivel, O. (2000). Estudio de factibilidad técnica, económica y social para el proyecto: mejoramiento y uso racional del río San Antonio. Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador.

FCIHS. (1999). Homenaje a Alfons Bayó i Delmau.

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.

Fletcher. G. Griscol. Ground water and wells.

Fuentes, P. (2001). "Propuesta de ordenanza de ordenamiento territorial y usos del suelo para el municipio de Nejapa" en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, El Salvador.

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). "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.

González de Vallejo, L.I. (1990). "Riesgo sismotectónico". Apuntes del Máster de Ingeniería Geológica, Universidad Complutense de Madrid.

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

Hammer, C. (2000). Hydrogeology of a central american volcanic complex. The lower San Miguel basin, El Salvador. Proyecto de investigación de doctorado. Universidad de Neuchâtel, Suiza.

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.

Hopf, J. (1983). "Deslizamiento en la subcuenca El Nispero". Programa de Las Naciones Unidas para el desarrollo.

Ibarra Turcios, A. (2001) Hacia la gestión sustentable del agua en El Salvador.

International Building Code (2000). International Code Council, INC. USA (IBC).

ITGE (1994), "Estudio del medio físico y de sus riesgos naturales en un sector del Pirineo Central". Informe inédito.

Keefer, D.K. (1984), "Landslides caused by earthquakes". Geological Society of America Bulletin. Vol. 95, pp. 406-421.

Lungo, M. (2001). "Nejapa. Procesos regionales que inciden en su territorio" en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, El Salvador.

Major, J.J.; Schiling, S.P.; Sofield, D.J.; Escobar, C.D.; Pullinger, C.R. (2001). "Volcano hazards in the San Salvador Region, El Salvador". U.S.G.S. Vancouver, Washington, U.S.A.

Manual for zonation on seismic geotechnical hazards.

Medvedev, S.V. (1965). "Engineering seismology". Academy of Science of the U.S.S.R.

Mejivar, R.A. (1988) Variables que determinan la demanda de agua en el área urbana del municipio de Nejapa.

Memorias del seminario sobre evaluación y mitigación del riesgo sísmico en el área centroamericana (22-26 de septiembre, 1997). Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". San Salvador, El Salvador.

Ministerio de Obras Públicas, Centro de Investigaciones Geotécnicas (1990). "Avalancha de Montebello Poniente".

Mulas, J., Ponce de León, D., Martínez, M. y Pardo, J.M. (2001) Diseño de una metodología para la zonificación de la inestabilidad de laderas naturales producidas por terremotos. Aplicación a una zona del Pirineo Central (Huesca). V Simposio Nacional sobre Taludes y laderas Inestables, Madrid, España, Vol. III, pp. 1.241-1.252.

Mulas, J., Ponce de León, D. y Reoyo, E. (2003) Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. 2º Congreso de Ingeniería Sísmica, Málaga, España.

Norma técnica para diseño por sismo. Reglamento para la seguridad estructural de las construcciones. Ministerio de Obras Públicas. República de El Salvador. El Salvador, 1994.

Norma Técnica para el diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes. Reglamento para la seguridad estructural de las construcciones. Ministerio de Obras Públicas. República de El Salvador. El Salvador, 1994.

Normativa sismorresistente europea. ENV 1998-5:1994.

Perforaciones técnicas, S.A. de C.V. Aforo de pozo en embotelladora salvadoreña, S.A. 1997.

Pinaud, M. (2001). Estudio hidrogeológico y geológico del complejo de San Marcelino (Departamento de Santa Ana y Sonsonate). Geólogos del Mundo y ASACMA. San Salvador, El Salvador.

PNUD-ANDA. (1985) Estudio sobre aguas subterráneas. Proyecto zona norte.

PRISMA. Gestión estratégica de la Tierra Urbana.

PRISMA. Evolución de la red urbana y el desarrollo sostenible en El Salvador.

PRISMA. (1994) El acuífero de San Salvador. N°7.

PRISMA. (1995) El agua: límite ambiental para el desarrollo futuro de El Salvador. N°5.

PRISMA. (2001) La contaminación del agua en El Salvador. Desafíos y respuestas institucionales.

Regen, Retana, R. (1983). "Reporte sobre el daño de flujos de lodo en el área del volcán de San Salvador".

Reyes Guillén, G. (1982). "Estudio geológico-tectónico de San Salvador y sus alrededores inmediatos, con mayor énfasis en Montebello y lugares circunvecinos".

Rubio, J (2002). "Levantamiento de deslizamientos de tierra en el volcán de San Salvador". Apoyo al proyecto mitigación de los efectos multiamenazas en zonas de riesgo del volcán de San Salvador. San Salvador, El Salvador.

Salamanca, L. (2001). "Plan de ordenamiento territorial del municipio de Nejapa" en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, El Salvador.

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

Singh, S.K.; Gutiérrez, C.; Arboleda, J. (1993). "Peligro sísmico en El Salvador". Inédito.

Sitar, N., Clough, G.W. (1983). Seismic response of steep slopes in cemented soils. ASCE Journal Of Geotechnical Engineering 109 (GT2), 210-227.

SNET. (2002). Propuesta de descontaminación del canal principal de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa.

SNET. <http://www.snet.gob.sv>

TC4-Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, ISSMFE (1993). "Manual for zonation on seismic geotechnical hazards". Published by Japanese Society of Soil Mechanics & Foundation Engineering.

UCA (2001). "Base de datos de Nejapa (servicios, medio físico, medio socioeconómico)". Base de datos integrada en un sistema de información geográfica (formato digital).

Universidad Centroamericana José Simeón Cañas con el apoyo del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2001). "Diagnóstico para el Municipio de Nejapa". Ordenamiento territorial en Nejapa. Compendio de estudios Fase II. San Salvador, El Salvador.

ULS/CIMA (1998). Condiciones ambientales del Basurero de Nejapa. Resultados de la investigación de agua, aire y suelo.

Vargas Cuervo, G. (1999). "Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa". Cooperación colombo-alemana, proyecto río Guatiquía (PRG). Villavicencio, Colombia.

Vignola, R. et al (2002). Hacia la gestión del riesgo en Morazán. Fundación Agencia de Desarrollo Económico Local de Morazán, El Salvador.

Villón Béjar, M. (2002). "Hidrología". Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

White, R.A. (1991). Tectonic implications of upper-crustal seismicity in Central America. En: Slemmons D.B. et al, editors. Neotectonics of North America. Geological Society of America Decade Map. Vol. 1, 323-338.

Cartografías - Fotografías aéreas

Mapa Geológico de la República de El Salvador E 1:100.000

Hoja San Salvador

Hoja Chalatenango

Mapas topográficos E 1:25.000. IGN.

Hoja 2357 I NW, Aguilares, El Salvador.

Hoja 2357 II NW, Apopa, El Salvador.

Hoja 2357 III NE, Quezaltepeque, El Salvador.

Hoja 2357 III SE, Nueva San Salvador, El Salvador.

Hoja 2357 IV SE, San Juan Opico, El Salvador.

Fotografías aéreas IGN

1996, E 1:20.000

1997, E 1:15.000

2002, E 1:40.000

Deslizamiento de Montebello (1949; 1963; 11/10/1982; 17/10/1986).



CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

DIRECTRICES PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE NEJAPA

Anexos

Nejapa, agosto de 2003



Diputació
Barcelona
xarxa de municipis

Gabinet de Relacions
Internacionals



Diana Ponce de León Gil
José Antonio de San Antonio Escribano
Roser Mañé Jané
Julia Seisdodos Santos

CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

DIRECTRICES PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE NEJAPA

Memoria

Coordinación del proyecto.-	Diana Ponce de León Gil
Geología.-	José Antonio de San Antonio Escribano
Hidrogeología.-	Roser Mañé Jané
Apoyo voluntario en hidrología.-	Julia Seisdodos Santos



Diputació
Barcelona
xarxa de municipis

Gabinet de Relacions
Internacionals



Nejapa, agosto de 2003

CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

DIRECTRICES PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE NEJAPA

Anexos

Coordinación del proyecto.-	Diana Ponce de León Gil
Geología.-	José Antonio de San Antonio Escribano
Hidrogeología.-	Roser Mañé Jané
Apoyo voluntario en hidrología.-	Julia Seisdedos Santos