RECTOR

JOSÉ MARÍA TOJEIRA, S.J.

SECRETARIO GENERAL

RENÉ ALBERTO ZELAYA

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CELINA PÉREZ RIVERA

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

JOSÉ MAURICIO CEPEDA

DIRECTOR DEL TRABAJO

CARLOS PULLINGER

LECTOR

ARTURO ESCALANTE

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar queremos agradecer a nuestro asesor Ingeniero Carlos Pullinger, por que desde la primera reunión nos supo guiar y comprender, además por que sus aportes fueron muy valiosos en la elaboración de este documento.

A nuestro lector Ingeniero Arturo Escalante por ser una persona muy paciente y tomar su tiempo para ayudarnos en la etapa de programación informática, por su orientación en la fase de toma de decisiones y por facilitarnos el acceso al equipo de sistema de información geográfica de la Universidad.

Al Licenciado Giovanni Molina por tenernos paciencia al momento de enseñarnos el programa ILWIS, por colaborarnos en encontrar las variables a definir en la creación de los modelos presentados en este documento.

También agradecemos al Ingeniero Douglas Hernández por todos sus consejos fundamentales en momentos críticos y por todos sus aportes en la fase de corrección ya que sus aportes fueron fundamentales en la estructura de esta tesis.

A nuestro coordinador Ingeniero José Cepeda por darnos las primeras aportaciones sobre la amplificación sísmica debida a la topografía, por su interés y colaboración en nuestro tema y por aportados con ideas claves en el cuerpo de este documento.

Finalmente a las chicas del SIG de la Universidad, ya que de alguna manera cada una de ellas fueron parte fundamental en la elaboración de los modelos planteados, y por recibirnos muy cordialmente en las visitas que realizábamos.

Dedico este logro a mis padres: Eduardo Cortez y Gladis Cruz ya que su cariño, apoyo y confianza fueron de mucho aliento en este caminar, por enseñarme que no existe nada incansable si la voluntad y lucha esta por delante. Los amo.

A nuestro señor Jesucristo por ser mi amigo y mi paño de lágrimas en los momentos de flaqueza, por ser ese ser tan especial, porque nunca me falló y siempre estuvo conmigo.

A mi esposo: Nelson por ser ese apoyo incondicional, esa mirada de amor y confianza en los momentos difíciles, por ese consejo oportuno y por complementar mi vida de amor y felicidad.

A mi bebe: Nelsito, sé que cuando puedas leer y entender estas palabras sentirás la misma nostalgia y alegría que embarga mi corazón, sos mi fuerza e inspiración, el regalo más bello que Dios me ha dado, te quiero con todo mí ser y este logro te lo dedico a ti.

A mi hermano: Eduardo ya que su apoyo y voto de confianza fue de mucha ayuda. Por que siempre quise ser como tú y siempre serás mi hermanito mayor.

A mis cuñadas: Marlene, Karen y Jenny por todo su apoyo y cariño.

A mi segunda madre: Mercedes, por ser ese ser tan especial, que me cuido, jugo conmigo en mi infancia y lo sigue haciendo con mí bebe. Gracias por ser como es.

A mi suegra: Rosario que es mi tercera madre a quien agradezco su apoyo por que en los peores momentos siempre estuvo conmigo para ofrecerme su consejo y su cariño gracias.

A mi amiga y compañera de equipo: Jessica por que desde que te conocí fuiste ese apoyo constante. Gracias.

A mis compañeras: Karen y Kenny, por compartir conmigo todos los logros y todos los fracasos a lo largo de la carrera. Hey lo logramos.

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera formaron parte de este logro Gracias.
Karla Cortez de Rodríguez.

DEDICATORIA.

Quiero dedicar este esfuerzo a Dios todopoderoso por ser el pilar de mi vida, por escuchar mis suplicas en los momentos más duros a lo largo de mi carrera.

A las personas que siempre me han apoyado desde que nací, mis padres Rafael Antonio y Ana Beatriz, ya que al igual que yo han soñado con el momento de coronar mi carrera, por su esfuerzo, por su cariño y sobre todo por el amor que siempre me dan. Los amo muchísimo papitos.

A mi esposo Jaime Eduardo Lemus por ser mi amigo incondicional, por contar con su presencia en las buenas y en las malas, por creer en mí y animarme cuando me sentía deprimida, por todo el amor y la paciencia que me tiene. Te amo mucho picho. Gracias por ser mi esposo y por el bebé que me distes.

A mi bebé Eduardo Alejandro por ser mi máxima inspiración por que desde que nació se ha convertido en un tesoro indispensable en mi vida, con su carita y sus gracias me inspiran para seguir adelante, por ser un niño muy inteligente, compresivo y atento. Te adoro mucho hijo.

A mis hermanos René y Tony, por que son parte de mi ser, porque siempre han sido muy consentidores conmigo y he recibido su apoyo en todo momento, por su ayuda cuando más los necesité y por cuidarme mucho.

A mis abuelitos Papá Luis y Mamá Polita, ya que desde el cielo me han vigilado y con el lindo recuerdo que guardo de ellos me han inspirado en todo momento, que descansen en paz, siempre los llevo en mi corazón.

A mis sobrinitos Marcelo, Marco Antonio y Allison, por que los quiero mucho ya que al nacer cada uno marco un cariño muy grande en mi corazón.

A mi compañera de Tesis Karla, por que es una excelente amiga, por que siempre me ayuda, me apoya y por toda la comprensión que ha tenido a la largo del proceso de graduación y desde que la conozco te quiero amiga.

A mis cuñadas Margarita y Lucy por su apoyo, su colaboración y cariño que han mostrado. Sobre todo por cuidar a mis sobrinitos.

A mi abuelita Mamá Elba, por que aún la tengo entre nosotros, porque uno de sus tantos nietos se le graduará, por su cariño y por estar pendiente de mi en todo momento.

A mi suegra Carmen López, por su ayuda y colaboración, por su apoyo y por enseñarme que lo más importante en la vida es orarle a Dios cuando tenemos temor.

A todos mis familiares, amigos, amigas y compañeros, que me brindan su cariño y apoyo.

Jessica Natalia Prieto de Lemus.

SUMARIO

El presente trabajo de graduación aborda una "Metodología para determinar la susceptibilidad de amplificación sísmica por efecto topográfico"; modelando las bases teóricas de tres métodos con el objeto de identificar áreas propensas a este fenómeno sin tomar en cuenta propiedades del suelo, utilizando como herramienta un Sistema de Información Geográfica. Los mapas obtenidos son de referencia que podrán ser utilizados para establecer una medida cualitativa, no se ha definido una valoración de factores de amplificación, es por ello que este documento será un primer paso para implementar en un futuro este efecto a los diseños sismorresistentes.

INDICE GENERAL

Siglas. ix

Abreviaturas. ix

Símbología ix

Prologo. xi

CAPITULO I

1. Introducción. 1

1.1. Justificación. 3

1.2. Antecedentes. 3

1.2.1. Antecedentes nacionales. 3

1.2.2. Antecedentes internacionales. 6

1.3. Objetivos. 8

1.3.1. Objetivo general. 8

1.3.2. Objetivos específicos. 9

1.4. Limites y alcances. 9

1.5. Limitantes. 10

CAPITULO II

2. Efectos secundarios de actividad sísmica. 11

2. Introducción.. 13

2.2. Amplificación sísmica. 13

2.2.1. Definición. 13

2.2.2. Factores que describen la amplificación sísmica. 13

2.3. Susceptibilidad sísmica. 16

2.3.1. Definición. 16

2.3.2. Factores que describen la susceptibilidad. 17

2.4. Efectos de sitio. 21

CAPITULO III

3. Metodologías empleadas para determinar amplificación sísmica por efecto topográfico. 23

3.1. Introducción. 25

3.2. Modelo de las AFPS. 25

3.2.1. Base teórica. 25

3.2.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2. 26

3.2.3. Discusión. 35

3.3. EUROCODIGO. 35

3.3.1. Bases teóricas del modelo. 35

3.3.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2. 37

3.3.3. Discusión. 46

3.4. KRAMER. 47
3.4.1. Base teórica. 47
3.4.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2. 48
3.4.3. Discusión. 59
CAPITULO IV
4. Discusión general. 61
4.1. Justificación. 63
4.2. *Ventajas y desventajas de cada método.* 63
4.3. Comparación de métodos. 66
4.4. Propuesta de metodología. 67
4.5. Etapa de validación. 71
CAPITULO V
5. Conclusiones y recomendaciones. 75
5.1. Conclusiones. 77
5.2. Recomendaciones. 78

GLOSARIO 79

BIBLIOGRAFIA 87

ANEXOS 91

ANEXO A UBICACIÓN DEL CUADRANTE DE ESTUDIO.
ANEXO B CREACION DEL MAPA DE PENDIENTES
ANEXO C FLUJOGRAMA DEL METODO DE LAS AFPS.
ANEXO D CLASIFICACION DE LAS FORMAS TOPOGRAFICAS.
ANEXO E SCRIPT UTILIZADO PARA DEFINIR ALTURAS.
ANEXO F FLUJOGRAMA DEL METODO DEL EUROCODIGO.
ANEXO G PROPUESTA PARA PROGRAMAR LA VARIABLE ALTURA.
ANEXO H FLUJOGRAMA DEL METODO DE KRAMER.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Deslizamiento en la cordillera del Bálsamo causado por el terremoto del 13 de enero del 2001.	4
Figura1.2	Factores de amplificación por efectos topográficos propuestos para San Vicente.	5
Figura 2.1	Efecto de la topografía sobre la intensidad del movimiento del terreno.	16
Figura 3.1	Variación del factor de amplificación en el espacio.	25
Figura 3.2	Factores de amplificación que plantean las AFPS [1995].	27
Figura 3.3	Zonas de amplificación sísmica por las AFPS [1995].	28
Figura 3.4	Ubicación de la red de drenaje.	29
Figura 3.5	Valores indefinidos en los píxeles ubicados en las quebradas.	30
Figura 3.6	Zonas de posible amplificación en cambios bruscos de pendientes.	31
Figura 3.7	Factores de amplificación, con cambios bruscos de 10°.	32
Figura 3.8	Zonas susceptibles a la amplificación sísmica.	33
Figura 3.9	Zonas probables de amplificación sísmica, según AFPS [1995].	34
Figura 3.10	Zonas probables de amplificación sísmica, modificación de AFPS [1995].	34
Figura 3.11	Pendientes en grados a partir del modelo de elevación digital.	37
Figura 3.12	*Formas topográficas a analizar.*	38
Figura 3.13	Elevaciones del modelo digital.	39
Figura 3.14	Áreas con susceptibilidad a la amplificación según EUROCODIGO [1998].	40
Figura 3.15	Diagrama de pasos previos a la corrida del programa.	41

Figura 3.16 Valores para reclasificar el mapa de dirección de la pendiente 41

Figura 3.17 Polígonos con direcciones de pendiente. 42

Figura 3.18 Mapa de alturas. 43

Figura 3.19 Zonas probables de amplificación sísmica según EUROCODIGO [1998 44

Figura 3.20 Zonas probables de amplificación según EUROCODIGO [1998], con alturas mayores a 100 metros. 45

Figura 3.21 Zonas probables de amplificación según EUROCODIGO [1998], con alturas mayores a 500 metros. 46

Figura 3.22 Ubicación del ángulo θ. Tomada de Kramer [1996] 48

Figura 3.23 Creación del filtro LAPLACE. 49

Figura 3.24 Ventana de datos en la creación del filtro LAPLACE. 50

Figura 3.25 Vista de una matriz de 3*3 de píxeles con información de pendiente. 50

Figura 3.26 Suposiciones en el cálculo del ángulo θ. 51

Figura 3.27 Generación de los ángulos θ1 y θ9. 52

Figura 3.28 Mapa con valores del ángulo θ por cada píxel. 53

Figura 3.29 Zonas propensas de amplificación sísmica según KRAMER [1996]. 54

Figura 3.30 Zonas propensas de amplificación modificando el filtro LAPLACE<-3 55

Figura 3.31 Zonas propensas de amplificación modificando el filtro LAPLACE<-6. 56

Figura 3.32 Creación del filtro shrink4. 57

Figura 3.33 Zonas susceptibles en el modelo Kramer (para LAPLACE<0) utilizando el filtro shrink4. 58

Figura 3.34 Zonas susceptibles en el modelo Kramer (para LAPLACE<-3) utilizando el filtro shrink4. 58

Figura 3.35 Zonas susceptibles del modelo Kramer (para LAPLACE<-6) utilizando el filtro shrink4. 59

Figura 4.1	Zonas susceptibles de amplificación sísmica según Kramer [1996]	68
Figura 4.2	Zonas susceptibles de amplificación sísmica según AFPS [1995].	69
Figura 4.3	Mapa con unión en resultados de los métodos AFPS y KRAMER.	70
Figura 4.4	Áreas comunes de los métodos AFPS y Kramer.	71
Figura A1	Ubicación del cuadrante de estudio	A-3
Figura B1	Ilustración de la forma de escoger un filtro dentro del programa ILWIS.	B-3
Figura B2	Forma de seleccionar el tipo de filtro.	B-4
Figura D1	Selección de la función Slicing.	D-3
Figura D2	Creación de un dominio.	D-4
Figura D3	Reclasificaciones deseadas en el mapa de pendientes.	D-4
Figura G1	Vista en planta de una montaña	G-3
Figura G2	Corte a-a del terreno	G-3
Figura G3	Corte b-b del terreno	G-4
Figura G4	Vista en planta de los píxeles en el área de estudio	G-4

INDICE DE MAPAS.

AFPS: Mapa que aplica la formula que plantean las AFPS, sin modificaciones.

Angulo1: Mapa que calcula los máximos ángulos a partir del mapa de pendientes en radianes.

Angulo2: Mapa que calcula un valor menos que el máximo ángulo, a partir del mapa de pendientes en radianes.

Areascomunes: Mapa que plantea la selección de las areas identificadas para sufrir amplificación por los modelos de Kramer y AFPS.

Buffernew: Mapa que contiene la red de drenaje de la zona de estudio.

Extra: Mapa de pendientes que excluye los píxeles ubicados en la red de drenaje.

H: Mapa que calcula la resta entre el máximo y mínimo valor de las cotas a partir del modelo de elevación digital.

Kramer: Mapa que calcula los factores de amplificación planteados por Kramer [1996], incluyendo todas las convexidades del terreno.

Kramerlimpio: Mapa que muestra los resultados verdaderos de aplicar el filtro shink al mapa generado con los planteamientos por el método de Kramer

Kramershink4: Mapa que muestra los resultados planteados por el método de Kramer utilizando el filtro shink

Penrad: Mapa de pendientes dado en radianes a partir del modelo de elevación digital.

Suma: Mapa que toma en cuenta las amplificaciones que identifica el metodo de Kramer y AFPS en conjunto.

Taunew: Mapa que calcula los factores de amplificación planteados por las AFPS [1995], excluyendo los píxeles ubicados en la red de drenaje de la zona estudiada.

Teta: Mapa que calcula el ángulo interno entre píxeles que forman un cono prismatico.

Topografia: Mapa que determina las formas topográficas del terreno a partir del mapa de pendientes.

SIGLAS.

AENOR:	Asociación Española de Normalización y Certificación
AFPS:	Recommandations pour la redaction de regles relatives aux ouvrages dans les regions sujettes aux seismes (Recomendaciones para la redacción de reglas relativas a construcciones en regiones sujetas a sismos).
CDS:	Esfuerzo dinámico critico.
ILWIS:	The integrated Land and Water Information System (Integración de sistema de información de tierra y agua).
RESESCO:	Reglamento Para la Seguridad Estructural de las Construcciones.
SIG:	Sistema de Información Geográfica.
UCA:	Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

ABREVIATURAS

NE:	Noreste
NW:	Noroeste
p:	Página
SE:	Sureste
SW:	Suroeste

SIMBOLOGIA

a,b,c:	Distancias que delimitan la variación del factor de amplificación en el terreno.
A, B, D:	Puntos que delimitan el inicio de las distancias a, b, c.
C:	Punto donde ocurre el cambio de pendiente desde I hasta i.
g:	Gravedad
H:	Altura desde la base hasta el punto donde se da el cambio de pendiente
I:	Pendiente mayor en el perfil de estudio, en radianes.

i:	Pendiente menor en el perfil de estudio, en radianes.
τ:	Factor de amplificación sísmica por efecto topográfico.
θ:	Angulo formado por las tangentes de un cono prismático.

PROLOGO

En el primer capitulo se presentan los estudios realizados en cuanto a la amplificación sísmica por efecto topográfico tanto a nivel nacional como internacional, incorporando otros factores que contribuyen al aumento de la onda sismica, tal como las propiedades del suelo, las longitudes de onda, la ubicación de la fuente sísmica, por otra parte se resalta la importancia de incorporar este efecto a los diseños sismorresistentes. Además se exponen los objetivos, alcances y limitantes para la elaboración del trabajo, en los cuales se plantean la selección de los métodos que serán incorporados dentro de un Sistema de Información Geográfica, los cuales se fundamentan en propiedades geométricas del terreno.

Por otra parte en el siguiente capitulo se exponen los conceptos necesarios para la compresión de peligros secundarios como lo es la amplificación sísmicas, distinguiendo los factores que la describen; la susceptibilidad sísmica reflejada en fenómenos como subsidencia sísmica, fragilidad del suelo, licuefacción, dilatancia, efecto topográfico y presencia de rellenos. Finalizando con la definición de los efectos de sitio cuya importancia radica básicamente en buscar la manera de mitigarlos ya que son los principales factores de destrucción al ocurrir un sismo.

El capitulo III presenta: las bases teóricas de los modelos AFPS (Recommandations pour la redaction de regles relatives aux ouvrages dans les regions sujettes aux seismes) [1995], Kramer [1996] y EUROCODIGO [1998] que describen el fenómeno de amplificación por topografía, las cuales se incorporaron dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para reflejar todas aquellas áreas con posibilidad de amplificarse por la presencia de cambios bruscos de pendientes, convexidades del terreno y diferentes formas topográficas como acantilados, laderas, escarpes. Finalizando cada metodología con una serie de interrogantes para averiguar si los resultados obtenidos se esperaban, si se consideraron todas las variables propuestas por cada método, y como mejorarlos.

En el cuarto capitulo se enlistan las ventajas y desventajas de cada método, se hacen comparaciones entre ellos, se presenta una propuesta de metodología que describe de

manera adecuada el fenómeno sísmico, valiéndose de la extracción de las cualidades de cada método, para eliminar inconsistencias. Se describen algunas sugerencias para implantar la etapa de validación de los métodos antes mencionados, de tal manera que se definan valores de amplificación y para que en un futuro se incorporen al diseño sísmico o se plasmen dentro de un mapa de susceptibilidades.

Finalmente en el ultimo capitulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos a través del desarrollo del trabajo y se plantean una serie de recomendaciones que podrán ser utilizados en trabajos posteriores.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

1.1. Justificación.

Geográficamente El Salvador se encuentra ubicado en una zona de intensa actividad sísmica y volcánica, formando parte del cinturón de fuego circumpacífico. En los últimos siglos la ciudad de San Salvador fue dañada por 16 terremotos, 9 de los cuales se han asociado a la cadena volcánica y los otros 7 a la fosa de subducción. Este recuento inicia con el evento del 6 de Marzo de 1719 y termina con el del 13 de Febrero del 2001. Los daños sufridos por estos sismos ponen al descubierto la necesidad de estudios sobre el peligro primario (movimiento del terreno) y los peligros secundarios que se derivan de la sacudida fuerte del terreno tales como deslizamientos, licuefacción, amplificación por respuesta local de los estratos y amplificación sísmicas por efectos de la topografía; ya que estos son los principales factores de destrucción.

Actualmente el Reglamento Para la Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO) cuenta con un mapa de peligrosidad sísmica a nivel de macrozonificación y en él no se detallan las áreas susceptibles a sufrir daños por efectos secundarios.

En este sentido el presente trabajo es un aporte a la ingeniería sísmica del país ya que trata de proponer una metodología para evaluar las zonas que son propensas a sufrir amplificación sísmica debido a la topografía del terreno. Tema que aún no ha sido contemplado en el código sísmico y el cual, considerando la abrupta topografía del país es un importante componente del peligro sísmico en El Salvador.

1.2. Antecedentes.

1.2.1. Antecedentes nacionales

Básicamente el diseño sísmico planteado en el actual reglamento de El Salvador considera los siguientes aspectos: la zonificación sísmica a nivel de macrozonificación, categorías de ocupación, características del sitio y la configuración del sistema estructural. La evaluación del coeficiente de zona se realiza a partir de un mapa basado en aceleraciones pico efectivas

del terreno, dividiendo el país en dos zonas sísmicas. La limitante de éste, es que no considera los efectos secundarios, así como también las características y efectos de sitio; además no refleja la actividad sísmica concentrada en el territorio debido a los sismos de la cadena volcánica.

Debido a la poca extensión territorial, las construcciones en el país se realizan en lugares propensos a sufrir amplificación sísmica por efecto topográfico.

Un ejemplo de los riesgos a que se someten este tipo de construcciones, al momento de un fuerte evento sísmico, es el que se registró en la residencial Las Colinas en la ciudad de Santa Tecla, departamento de La Libertad, para el terremoto del 13 de enero del 2001, donde, después de varios estudios de detalle se determinó que la amplificación por topografía y la geología local fueron determinantes para la generación del deslizamiento que causó la muerte de más de 500 personas [Pullinger ,2004] ver figura 1.1.

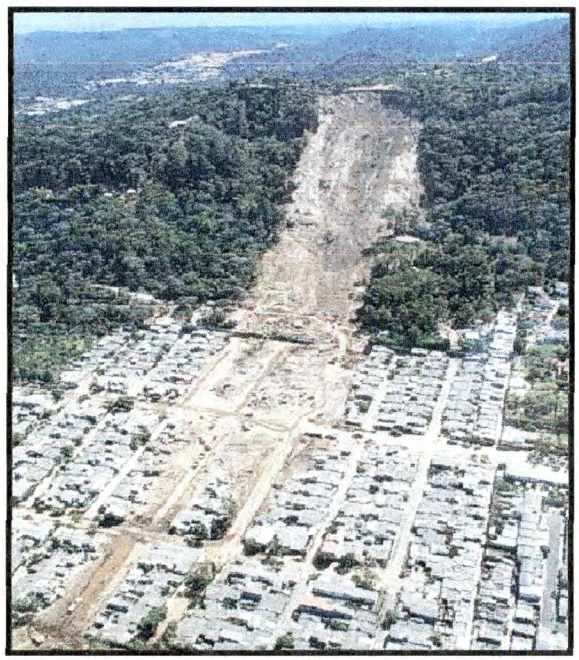

Figura 1.1 Deslizamiento en la cordillera del Bálsamo causado por el terremoto del 13 de enero del 2001, en El Salvador [Sigaran, 2001].

En El Salvador se han hecho algunas incursiones en el tema, entre las cuales se tienen "Una evaluación de riesgos por sismicidad, en la ciudad de San Vicente" elaborado por Cepeda y Burgos [2003], en donde se exponen los daños históricos registrados de la zona, en sismos anteriores. Este recuento manifiesta que el efecto destructivo de los sismos en la región depende de los siguientes factores: la cercanía a fuentes sísmicas activas, la alta vulnerabilidad en la infraestructura y la topografía de la zona. [Cepeda y Burgos, 2003: p. 55].

La figura 1.2 muestra la propuesta elaborada por Cepeda y Burgos [2003], en la que se observan las primeras aproximaciones del fenómeno de amplificación sísmica por la topografía en San Vicente, basándose en valores propuestos por EUROCODIGO [1998], sin considerar la variación de este en el espacio.

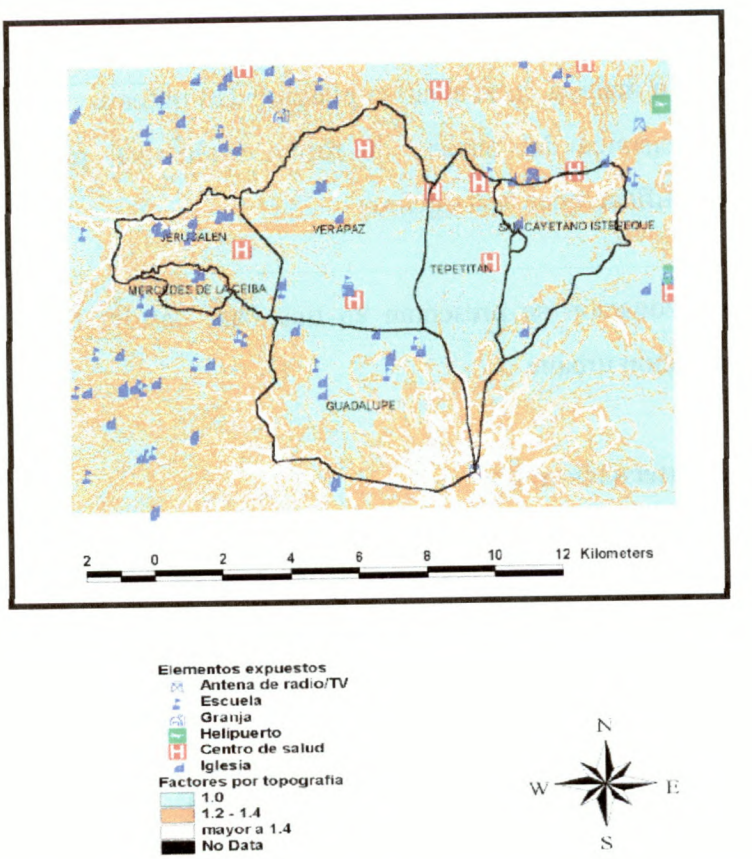

Figura1.2. Factores de amplificación por efectos topográficos propuestos para San Vicente. [Cepeda y Burgos 2003].

El estudio denominado: "Evaluación numérica de la influencia de irregularidades topográficas en los terremotos" elaborado por Sigaran [2003], plantea una metodología para la evaluación del factor de amplificación por efecto topográfico en Las Colinas, utilizando el programa FLAC 4.0.

Por otra parte [Ponce De León *et al*, 2003], realizaron un estudio en la ciudad de Nejapa, ubicada en el departamento de San Salvador, con el propósito de caracterizar los riesgos geológicos y dimensionar los recursos hidrogeológicos, denominado: "Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos", estableciendo con esto una microzonación sísmica de la zona.

Esta microzonación sísmica estableció una superposición de lo siguiente:

- Identificación y caracterización de unidades litológicas.
- Efectos inducidos como fallas.
- Licuefacción, a manera de evaluar su peligrosidad obteniendo un mapa que evalúa la respuesta sísmica del terreno de forma cualitativa, presentando zonas que muestran amplificaciones homogéneas.

Los mapas de microzonación se presentan en una base cartográfica útil para fines de edificación y planificación urbana.

1.2.2. Antecedentes internacionales.

En la actualidad son varias las observaciones que se han hecho de amplificación sísmica por topografía, como por ejemplo en España, Colombia, Venezuela, Chile, México, Japón, Francia, entre otros.

El EUROCODIGO [1998], "Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes", en España, determina valores de amplificación, a partir de las propiedades geométricas del terreno (altura, ángulo de inclinación), los cuales se integran al cálculo de fuerzas sísmicas horizontales. Estos factores deben aplicarse cuando los taludes

presentan irregularidades topográficas bidimensionales, como el caso de crestas y acantilados de gran longitud y altura mayor de 30 metros. [AENOR, 1998: p.29]. Estos efectos son despreciables cuando el ángulo promedio del talud es menor de 15°, en caso que existan irregularidades fuertes estos efectos serán considerados.

Jaime Suárez [1999], muestra que las amplificaciones espectrales son significativas en taludes mayores a 20 metros, de acuerdo con lo observado en el sismo de Chile en 1985.

Por otra parte Boore [1972], realizó estudios numéricos de la respuesta sísmica de los taludes de gran altura y concluyó que el movimiento del talud consiste en tres fases: una onda directa, una onda reflejada y una onda difractada. El resultado mostró que hay una amplificación importante en la parte alta del talud y que a lo largo de los lados del talud puede ocurrir amplificación y atenuación dependiendo de la geometría del talud y la frecuencia del movimiento. La amplificación tiene un valor hasta del 100% y disminuye con el ángulo del talud y la longitud de onda.

Sitar y Clough [1983], encontraron que las aceleraciones tienden a amplificarse en las cercanías de la cara del talud y la amplificación topográfica varía entre el 40% y 76%. La mayor amplificación ocurre en la cresta del talud, cuando la frecuencia del sismo está cercana a la frecuencia natural del terreno.

Sitar [1997], menciona un caso en Santa Mónica en Los Ángeles, California, donde las aceleraciones amplificadas llegaron a obtener valores de 0.93g (g es el valor de la aceleración de la gravedad) de aceleración horizontal y 0.25g de aceleración vertical, las cuales produjeron deslizamientos importantes.

Ashford [1997], concluyó que los efectos del talud sobre la respuesta sísmica pueden ser normalizados como una función de la relación entre la altura del talud y la longitud de onda.

Los reglamentos de diseño estadounidenses, no contemplan la amplificación por topografía, sin embargo Kramer [1996] estableció un factor de amplificación en relación al ángulo que forman tangentes trazadas en el vértice de la cresta, simulando un cono prismático infinitamente largo, diferenciando el ángulo en una cresta y un valle, cuyos valores serán mayores que 1 en el primer caso (amplificación) y menores que 1 para el segundo caso (atenuación). [Kramer, 1996: p. 320].

Por otra parte en Francia, los códigos AFPS [1995], plantean el cálculo de factores de amplificación en función de los cambios bruscos de pendiente en el terreno, proponiendo una ecuación que muestra que los valores máximos se dan a partir de dos consideraciones:

- La primera es que se encuentran en las partes superiores de los taludes o crestas.
- La segunda es que existe en cambios súbitos en las inclinaciones.

Los valores de amplificación oscilan en un rango de 1.0 a 1.4.

Los factores que influencian la intensidad del movimiento cerca de discontinuidades topográficas son varios, el ángulo de incidencia y el tipo de las ondas sísmicas, asimismo la longitud de onda y la geometría de la aspereza topográfica, los cuales son los parámetros más importantes. En valles, la amplificación está relacionada con el ancho de la depresión; generalmente la amplificación en los bordes será mayor si las condiciones geológicas tienen igualmente influencia significativa y los bordes de los valles están constituidos por suelos poco consolidados [Sauter, 1989: p. 150].

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Definir una metodología que plasme la susceptibilidad de amplificación sísmica por efecto topográfico, a partir de la morfología del terreno dentro de un área que cubra cuatro cuadrantes topográficos a escala 1:25,000 (SE 2357-3 Nueva San Salvador, SW 2357-2 San Salvador, NE 2356-4 Zaragoza, NW 2356-1 Panchimalco), para el área suroeste de El Salvador. Ver anexo A.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Presentar una recopilación de la información existente, en cuanto a los factores de amplificación sísmica por efecto topográfico.

- Crear una metodología, para evaluar la susceptibilidad de amplificación sísmica por efecto topográfico, empleando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).

- Mostrar a partir del modelo de elevación digital, las zonas de susceptibilidad a la amplificación sísmica por efecto topográfico.

- Aportar a la evaluación de la peligrosidad sísmica en el país, por medio de la identificación de áreas propensas a sufrir amplificación debido a la topografía del terreno.

1.4. Limites y alcances.

El trabajo presentará aquellas zonas que son susceptibles a la amplificación sísmica por efecto topográfico, utilizando para ello las bases teóricas planteadas en los modelos de las AFPS [1995], EUROCODIGO [1998] y KRAMER [1996]; estos métodos fueron seleccionados por que describen el fenómeno a partir de los parámetros geométricos del terreno, sin tomar en cuenta las propiedades del suelo.

El área de estudio esta delimitada por cuatro cuadrantes topográficos a escala 1:25,000 (SE 2357-3 Nueva San Salvador, SW 2357-2 San Salvador, NE 2356-4 Zaragoza, NW 2356-1 Panchimalco), del suroeste del país.

Se utilizará el programa ILWIS (The Integrated Land and Water Information System), como herramienta de análisis, ya que trabaja con modelos tipo raster y el programa ARCVIEW 3.1 como herramienta de programación.

1.5. Limitantes.

- Acceso a bibliografías referentes al tema.
- No se consideran las propiedades del suelo para la evaluación del fenómeno de amplificación.
- Acceso a equipos informáticos.

Capítulo II

EFECTOS SECUNDARIOS DE ACTIVIDAD SISMICA.

2.1. Introducción.

Al ocurrir un evento sísmico, existen daños asociados a ellos de forma directa, relacionados al movimiento que sufre el suelo como vibraciones o rompimientos superficiales; y de forma indirecta, tales como avalanchas, flujos de tierra, asentamientos diferenciales del suelo, licuefacción y deslizamientos; éstos últimos pueden ser consecuencias de las amplificaciones sísmicas que se da en un terremoto por lo que es necesario definir la susceptibilidad ante este fenómeno. Este capítulo muestra los conceptos básicos relacionados a efectos secundarios presentes en un determinado sismo.

2.2. Amplificación sísmica.

2.2.1. Definición.

Cuando las ondas sísmicas pasan de un depósito a otro con características diferentes éstas tienden a crecer, disminuyendo la frecuencia e incrementando la amplitud, todo esto sucede por que la energía trata de conservarse. La magnitud de la amplificación depende del espesor de la cobertura de suelos, de las propiedades de éste y el tipo de sismo. Su mayor valor ocurre cuando el suelo empieza a resonar bajo la influencia de la onda sísmica.

2.2.2. Factores que describen la amplificación sísmica.

Se distinguen dos tipos de factores: zonales y factores lineales o puntuales.

Factores zonales.

Factores de origen geológico que influyen en el contorno de un área sobre la respuesta sísmica del terreno. Factores de este tipo son los factores litológico, topográfico e hidrológico.

a) Factor litológico.

Factor que define la influencia que el tipo de roca o suelo tiene en la amplificación de las ondas sísmicas. La respuesta sísmica de los distintos materiales es función de su calidad, y se agrupan de la siguiente manera:

- Rocas duras, incluyen formaciones compuestas por rocas de resistencias altas, es decir, con un valor de la resistencia a la compresión simple superior a 350-400 kg/cm2. Litológicamente, son rocas graníticas y volcánicas, pizarras, calizas, grauvacas, areniscas, conglomerados y brechas calizas.

- Formaciones compuestas por rocas duras (areniscas y conglomerados) y rocas blandas (arcillas y margas); presentan desigual resistencia y generalmente son de edad terciaria (eoceno y oligoceno).

- Rocas blandas, están constituidas por las margas del eoceno, cuya resistencia a compresión simple suele ser inferior a 350 kg/cm2.

- Suelos, constituido por gravas, arenas, arcillas y limos con distinto grado de compacidad y de proporciones relativas.

b) Factor topográfico.

Factor que expresa la influencia que la topografía tiene en la amplificación de las ondas sísmicas y puede mostrar un efecto que puede ser amplificador o atenuador, este factor tiene en cuenta la pendiente, la diferencia de altura, así como el tipo de unidad morfológica presente en el área de estudio.

Si es muy pronunciada, puede incrementar el efecto de amplificación, por otra parte la vibración en la cima de una colina podrá ser mayor que la que ocurre en la base.

Se han realizado análisis teóricos [Vogt, 1987], cuyos resultados indican que ciertas formas o situaciones topográficas muestran hasta varios grados de amplificación respecto a las áreas circundantes.

En los bordes de los valles o 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, en fondos de valle. Asimismo las pendientes y las alturas de desniveles influyen en los efectos de amplificación de las ondas sísmicas. Siguiendo estos conceptos, se han definido un conjunto de situaciones o formas topográficas cuyo comportamiento es significativo, en la respuesta de una sacudida sísmica. [Ponce De León *et al*, 2003: p. 161]:

- Áreas con pendientes menores de 20°
- Áreas con pendientes comprendidas entre 20° y 50°, colinas aisladas, formas topográficas acarcavadas.
- Bordes de mesetas, zonas próximas a divisorias pronunciadas.
- Áreas con pendientes mayores de 50° y desniveles menores de 50 metros.
- Áreas con pendientes mayores de 50° y desniveles mayores de 50 metros.

Por otra parte según Boore [1972], los taludes también son influenciados por la amplificación por topografía; en la parte alta de éste y a lo largo de los lados, puede ocurrir amplificación y atenuación dependiendo de la geometría del talud y la frecuencia del movimiento. La amplificación puede presentar un valor hasta del 100%.

La figura 2.1 muestra el efecto que tiene la topografía sobre el comportamiento sísmico de los suelos, se observa un aumento en la cuantía de daños en edificaciones localizadas en la cima de colinas y en borde de valles, comparadas con edificaciones similares en terreno plano; un efecto atenuador, en cambio se registra instrumentalmente en los fondos de los valles.

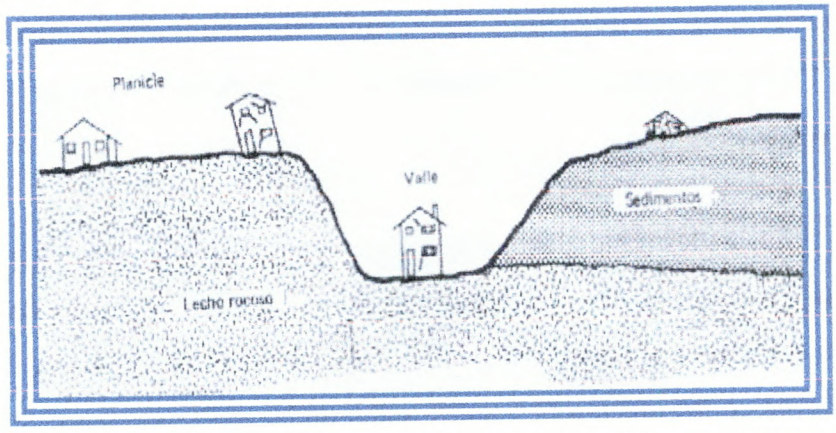

Figura 2.1. Efecto de la topografía sobre la intensidad del movimiento del terreno. [Sauter, 1989: p. 149].

c) Factor Hidrológico.

El contenido de humedad, las presiones intersticiales y la presencia de nivel freático próximo a la superficie constituye también un agente de amplificación de las ondas sísmicas. Su mayor incidencia es en la época lluviosa, en la que el nivel se encontrará más superficial.

Factores lineales o puntuales.

Dentro de esta clasificación se tienen los elementos tectónicos, tales como fallas u cabalgamientos, que constituyen discontinuidades en los que pueden darse efectos de amplificación; y los elementos topográficos de carácter lineal o puntual que por sus características, constituyen formas asociadas a fenómenos de amplificación, como por ejemplo, divisorias pronunciadas, escarpes acusados, crestas, formas topográficas en punta.

2.3. Susceptibilidad sísmica.

2.3.1. Definición.

Fórmula la probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como un sismo, y se puede evaluar de dos formas diferentes:

a) Sistema de la experiencia.

Se utiliza la observación directa de la mayor cantidad de fenómenos, tales como derrumbes, deslizamientos, amplificaciones, entre otros; ocurridos en el área de estudio y se evalúa la relación que éstos presentan con la geomorfología del terreno.

b) Sistema teóricos.

Se plantea en un mapa el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de los fenómenos antes mencionados y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores.

2.3.2. Factores que describen la susceptibilidad.

Algunos estratos son susceptibles a fallar por acción de un evento sísmico. Para comprender la susceptibilidad sísmica, deben tenerse en cuenta los siguientes factores: subsidencia sísmica, fragilidad, licuefacción, dilatancia, efecto topográfico y rellenos.

Subsidencia sísmica.

Se debe principalmente al gran volumen de poros y a la poca cementación de la estructura de los materiales depositados por el viento o agua, a la presencia de macroporos, de tamaño mayor a la de la partícula. Generalmente la cementación entre partículas es pobre.

La susceptibilidad a la subsidencia sísmica, puede analizarse a través de ensayos de consolidación dinámica, con un equipo de compresión triaxial dinámica. Cuando el esfuerzo dinámico alcanza el esfuerzo dinámico crítico (CDS), la estructura del suelo colapsa.

Fragilidad.

Algunos materiales relativamente duros tienden a desmoronarse en un evento sísmico, debido generalmente, a la fragilidad del suelo. Esta situación es común en suelos residuales fracturados, ocurre en materiales cementados muy porosos como la piedra pómez, en la cual la presencia de grandes poros facilita la deformación interna de las partículas.

Un caso común de falla en eventos sísmicos corresponde a los taludes de fuerte pendiente en suelos granulares no muy cementados, estas fallas ocurren a tensión produciéndose grandes grietas, las cuales producen deslizamientos de tierra, las grietas de tensión aparecen entre 15 y 30 metros detrás de la corona en taludes hasta de 100 metros de altura.

Licuefacción.

Es la facilidad con que un suelo puede perder toda su resistencia al cortante y comportarse como un líquido. Esta susceptibilidad es propia de los limos o arenas no cementados saturados que se encuentran a poca profundidad. Los rellenos aún compactados son materiales muy susceptibles a licuefacción. Para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuefacción, existen varios criterios [Kramer, 1996]:

a) Criterio geológico.

Los depósitos de suelo que son susceptibles a licuefacción son los materiales uniformes granulares sueltos tales como depósitos fluviales, coluviales, y eólicos saturados. La licuefacción se ha observado en playas y otros depósitos de semigravedad.

La susceptibilidad a la licuefacción de depósitos antiguos es generalmente menor que la de los depósitos nuevos. Suelos del holoceno son más susceptibles que los suelos del pleistoceno.

La licuefacción solamente ocurre en suelos saturados, por lo tanto la profundidad del nivel de agua influye en la susceptibilidad de ésta, es más común en los suelos donde el nivel freático se encuentra subsuperficial. Los rellenos o depósitos hechos por el hombre en estado suelto son los más susceptibles a este fenómeno.

b) Criterio composicional.

La forma, tamaño y gradación de las partículas influye en la susceptibilidad a la licuefacción. La plasticidad tiene un mayor efecto que el tamaño de granos, los suelos no plásticos son muy susceptibles a la licuación, especialmente los limos y las arenas finas. Las gravas también son susceptibles, aunque en menor proporción que las arenas.

La susceptibilidad a la licuefacción también es influenciada por la gradación. Los suelos bien graduados son menos susceptibles que los suelos pobremente graduados; los suelos de partículas redondeadas son más susceptibles que los suelos con granos angulares.

c) Criterio de estado.

La susceptibilidad a la licuefacción depende del estado en que se encuentre el material, esfuerzos, densidad, relación de vacíos. La licuefacción puede ocurrir en una masa de suelo, en una superficie o línea de falla en las cuales los esfuerzos de cortante son el factor preponderante. En el primer caso, la licuefacción tiene como resultado un cambio de volumen o asentamiento y en el segundo, se produce un deslizamiento o falla al cortante.

Dilatancia.

La deformación asociada con un esfuerzo sísmico es muy importante en suelos granulares y en los enrocados de grandes presas. Se observa en presas de enrocado que la aceleración en la parte superior del terraplén es varias veces mayor que la aceleración en su base y en ocasiones excede el coeficiente sísmico de diseño. Lo que ocurre en estos casos es que el conjunto de partículas gruesas que conforman el enrocado es muy resistente a la

deformación y aunque se presenta un estado crítico de aceleración, la deformación generada no alcanza a producir la falla del terraplén.

Amplificación por efecto topográfico.

La influencia de la topografía en la intensidad del movimiento, se podrá observar en registros simultáneos de varias réplicas en un terremoto, es decir la secuencia de sismos ocurridos después del evento principal, con sismógrafos instalados en la cima y cresta de una colina, éstos mostrarán claramente la amplificación del movimiento respecto a sismogramas del mismo evento registrados en estaciones situadas en un valle, con suelos rocosos que sirvan como referencia.

Los factores que influencian la intensidad del movimiento cerca de discontinuidades topográficas son varios, generalmente esta el ángulo de incidencia y el tipo de las ondas sísmicas, la longitud de onda y la geometría de la aspereza topográfica.

En valles la amplificación esta relacionada con el ancho de la depresión, en los bordes será mayor si la longitud de onda sísmica es menor que el doble del ancho del valle.

Comportamiento de rellenos en caso de sismos.

Los rellenos son materiales muy susceptibles a sufrir daño en el caso de sismos. La mayoría de los estudios sobre el comportamiento de rellenos han sido dirigidos a presas de tierra, y muy pocos estudios al comportamiento de rellenos sobre laderas, y específicamente McClure [1973], encontró que ocurren más fallas en suelos de relleno que en taludes naturales. Algunos de los rellenos más susceptibles son los rellenos de suelos residuales compactados, tales como el granito meteorizado, materiales en los cuales se produjeron fallas catastróficas en el sismo de Kobe [Sassa, 1996].

Los principales problemas de rellenos asociados con sismos son los siguientes:

- Agrietamiento cosísmico, debido a la falta de resistencia a la tensión.

- Asentamientos por baja densidad.
- Mayor susceptibilidad a la licuefacción que los suelos naturales.

Los rellenos son muy susceptibles a agrietarse en el momento de un sismo o a deformarse vertical y horizontalmente sufriendo asentamientos diferenciales. Los rellenos de tierra armada resisten en mejor forma los movimientos sísmicos que los rellenos comunes.

2.4. Efectos de sitio.

Los efectos de sitio son definidos como amplificación del suelo, licuación, deslizamiento y falla local. El principal efecto de sitio que se espera en un sismo es la amplificación sísmica.

El único efecto de sitio que no se ha definido hasta el momento es el deslizamiento, el cual se define como un movimiento de una masa de roca, detritos o tierra pendiente abajo, bajo la acción de la gravedad, cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material.

La ocurrencia de los deslizamientos es consecuencia de un complejo campo de esfuerzos que está activo en una masa de roca o de suelo en la pendiente. Los parámetros determinantes son el incremento del esfuerzo de corte y la disminución de la resistencia del material.

El incremento en el esfuerzo de corte se debe a una remoción de la base, ya sea por erosión, deslizamientos previos, cortes de carreteras y canteras; incremento de carga por peso de la lluvia, nieve, rellenos, vegetación; incrementos de presiones laterales como presiones hidráulicas, raíces, expansión de arcilla; movimientos transitorios como terremotos, vibraciones de camiones, maquinaria, explosiones; inclinación regional como movimientos geológicos.

En cuanto a la reducción de la resistencia del material se podrá dar, por cambios en las fuerzas intergranulares del suelo como la presión de los poros de agua, cambios en la estructura.

La actividad de deslizamientos se debe al incremento de urbanizaciones y desarrollo en áreas propensas a deslizamientos; a deforestaciones masivas; incremento de la precipitación regional causada por los cambios de los patrones climáticos.

Capítulo III

METODOLOGIAS EMPLEADAS PARA DETERMINAR AMPLIFICACION SISMICA POR EFECTO TOPOGRAFICO.

3.1. Introducción.

El presente capitulo trata de implementar las bases teóricas de los modelos propuestos por AFPS [1995], Kramer [1996] y EUROCODIGO [1998], en un sistema de información geográfica, definiendo las variables involucradas de cada uno de ellos para su respectiva generación, el resultado obtenido muestra factores de amplificación, los cuales se utilizaron y en algunas ocasiones se restringieron para identificar áreas propensas a sufrir amplificación por efecto topográfico.

3.2. Modelo de las AFPS.

3.2.1. Base teórica.

Las AFPS [1995], en sus códigos de diseño consideran las amplificaciones sísmicas por los efectos topográficos, asociando dicha amplificación a los cambios de pendientes que se pueden dar en un perfil del terreno, tal como se muestra en la figura 3.1.

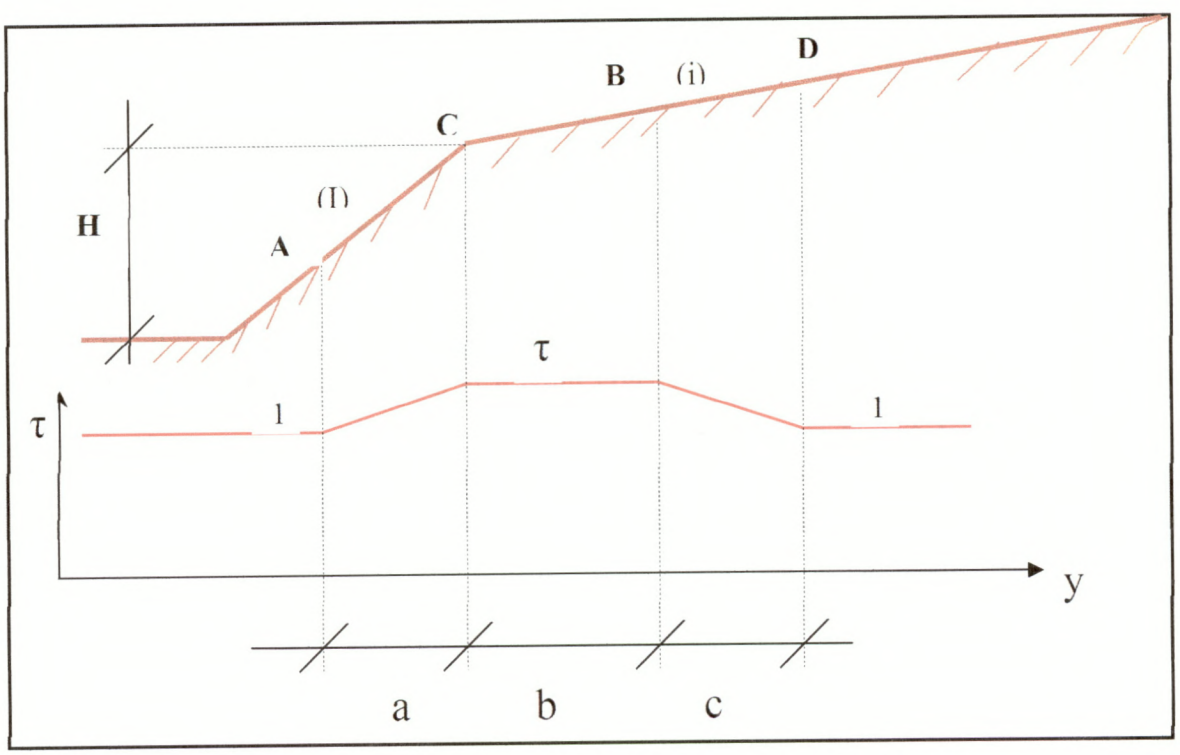

Figura 3.1. Variación del factor de amplificación en el espacio. AFPS [1995].

Donde:

I = pendiente mayor en el perfil de estudio, en radianes.

i= pendiente menor en el perfil de estudio, en radianes.

C = punto donde ocurre el cambio de pendiente (I-i).

H = altura desde la base hasta el punto donde se da el cambio de pendiente.

τ= factor de amplificación.

a,b,c= distancias que delimitan la variación del factor de amplificación en el terreno.

A, B, D = puntos que delimitan el inicio de las distancias a, b, c.

El valor de amplificación queda determinado de la siguiente manera:

$\tau = 1$ Para $I-i \leq 0.4$ (Ec. 3.1).

$\tau = 1+0.8*(I-i-0.4)$ Para $0.4 \leq I-i \leq 0.90$ (Ec.3.2).

$\tau = 1.40$ Para $I-I \geq 0.90$ (Ec. 3.3)

$a = H/3$ (Ec. 3.4)

$c = H/4$ (Ec. 3.5)

$b = (H+10)/4$ ó $20I$ (el menor) (Ec. 3.6)

La máxima amplificación esperada es desde el punto donde se da el cambio de pendiente hasta una distancia b, a partir de ahí se considera que este valor de amplificación decrece hasta ser la unidad; decrecimiento que se extiende en distancias a y c.

Si el cambio de pendiente es menor que 0.4 radianes, entonces se considera que no existe amplificación, por lo tanto el valor de τ sería igual a la unidad; el máximo factor que se puede presentar es 1.4, es decir que las ondas sísmicas se pueden amplificar por los efectos de la topografía hasta un 40%.

3.2.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2.

Para definir el valor de amplificación que proponen las AFPS [1995] dado en la expresión: $\tau = 1+0.8*(I-i-0.4)$, es necesario crear un mapa de pendientes en radianes tal como se

plantea en el anexo B, y generar el cambio de pendiente I-i, por medio de un operador de vecindad (nbmax-nbmin), el cual busca entre los 8 píxeles a su alrededor el píxel de mayor y menor pendiente para restarlos, obteniendo así el mapa con factores de amplificación tal como se observa en la figura 3.2.

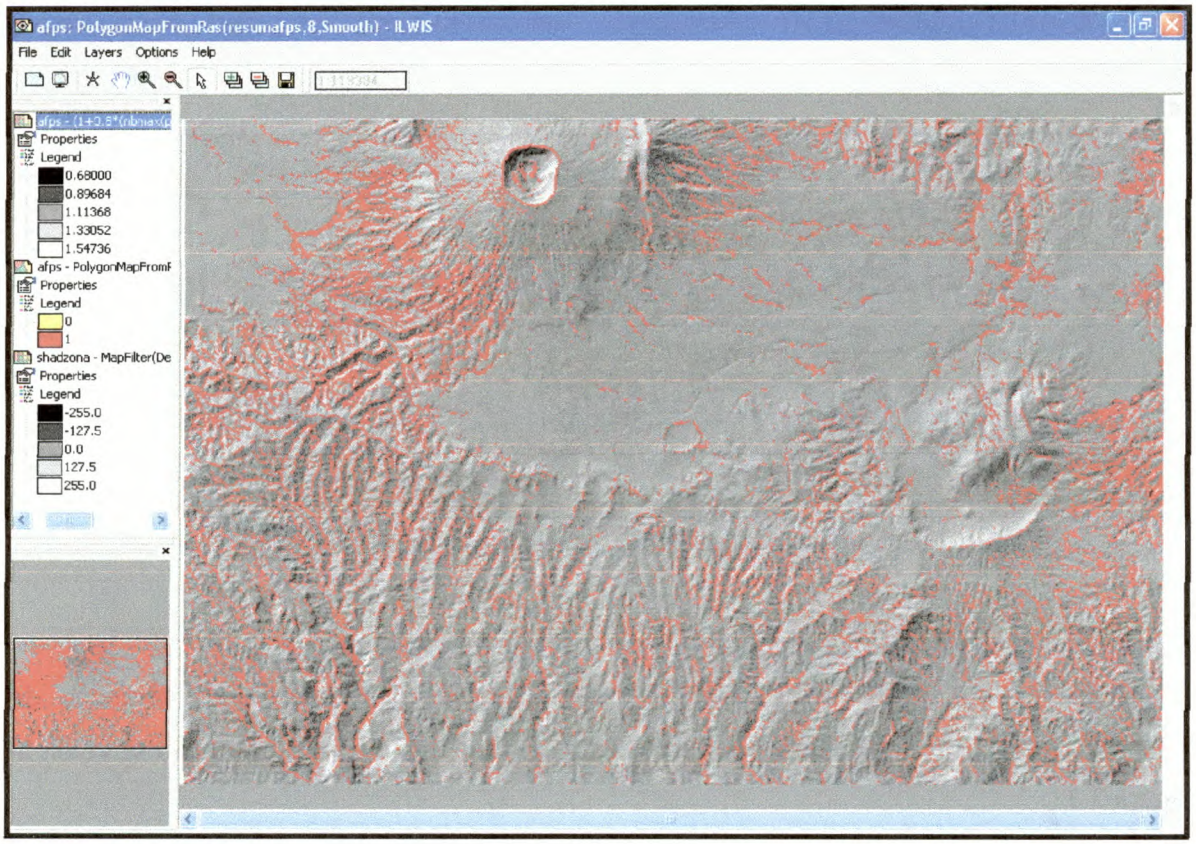

Figura 3.2. Factores de amplificación que plantean las AFPS [1995].

De los resultados obtenidos se registraron valores menores a la unidad (factores de atenuación sísmica), los cuales podrán eliminarse condicionando la operación de la siguiente manera: iff((afps>=1.0)and(afps<=1.54736),afps,undef), es decir que el programa solamente tomará su valor calculado si se encuentra dentro de un rango de 1-1.54735, en otro caso lo asignará como indefinido (undef), ver figura 3.3.

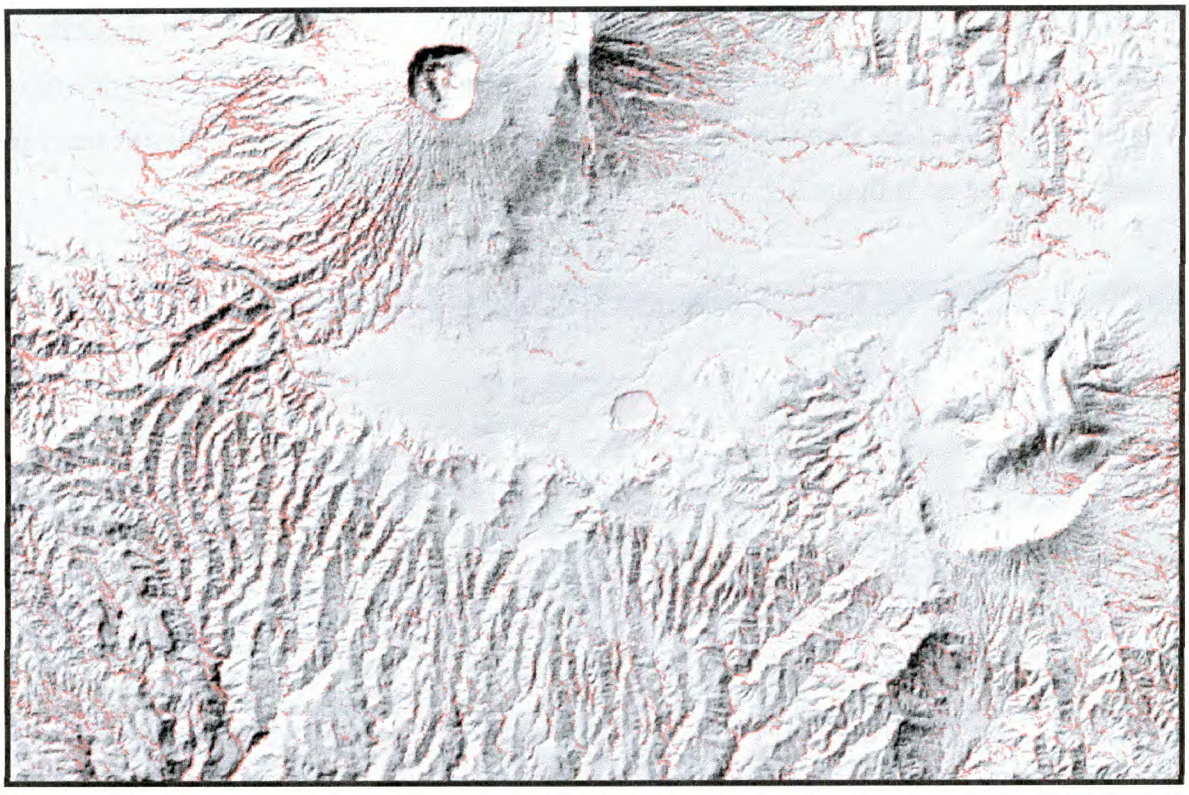

Figura 3.3. Zonas de amplificación sísmica por las AFPS [1995].

Las AFPS [1995], atribuyen la amplificación sísmica a los cambios de pendientes bruscos, excluyendo zonas como depresiones en quebradas las cuales se da el fenómeno de atenuación; pero en el modelo creado se están incluyendo estos casos, tal como se ve en la figura 3.3.

Con el propósito de minimizar este problema se generó un mapa de la red local de drenaje a partir del modelo de elevación digital; para ello se extendió una distancia de 10metros a cada lado de la línea central del drenaje creado (buffer) utilizando el programa Arcview. Como resultado se obtuvo un mapa que posee valores indeterminados en zonas donde no existen quebradas y valores de 10 en donde éstas si existen, es decir que se generan ríos con un ancho promedio de 20 metros, figura 3.4.

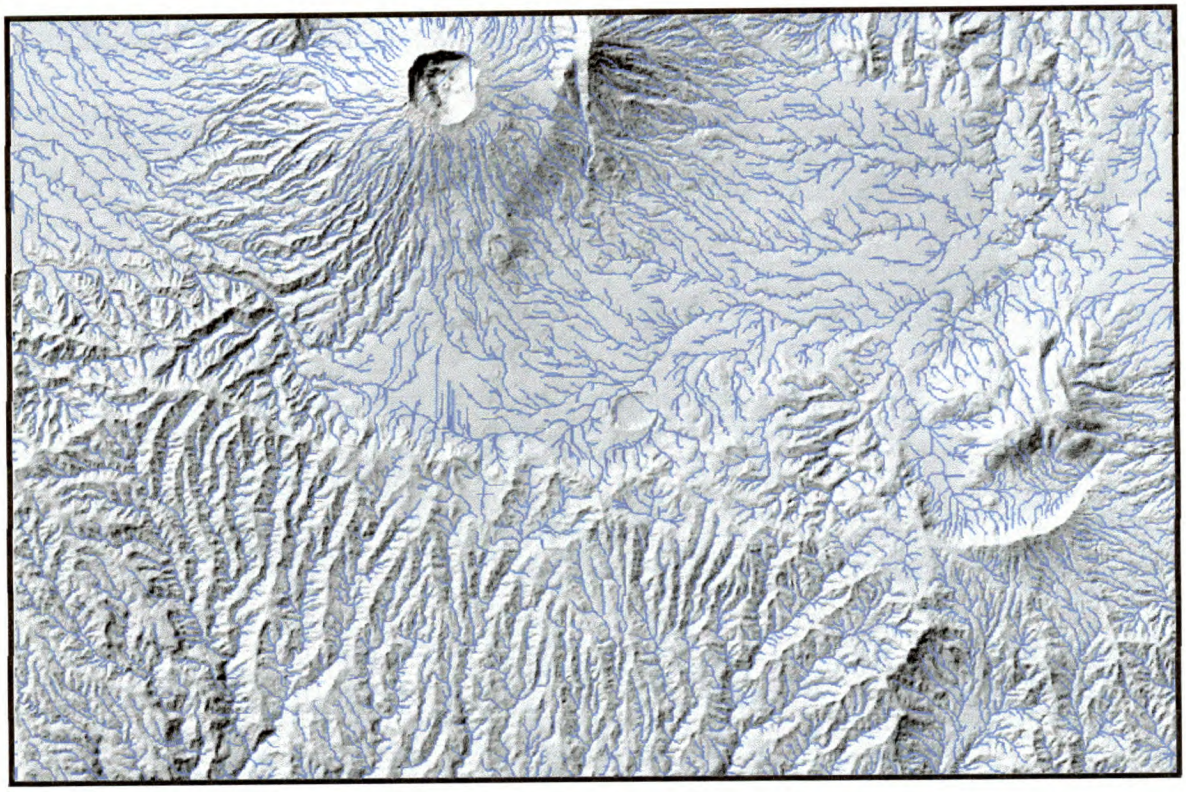

Figura 3.4. Ubicación de la red de drenaje.

Una vez establecida la red de drenaje, se modificó el mapa de pendientes, con la siguiente condicionante: extra=iff(isundef(buffernew),pendrad,undef), en donde los píxeles ubicados en ríos tendrán valores indefinidos, de lo contrario tendrán las pendientes que les corresponden, (figura 3.5).

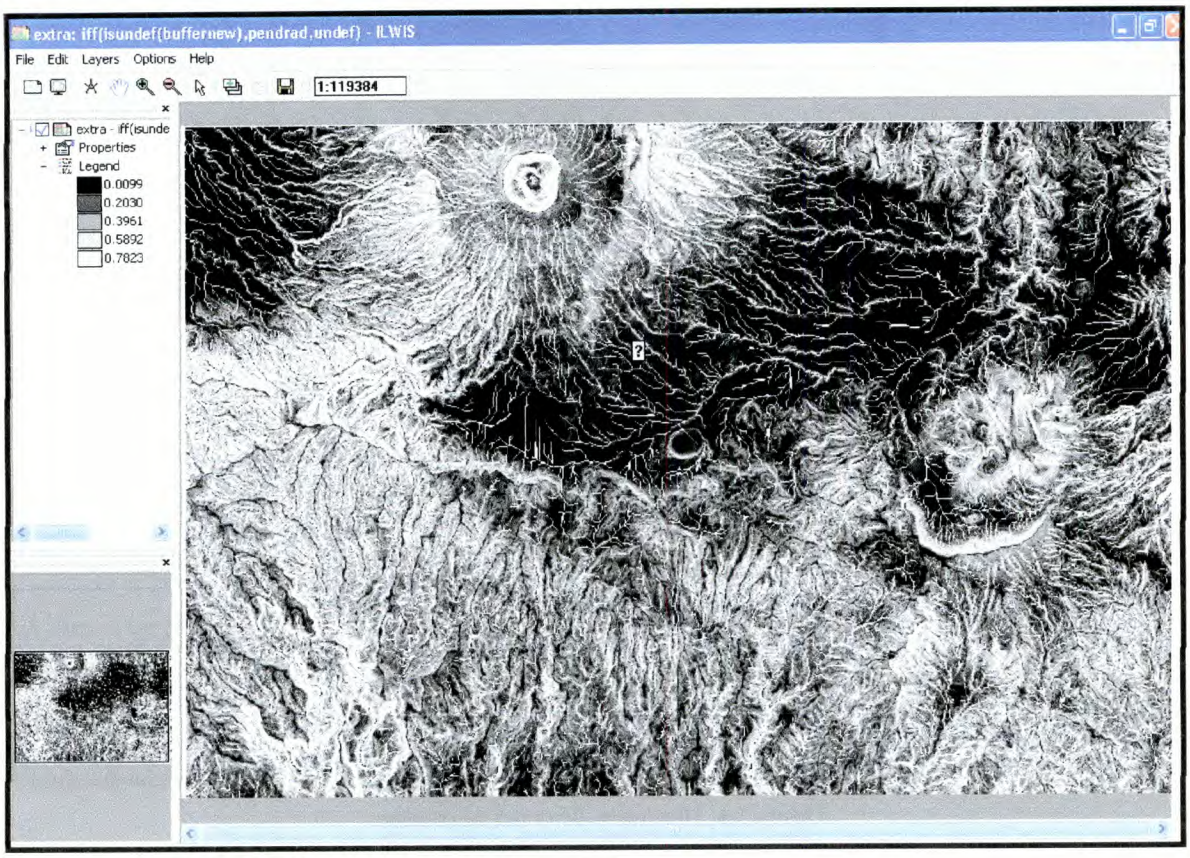

Figura 3.5. Valores indefinidos en los píxeles ubicados en las quebradas.

Con el cambio antes descrito se procedió a ejecutar el modelo nuevamente, utilizando el operador de vecindad: nbmax-nbmin, explicado anteriormente en este mismo apartado, el mapa generado utiliza la operación siguiente:

taunew=iff(isundef(extra),undef,(1+0.8*(nbmax(extra#)-nbmin(extra#)-0.4))).

El resultado identifica zonas de posibles amplificaciones en las cuales están incluidas irregularidades en el terreno como depresiones que no pertenecen a la red de drenaje creada. Se eliminaron nuevamente los valores menores a la unidad tal como se explicó anteriormente en este apartado, y se obtuvo las zonas propensas de tener amplificación al momento de un sismo, tal como se puede observar de la figura 3.6.

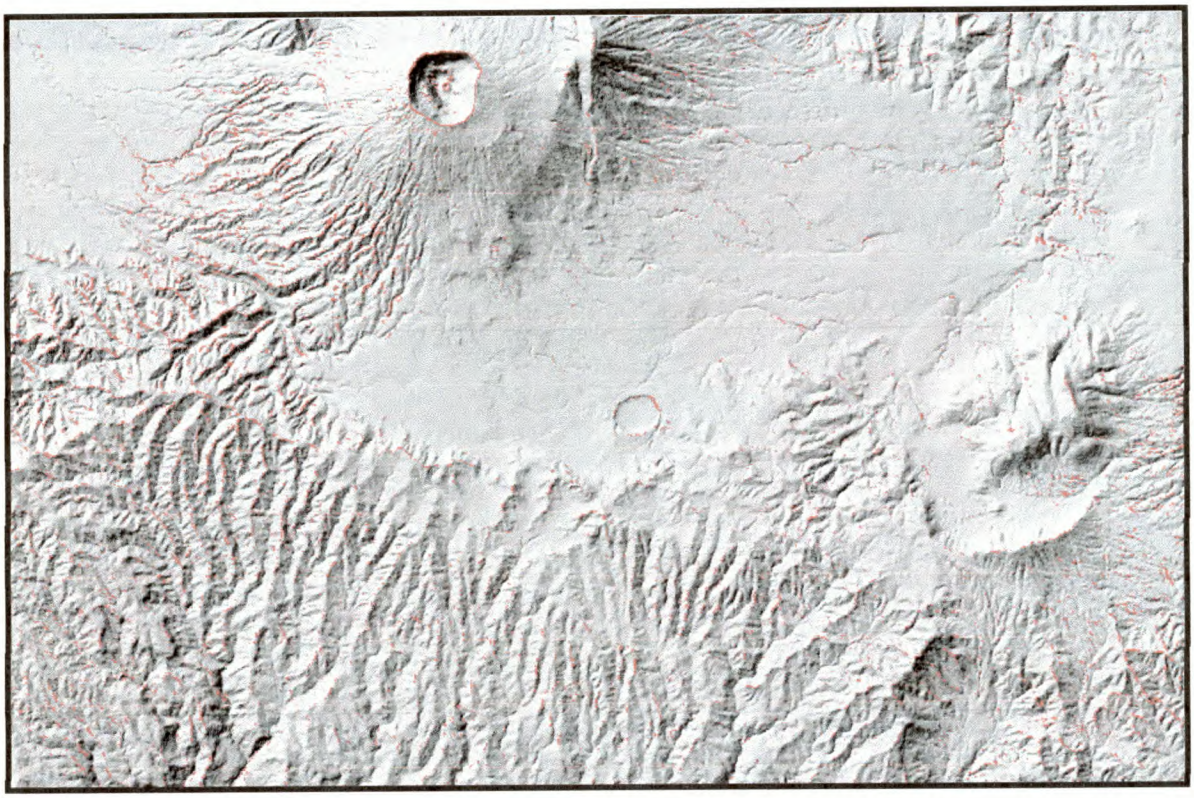

Figura 3.6. Zonas de posible amplificación en cambios bruscos de pendientes.

Con estos cambios se observa más congruencia con lo expuesto en las AFPS [1995], ya que se plasman todas aquellas zonas con cambios bruscos de pendientes mayores o iguales a 22.9183°, es decir se distinguen una serie de riscos o crestas que teóricamente son susceptibles a la amplificación por irregularidades topográficas.

Cambios al modelo.

Con el objeto de investigar si ocurren modificaciones significativas al variar las pendientes del modelo, se realizó un mapa que toma en cuenta cambios de inclinaciones mayores a 10° (valor que muestra la transición entre la planicie y ladera suave tal como lo plantea Ritter. [1986: p.145]), modificando la operación de la siguiente manera: $\tau = 1+0.8*(I-i-0.2)$, la metodología a seguir en la creación del tal mapa, es similar a lo expuesto en el apartado 3.1.2, ver el resultado en la figura 3.7.

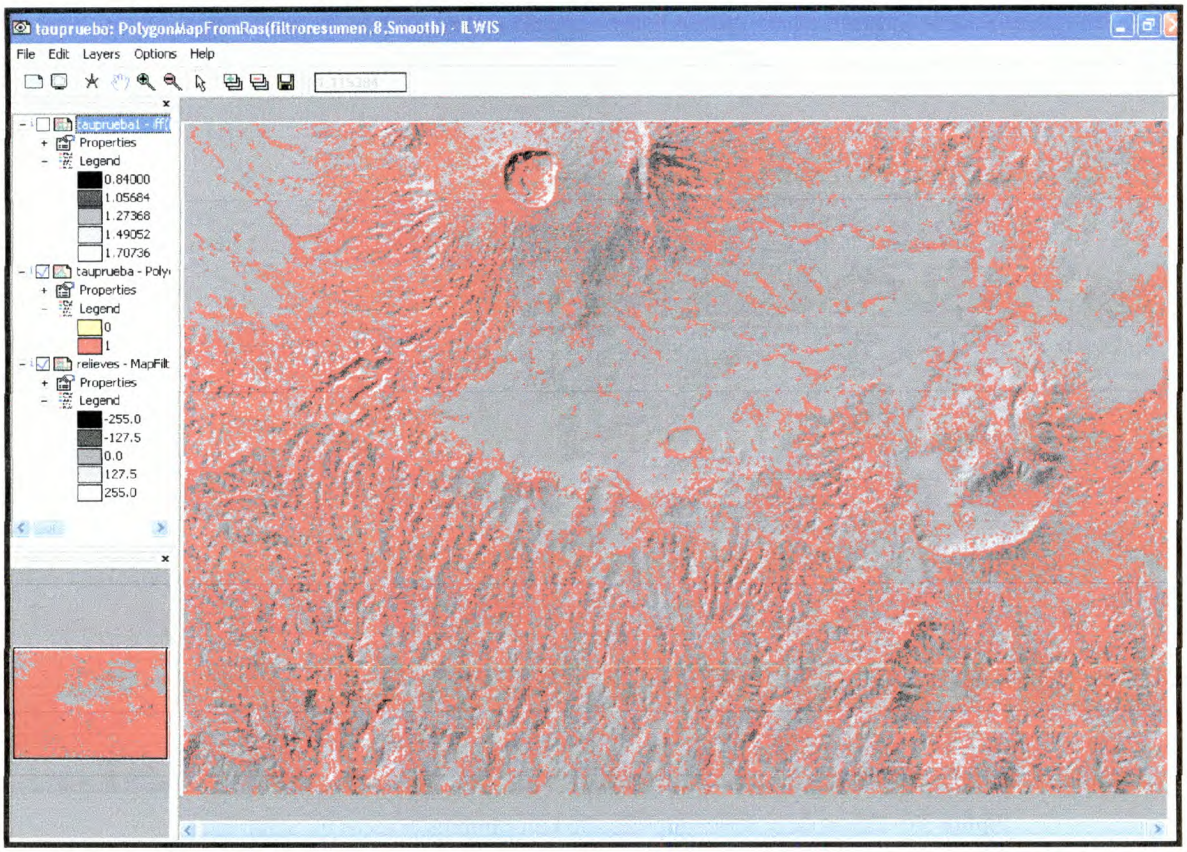

Figura 3.7. Factores de amplificación, con cambios bruscos en pendientes de 10°.

Al restringir los valores de amplificación (tal como se explicó anteriormente en este apartado), se obtienen las posibles zonas en que se dará la amplificación en el momento de un sismo, ver figura 3.8.

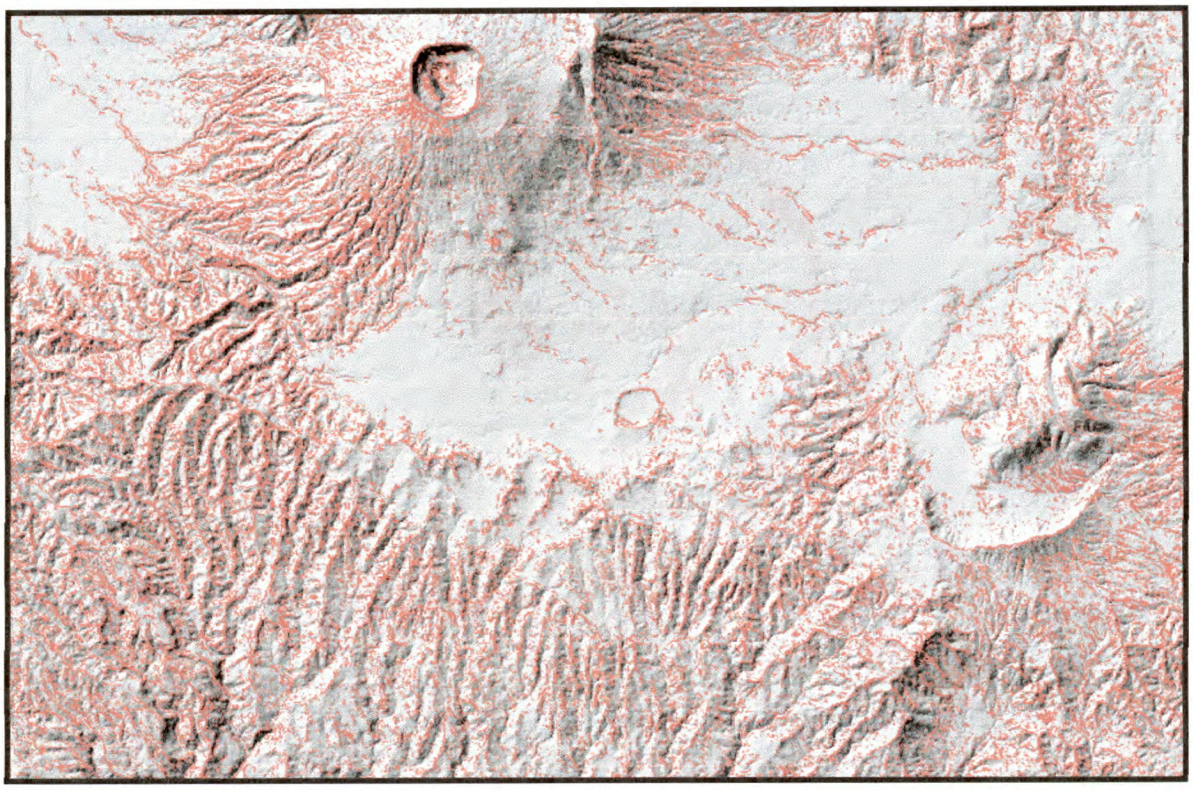

Figura 3.8. Zonas susceptibles a la amplificación sísmica.

De los acercamientos hechos en diferentes zonas del área de análisis, se puede observar que con los cambios realizados se identifican más áreas como susceptibles a la amplificación sísmica. Las figuras 3.9 y 3.10 muestran las amplificaciones que se dan en el cráter del volcán de San Salvador aplicando ambos modelos.

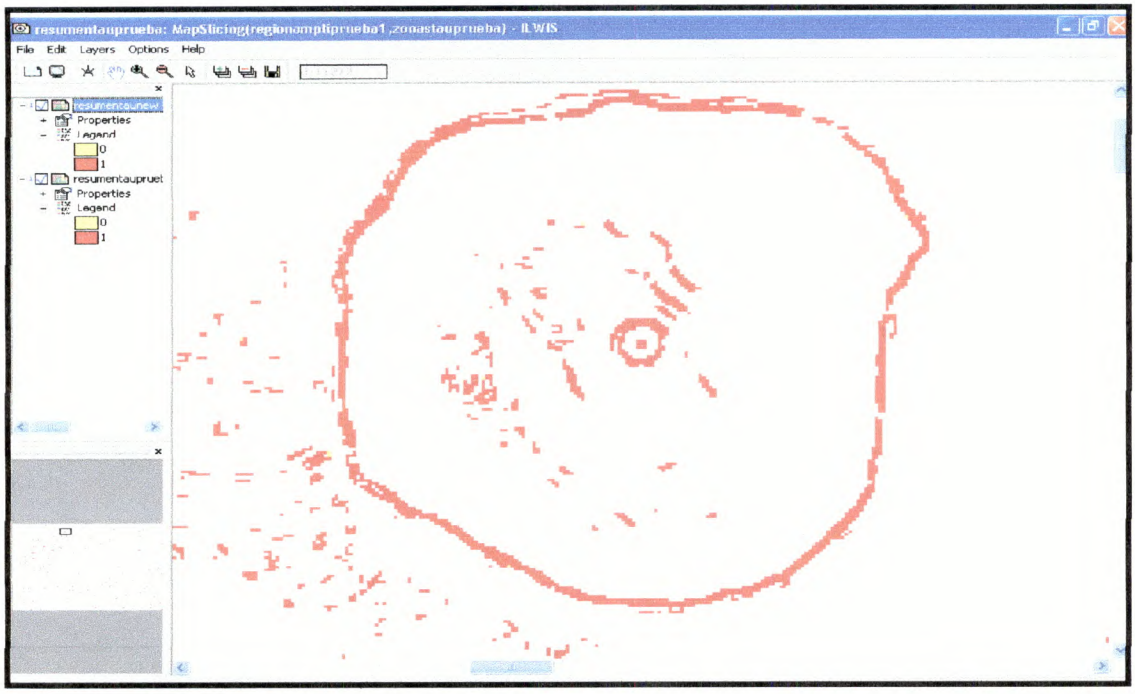

Figura 3.9 Zonas probables de amplificación sísmica, según AFPS [1995].

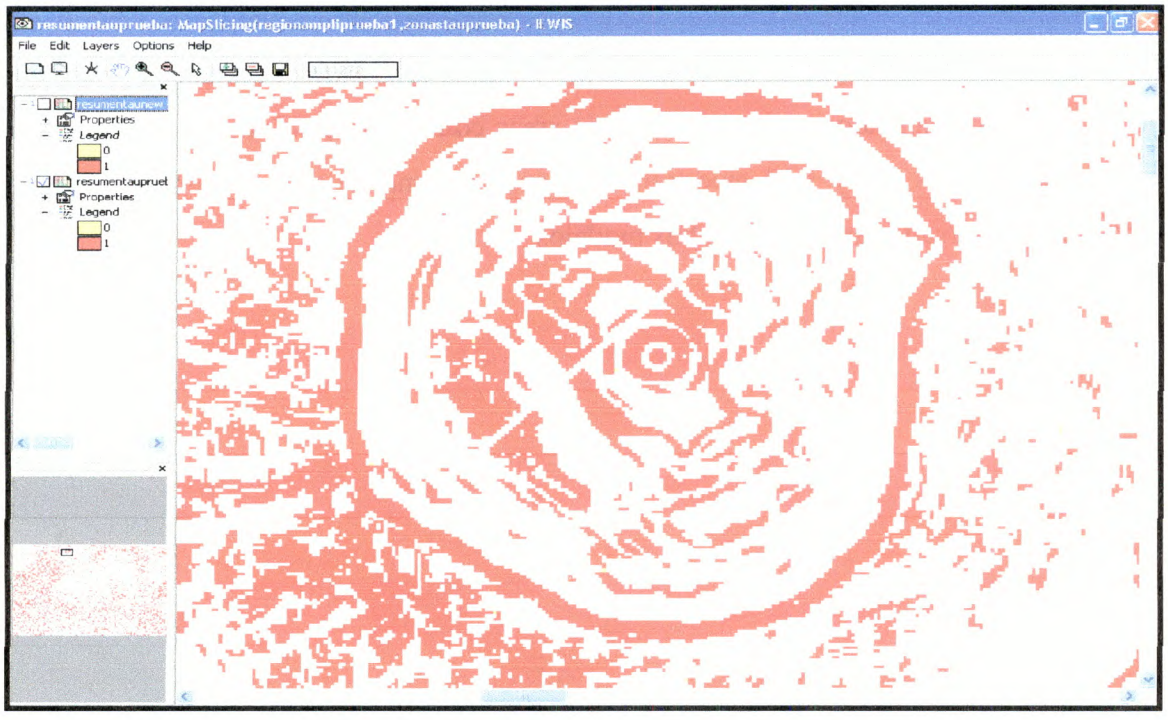

Figura 3.10. Zonas probables de amplificación sísmica, modificando los cambios bruscos de pendientes a 10° según modelo AFPS [1995].

En el anexo C, se encuentra un flujograma que resume la generación básica de este modelo.

3.2.3. Discusión.

De los resultados obtenidos a partir de la generación del modelo, surgen preguntas como ¿Son los resultados obtenidos los esperados?, ¿Se consideraron todas las variables propuestas por el método?, ¿Se puede mejorar el método?

Con respecto a la primera inquietud se puede decir que en general los resultados fueron los esperados, pero hubo pequeños detalles que no se pudieron superar, tal es el caso de identificar como susceptible zonas ubicadas en las depresiones del terreno donde teóricamente se espera atenuación sísmica. Además no se pudo involucrar todas las variables propuestas por el método tal como la definición de la altura (H), que es utilizada para generar la distancia a la cual se extiende la máxima amplificación (distancia b de la figura 3.1).

Como mejorar el método es la pregunta más interesante; se propone crear un filtro que elimine en el modelo la identificación de amplificación en las depresiones del terreno (propuesta que será explicada en el capitulo 4 inciso 4). Implementar la variable de la altura para poder definir la distancia a la cual se extiende la máxima amplificación sísmica; para ello será necesario hacer un programa que calcule dicha altura (ver anexo G) y que a partir de los lugares donde se da la máxima amplificación (punto "c" de la figura 3.1) se extienda la distancia "b" propuesta por el método (ver figura 3.1). Se pretendió generar un mapa de distancias (buffer) pero este se extiende igual magnitud a ambos lados a partir de los puntos identificados con máxima amplificación. Lo cual no es consistente con la teoría.

3.3. EUROCODIGO.

3.3.1. Bases teóricas del modelo.

La influencia de la topografía y geomorfología en la respuesta sísmica del terreno está recogida en el Eurocódigo [1998], en donde se considera factores de amplificación debidos a la topografía del terreno, para ser aplicados a la acción sísmica de aquellas estructuras importantes construidas sobre o cerca de taludes de gran inclinación, tales factores son

aplicados a las fuerzas de inercia sísmica determinadas a partir de un método simplificado pseudo-estático, en ambas direcciones.

Para determinar cuando será aplicado el factor a dichas fuerzas, el EUROCODIGO [1998] establece los siguientes criterios:

- Deberán aplicarse preferentemente cuando los taludes presenten irregularidades topográficas bidimensionales, es decir crestas y acantilados ambos con alturas mayores a 30 metros y cuyos ángulos de pendiente media sean mayores a 15°.

- En el caso que existan terrenos con pendientes menores y presenten irregularidades fuertes, será recomendable realizar un estudio específico.

El método establece una serie de valores para factores de amplificación en función de las formas del terreno, pero estos valores son indicativos, de tal manera que cada país deberá revisarlos y aplicar los valores que estime conveniente de acuerdo a sus normas de diseño sísmico.

Dentro de las formas establecidas se encuentran laderas y acantilados aislados, con un factor de amplificación de 1.2 aplicados en los emplazamientos próximos al borde superior. Los crestones con anchura en la parte superior relativamente menor que la base, le corresponde un factor de 1.4 aplicado cerca de la parte superior de la ladera y cuya pendiente media sea mayor a 30°, si son menores el factor disminuirá a 1.2. Si un talud posee algún tipo de capa floja superficialmente, con espesor mayor a 5 metros, el factor que aplique de acuerdo a lo mencionado anteriormente deberá incrementarse en un 20%. Los factores antes mencionados son valores dados en la parte alta del talud, se podrá suponer que decrecerán linealmente con la altura, hasta llegar a la unidad en la base.

3.3.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2.

Al modelar en ILWIS el método planteado por el EUROCODIGO [1998], se necesitan definir dos parámetros importantes: las pendientes del terreno y sus alturas.

Las pendientes se determinaron tal como lo plantea el anexo B. Es importante destacar que tales pendientes tendrán que estar calculadas en grados, ver figura 3.11.

Figura 3.11. Pendientes en grados a partir del modelo de elevación digital.

Para definir una clasificación de las formas topográficas de interés, que incluya la geomorfología del terreno, se hizo una reclasificación (dominio), planteada en el anexo D, la figura 3.12 muestra el resultado.

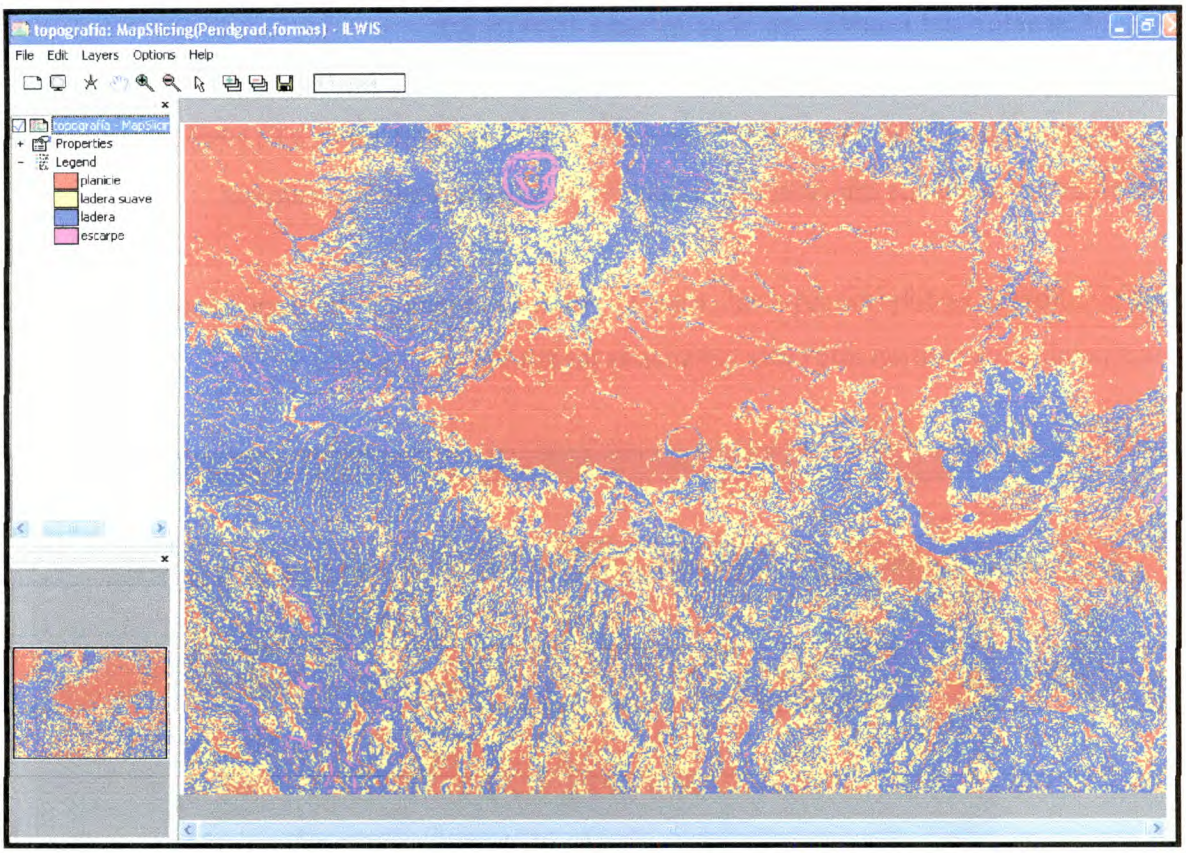

Figura 3.12. Formas topográficas a analizar.

La ultima variable para aplicar el modelo, es la altura, definida por medio de una diferencia en las cotas del modelo digital de elevación, utilizando un operador de vecindad (ver inciso 3.1.2) es decir el programa busca entre los 8 píxeles de su entorno la de mayor elevación y la resta con la de menor elevación, obteniendo así la cota deseada, se definió con el nombre de "h", tal como se muestra en la figura 3.13.

Figura 3.13. Elevaciones del modelo digital.

Finalmente se elaboró el modelo, planteando las condiciones de altura para taludes mayores a 30 metros; ángulos de pendientes promedios de 15°, con formas topográficas tales como laderas y escarpes, ver figura 3.14.

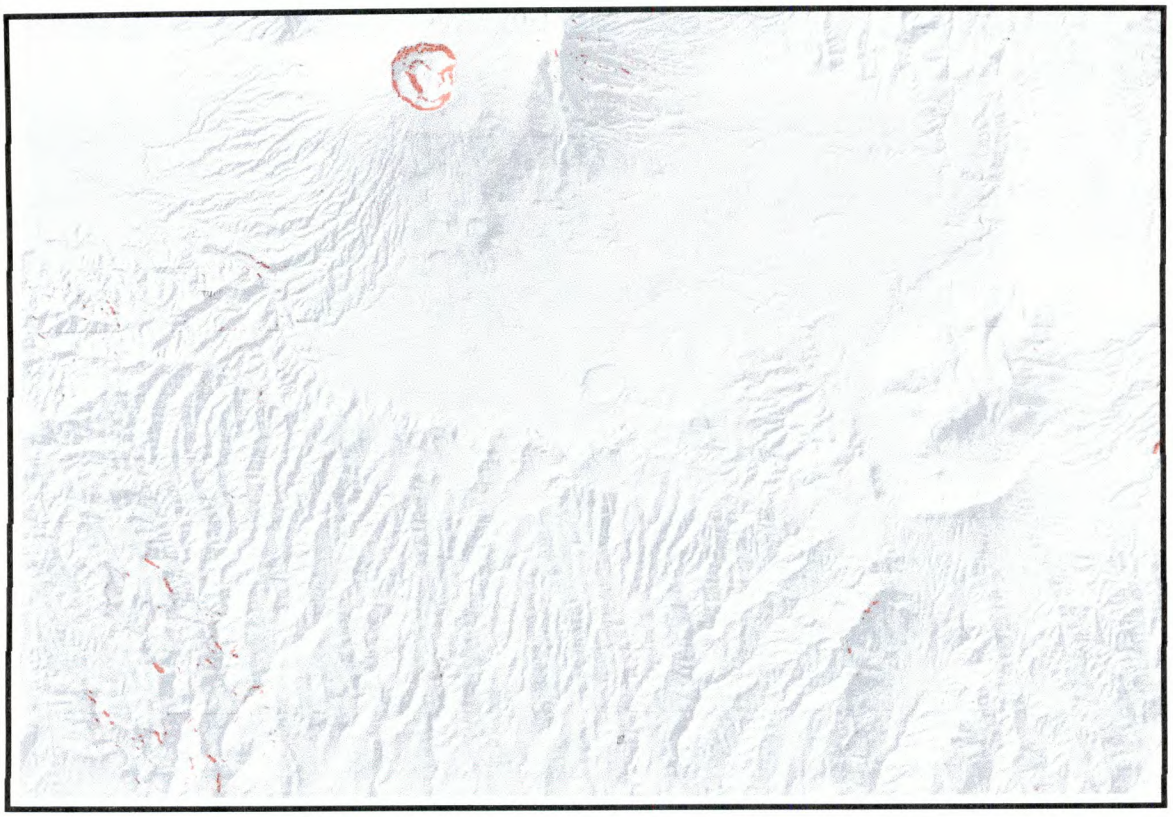

Figura 3.14. Áreas con susceptibilidad a la amplificación según EUROCODIGO [1998].

De la figura 3.14 se observan escasos puntos que son identificados como susceptibles, lo cual no es consistente con el modelo de elevación, ya que en la topografía presentada por el terreno se dan una serie de formaciones con alturas mayores a 30metros. La inconsistencia se debe a que las inclinaciones de las montañas son constantes por lo que la función de vecindad utilizada (nbmax-nbmin) no genera cambios de elevación mayores a 30metros, entonces será necesario mejorar la creación de la variable altura.

Creación del mapa de alturas.

Para crear el mapa de alturas del modelo de elevación se trabajó con un programa dentro de Arcview (script ver anexo E), el cual a partir del mapa de polígonos de dirección de la pendiente genera un mapa de puntos el cual resta las elevaciones de dichos punto y acumula estos valores, al final se obtiene un mapa de alturas referenciadas desde el pie del talud.

El problema principal al ejecutar este programa es que se requiere de un mapa con polígonos de la dirección de la pendiente, que al generarlo en Arcview se producen muy pequeños provocando error en el sistema, debido a la cantidad de memoria necesaria para realizar el cálculo. Para solventar este inconveniente se prosiguió a cambiar el ancho del píxel del modelo de elevación y a digitar manualmente tales polígonos. Con esto se disminuye su cantidad y tamaño, pero se pierde precisión en el mapa resultante.

En la figura 3.15 se presenta el diagrama que muestra todos los pasos previos necesarios para la corrida del programa que genera alturas del terreno.

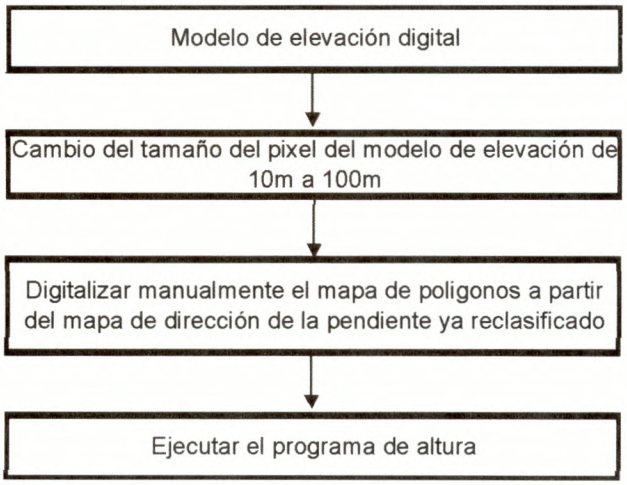

Figura 3.15. Diagrama de pasos previos a la corrida del programa.

Para ejecutar el programa de altura es necesario cambiar el tamaño de píxel del modelo de elevación de 10 metros a 100 metros, y a partir de este nuevo mapa se genera el mapa de dirección de la pendiente el cual se reclasifica en las cuatro orientaciones principales, las cuales se detallan en la figura 3.16.

dirección de la pendiente	valor asignado
315-360	1
0-45	1
45-135	2
135-225	3
225-360	4

Figura 3.16 Valores para reclasificar el mapa de dirección de la pendiente.

Luego a partir de este mapa se digitaliza manualmente el mapa de polígonos, éstos deben ser lo más rectangular posible e iniciar en la base del talud. A partir de ellos se formará el mapa de puntos que calculará la altura referenciada al pie de talud. En la figura 3.17 se muestran los resultados del programa de altura.

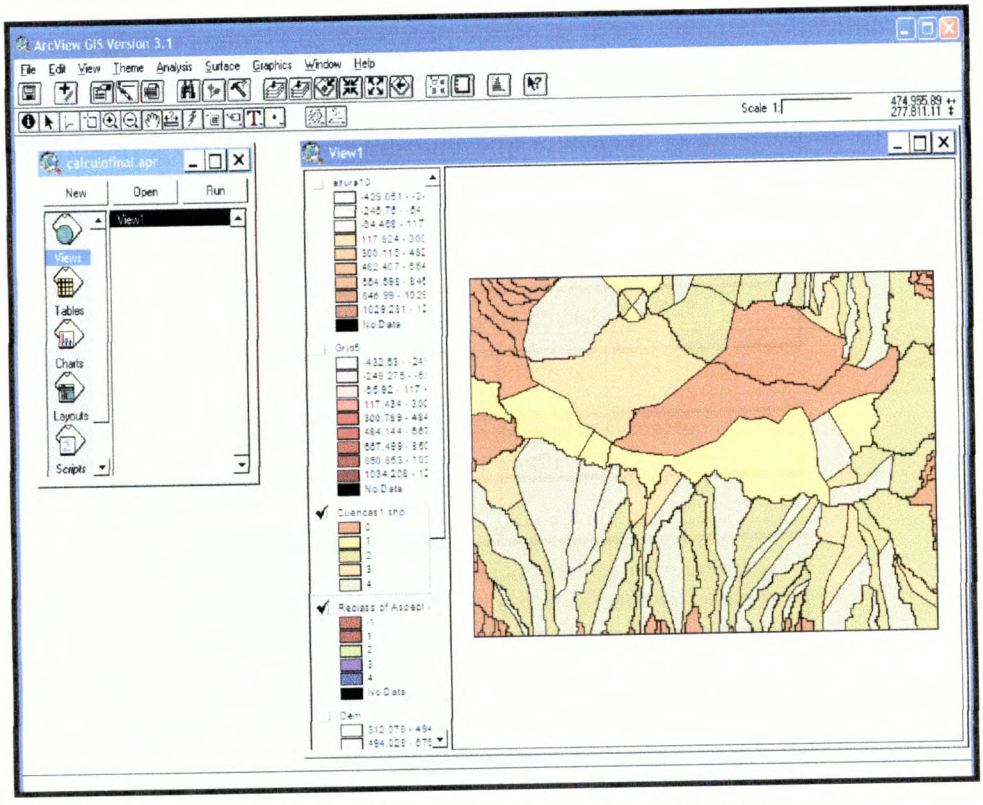

Figura 3.17. Polígonos con direcciones de pendiente.

Tal como se explicó anteriormente el mapa resultante tendrá un ancho de píxel de 100 metros por lo que antes de hacer la exportación a ILWIS será necesario cambiarlo a 10 metros. El resultado se presenta en la figura 3.18.

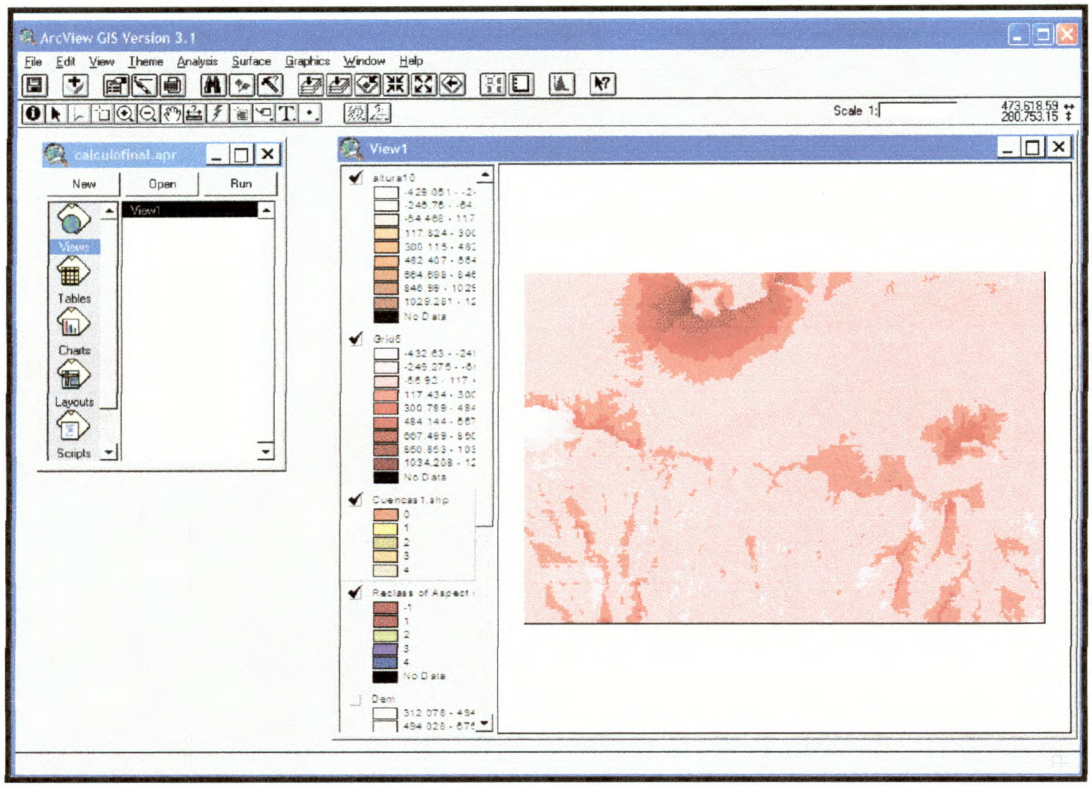

Figura 3.18. Mapa de alturas.

Puede observarse como el programa que define la altura todavía presenta inconsistencias, (alturas negativas). El origen de estas últimas es que al digitalizar los polígonos de la dirección de la pendiente, se consideran dentro de ellos pequeñas áreas que tienen diferente orientación.

Una vez exportado el mapa de altura a ILWIS se hace nuevamente el modelo que plantea el Eurocódigo, contando previamente con los mapas de topografía y las pendientes en grados, se ejecuta nuevamente la fórmula del Eurocódigo [1998], ver figura 3.19.

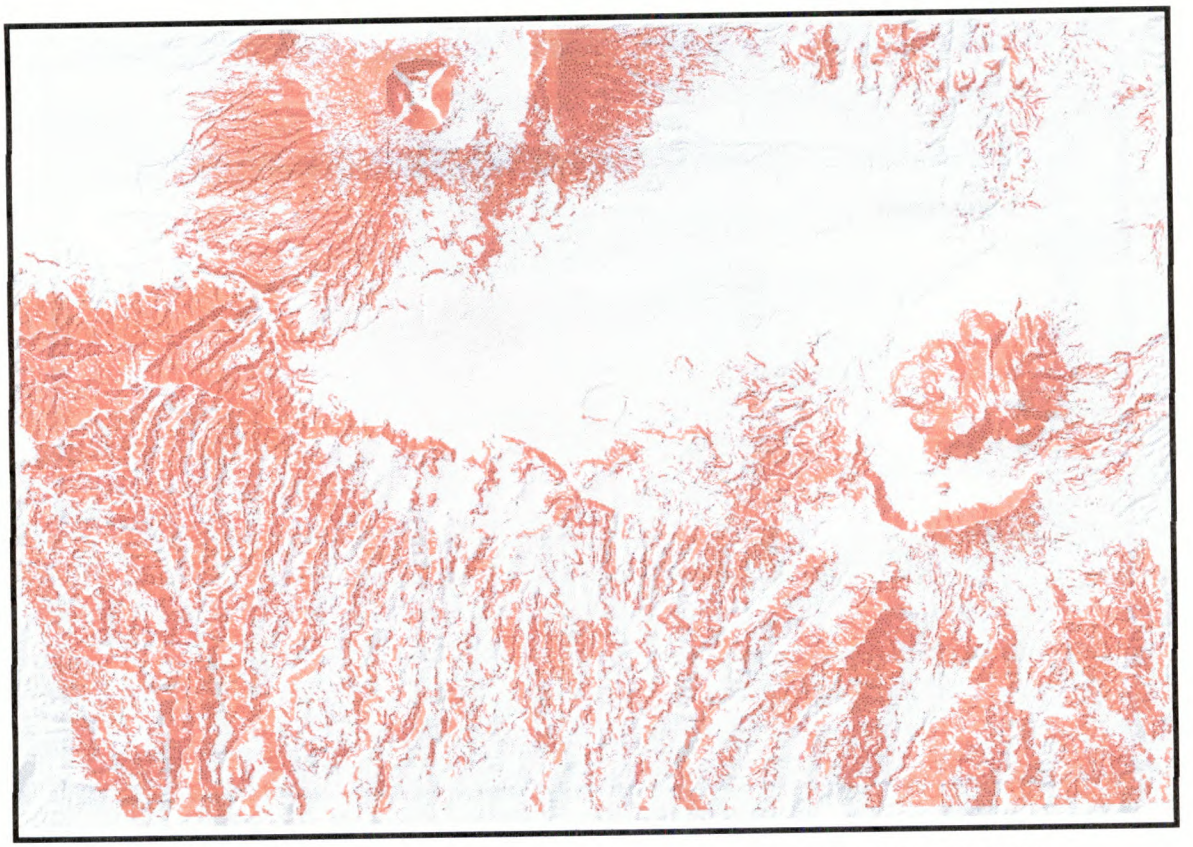

Figura 3.19. Zonas probables de amplificación sísmicas según EUROCODIGO [1998].

Cambios al modelo.

Se propusieron algunas modificaciones al método, variando la altura a 100 metros en el método propuesto por el *EUROCODIGO* [1998], los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 3.20.

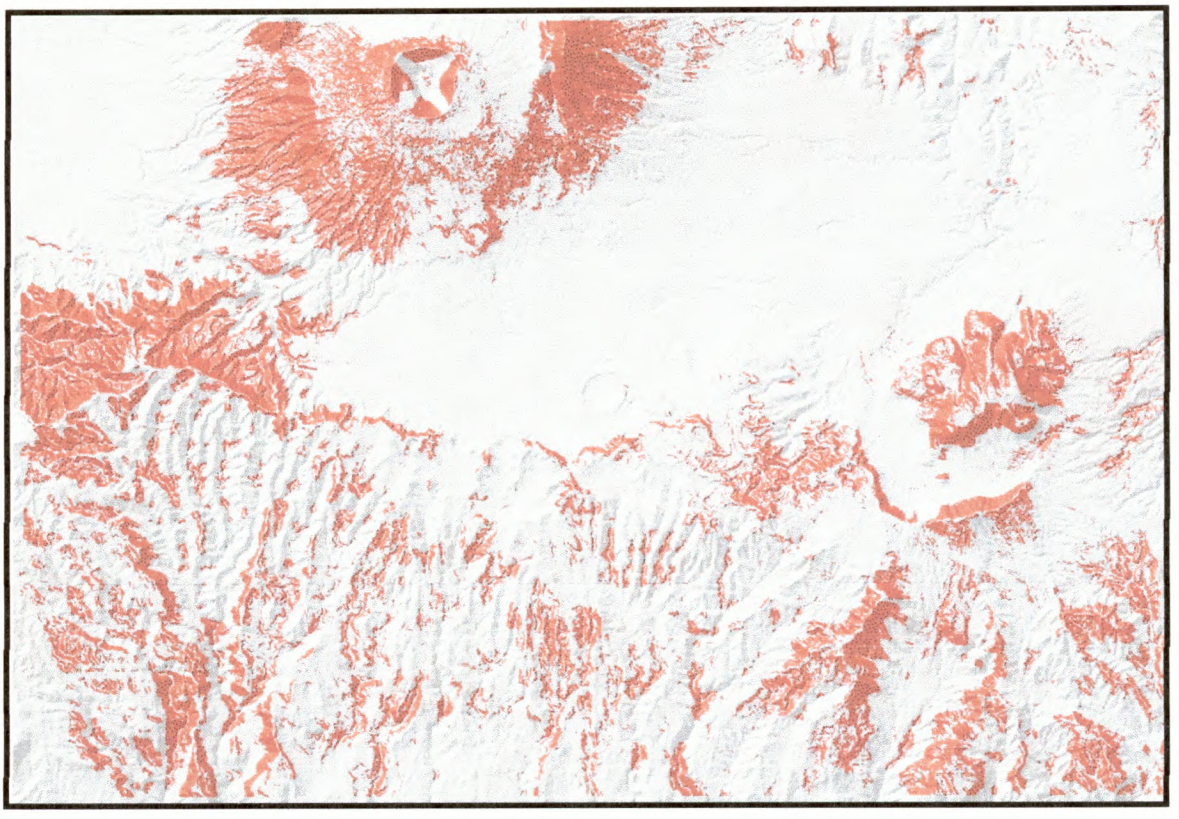

Figura 3.20. Zonas probables de amplificación según EUROCODIGO (1998), con alturas mayores a 100 metros.

Nuevamente se modificó la altura a la cual ocurrirá la amplificación sísmica, el nuevo valor tomado fue de 500 metros, el resultado se observa en la figura 3.21.

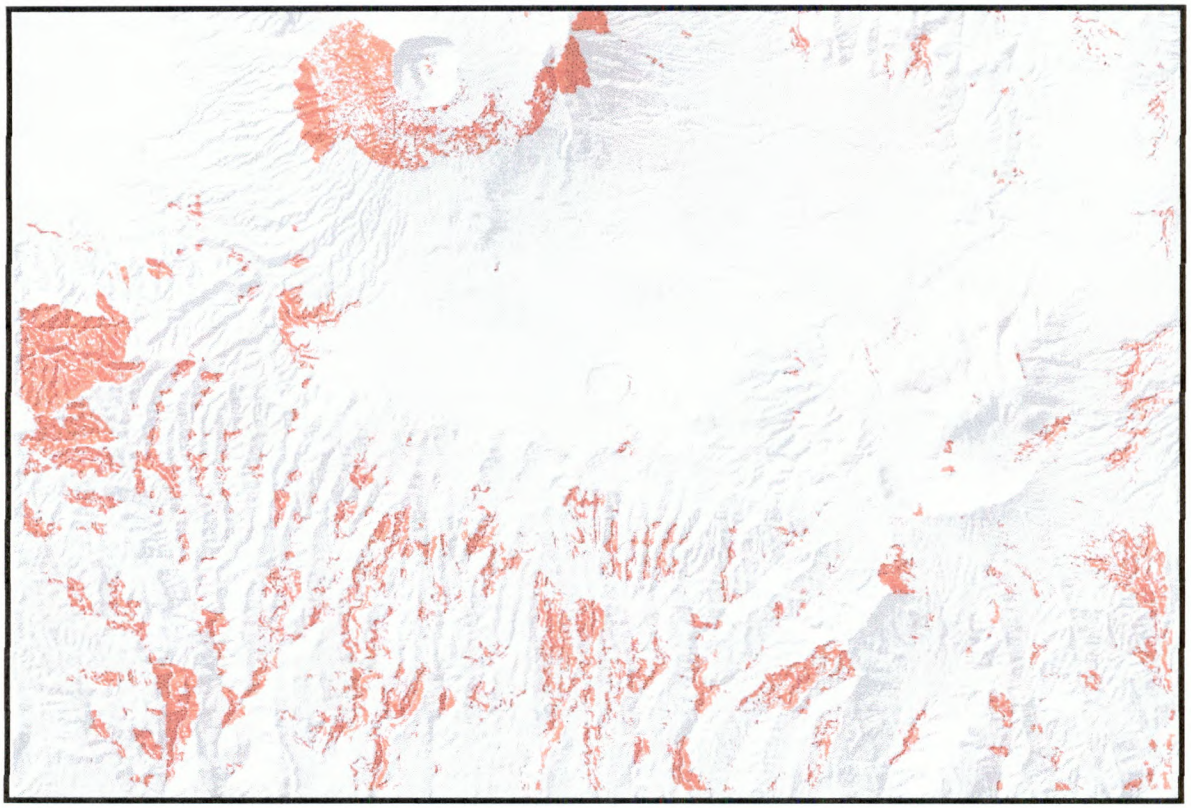

Figura 3.21. . Zonas probables de amplificación según EUROCODIGO [1998], con alturas mayores a 500 metros.

El área susceptible disminuye a medida que la altura aumenta, queda a decisión del usuario la definición de la altura idónea a la cual será considerada la amplificación sísmica.

En el anexo F, se presenta un flujograma que resume los pasos a seguir en la creación de este modelo.

3.3.3. Discusión.

De los resultados obtenidos a partir de la generación del modelo, surgen preguntas como *¿Son los resultados obtenidos los esperados?, ¿falta alguna variable que considerar en el* modelo?, ¿es el método el más idóneo?, ¿se puede mejorar el método?, ¿se identifican todas las zonas que teóricamente se espera ocurra amplificación por el efecto de la topografía?

Los resultados obtenidos no son los esperados, ya que el modelo propuesto por el EUROCODIGO es para un caso particular como lo son los taludes; llevar el modelo de lo particular a lo general genera inconsistencias tales como identificar con igual amplificación sísmica diferentes formas topográficas a desiguales alturas.

Se consideraron todas las variables que propone el método, pero el programa utilizado para la generación de la altura no es el adecuado por las alturas negativas. Se puede mejorar el método utilizando programas especializados en el análisis de modelos de elevación (ver anexo G) o mejorar el programa alturas presentado en este capitulo.

De las modificaciones que se hicieron al modelo se puede observar como al aumentar el valor de la altura disminuye el área identificada como susceptible lo que lleva a reflexionar que aun cuando el modelo que propone el método del EUROCODIGO [1998] considera la altura en el análisis, no se conoce el valor a utilizar que identifique el área real que es susceptible a la amplificación sísmica por el efecto topográfico; además no se identifica como susceptible lugares en las cercanías de quebradas, donde teóricamente el fenómeno ocurrirá.

3.4 KRAMER.

3.4.1 Base teórica.

Steven Kramer [1996] considera que el efecto de la amplificación sísmica por la topografía del lugar esta relacionada con el ángulo interno que forman las tangentes trazadas en el perfil del terreno, simulando un cono prismático infinitamente largo; bajo estas condiciones se puede considerar que el factor de amplificación en la cresta está dado por la siguiente ecuación.

$$\tau = 2\pi/\theta. \qquad \text{(Ec. 3.7)}$$

En donde:

θ: ángulo que forman las tangente del perfil del terreno y su valor puede variar de 0-2π.

τ: factor de amplificación, tomando un valor entre 1 hasta el infinito.

De la ecuación 3.7 se puede observar que el factor de amplificación (τ) es inversamente proporcional al ángulo interno que forman las pendientes de las tangentes al terreno (θ), así entre más pequeño sea θ, más grande es τ y por el contrario entre más grande sea θ más pequeño es τ. La figura 3.22 muestra la ubicación en el espacio del ángulo θ.

Una depresión en el perfil del terreno esta asociado a una concavidad y las crestas se asocian a una convexidad, tal como se puede observar en la figura 3.22

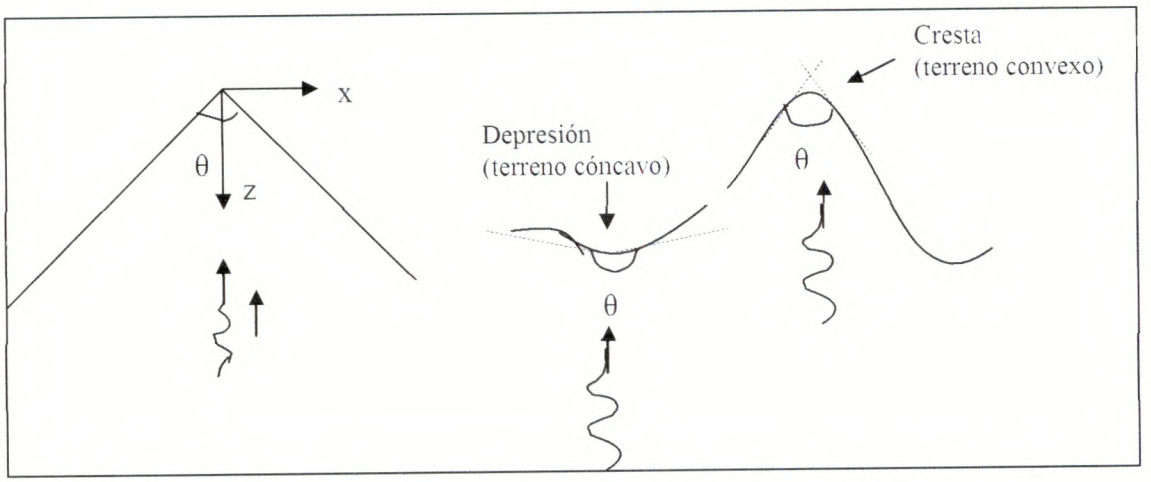

Figura 3.22. Ubicación del ángulo θ. Tomada de Kramer [1996]

3.4.2. Creación del modelo en el programa ILWIS 3.2.

Como el modelo depende básicamente de la convexidad y del ángulo formado por las tangentes del perfil del terreno, se procedió en primer lugar a encontrar todos aquellos píxeles que se hallaban dentro de una convexidad, es decir píxeles que identifican crestas en el área de estudio. Una vez identificadas todas ellas se procedió a encontrar el ángulo que forman las tangentes al terreno, es decir el ángulo θ.

Para identificar en el modelo de elevación todos aquellos lugares donde el terreno es convexo se utilizó el filtro lineal LAPLACE de ILWIS. Este identifica convexidades, concavidades y partes planas. Le asigna valores menores a ceros a la convexidad, valores positivos a la concavidad y valores iguales a cero cuando el terreno es plano.

Antes de aplicar el filtro LAPLACE al modelo, es necesario hacer un relleno de todas aquellas depresiones para eliminar errores en el modelo de elevación digital (se utilizó el programa ARC INFO, opción fill).

Una vez rellenado el modelo de elevación se procedió a generar el filtro LAPLACE, para lo cual se siguió el siguiente orden de comandos en el programa ILWIS: Imagen processing/filter, tal como se muestra en la figura 3.23.

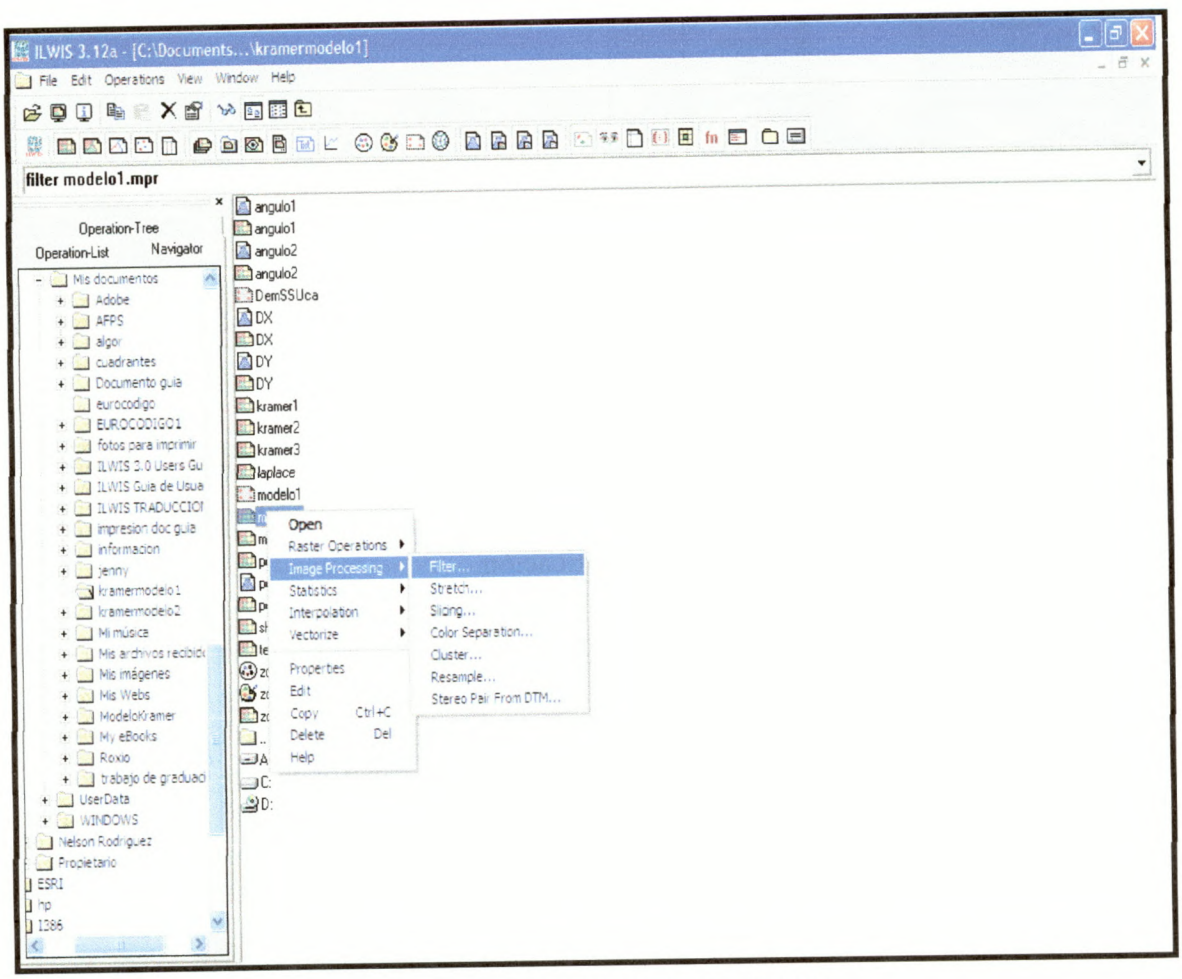

Figura 3.23.Creación del filtro LAPLACE.

Se despliega la ventana de filtros como se puede observar de la figura 3.24, en donde a la opción tipo de filtro se coloca: "lineal" y se busca en la opción del nombre de filtro:"LAPLACE".

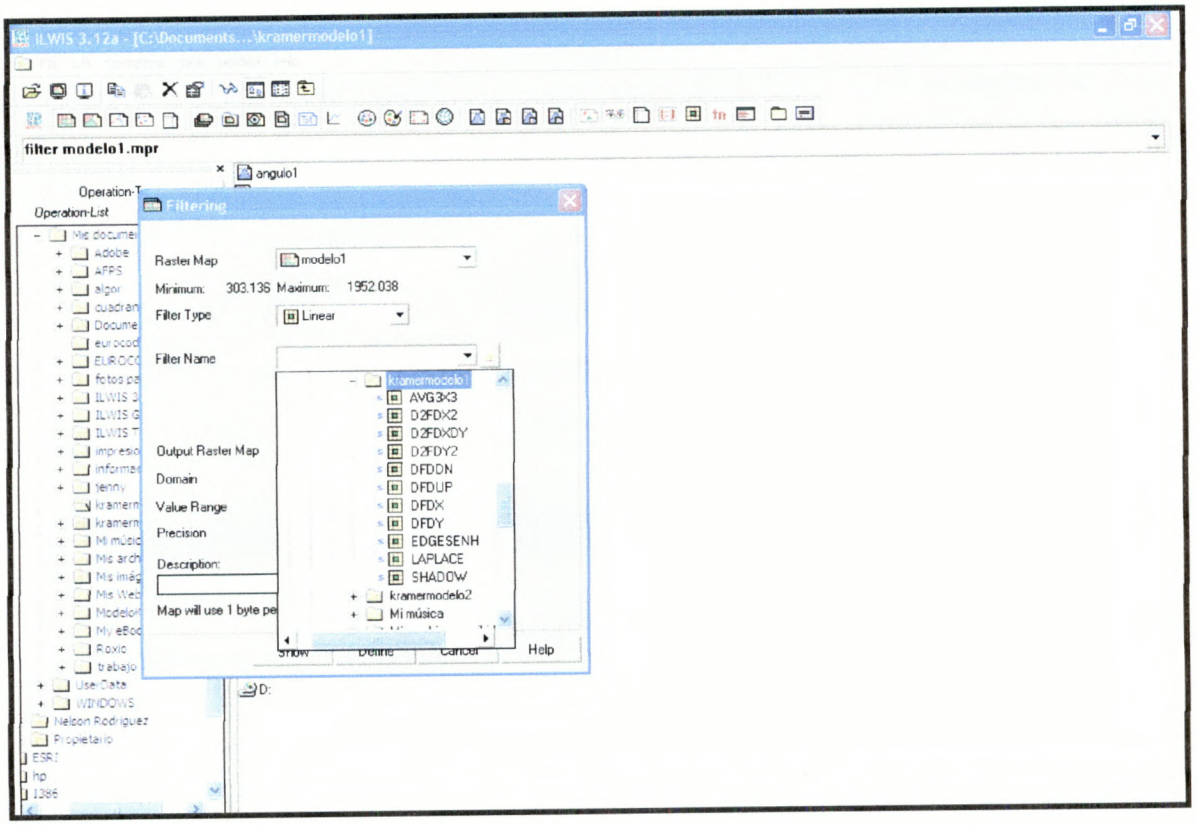

Figura 3.24. Ventana de datos en la creación del filtro LAPLACE.

El siguiente paso a seguir es definir el ángulo θ, por lo que se creó el mapa de pendientes en radianes. En el programa ILWIS la pendiente esta medida con respecto a una horizontal, así que para generar θ se hizo la siguiente simplificación.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Figura 3.25. Vista de una matriz de 3*3 de píxeles con información de pendiente.

Si se considera que en la figura 3.25, el píxel que esta ubicado en la posición 5 coincide con la cresta del terreno y de los ocho píxeles vecinos ya se conoce su pendiente, de una vista en perfil se puede observar que el ángulo θ queda determinado de la siguiente manera $\theta = \pi - (\theta 1 + \theta 9)$.ver figura 3.26.

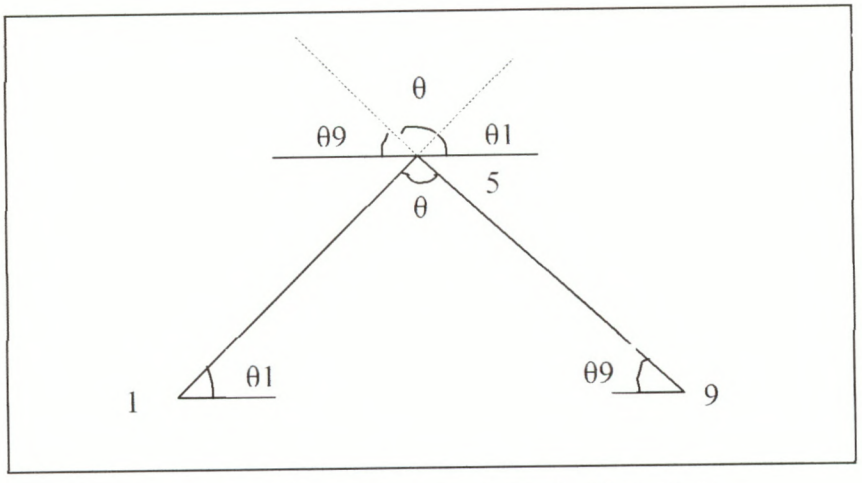

Figura 3.26. Suposiciones en el cálculo del ángulo θ

Se utilizó el filtro rankorder:

OUTMAP=Mapfilter(InputMapName,Rankorder(rows,cols,rank)), para recuperar del mapa de pendientes los valores θ1 y θ9.

Donde:

OUTMAP: Es el nombre del mapa de salida.

Mapfilter: Es el comando de la operación del filtro

InputMapName: Nombre del mapa al cual se le está haciendo el filtro.

Row, cols: son los números de fila y columnas de la matriz creada.

Rank: es el dato de la posición deseada, el cual es asignado al píxel central de la matriz.

Este filtro genera una matriz de n*n, cuya función es ordenar de menor a mayor en la matriz los datos de pendientes y asignarle al píxel central el dato del píxel deseado, así por ejemplo, si se necesita el máximo de los píxeles vecinos entonces en la operación utilizada, rank tendría un valor de n+1 y si se necesita el mínimo tendría un valor de n-1.

Se utilizó una matriz de 3*3, ya que con ello se obtiene un análisis de vecindad de píxeles más detallado. El valor de rank utilizado para la generación de θ1 y θ9 fue la posición 8 y 9 respectivamente, ya que en esta condición se estará obteniendo el más pequeño valor de θ, es decir los factores de amplificación más grandes. En la barra de operación de ILWIS se colocó la siguiente condición: angulo1=MapFilter(penradianes.mpr,RankOrder(3,3,9)), con el propósito de obtener para cada píxel el mayor valor de pendiente de sus ocho píxeles vecinos. La operación: angulo2=MapFilter(penradianes.mpr,RankOrder(3,3,8)) identifica el que el valor que le sigue al máximo.

Cabe notar que es indispensable la predefinición del mapa de pendientes. La figura 3.27 muestra el procedimiento en la generación de los ángulos θ1 y θ9.

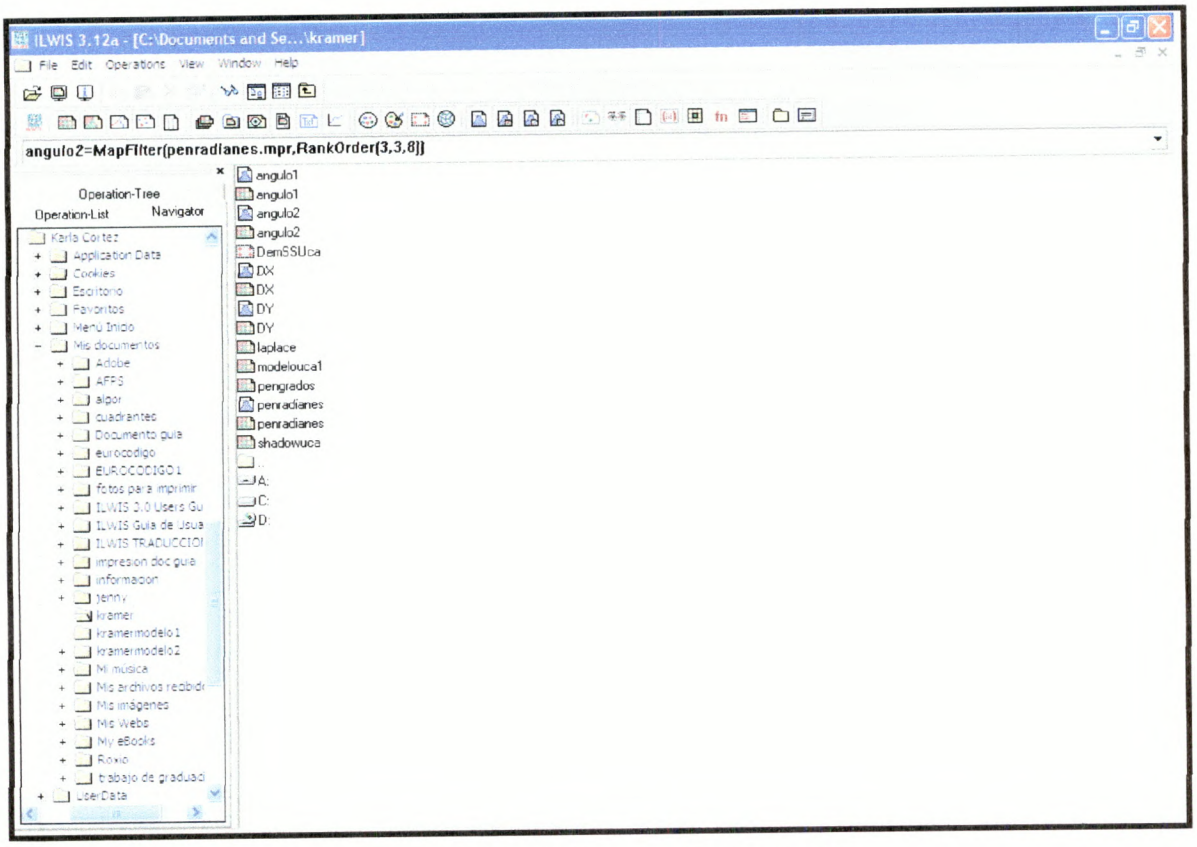

Figura 3.27. Generación de los ángulos θ1 y θ9.

Se procedió a crear en la barra de operaciones la siguiente operación: Teta= pi-(angulo1#+angulo2#), con el objetivo de generar el mapa de θ cuyo resultado se muestra en la figura 3.28.

Figura 3.28, mapa con valores del ángulo θ por cada pixel.

El siguiente paso para la generación del modelo de Kramer fue escribir en la barra de operaciones la siguiente condición: kramer=iff((laplace<0),(2*pi/teta#),undef) lo que establece que si laplace es menor a cero (terreno convexo), entonces se ejecuta la operación (2*pi/teta#) en donde teta# es el mapa que muestra el ángulo interno de las tangentes trazadas en un perfil del terreno, es decir el ángulo θ; en el caso de que laplace no sea menor a cero entonces serán indefinidos los píxeles que no cumplen con esta condición. El resultado obtenido lo refleja la figura 3.29.

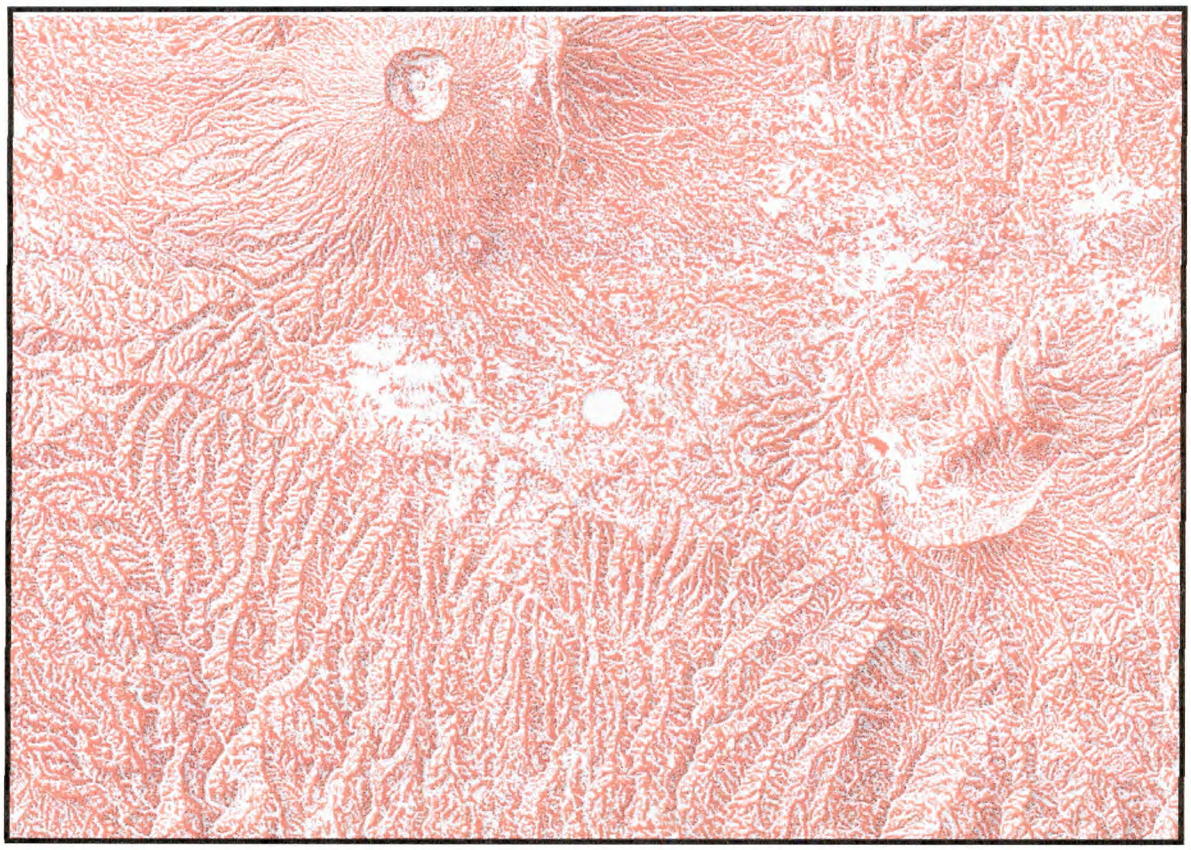

Figura 3.29 zonas propensas de amplificación sísmica según Kramer [1996].

Al considerar valores de LAPLACE menores a cero, se identifican zonas donde el terreno es poco convexo, es decir entre más cercano es el valor de LAPLACE a cero, más planicie se están mostrando. Es por eso que el resultado anterior (figura 3.29) es un mapa muy detallado, por lo que se modificó el modelo para disminuir la densidad de puntos. De la formula que se introdujo a la barra de operaciones se condicionó para que calculara las amplificaciones cuando LAPLACE es menor a -3; se eligió este valor ya que mientras más pequeño es el valor en LAPLACE más convexo es el terreno, es decir se identifican mayor número de crestas prolongadas. El resultado se plasma en la figura 3.30.

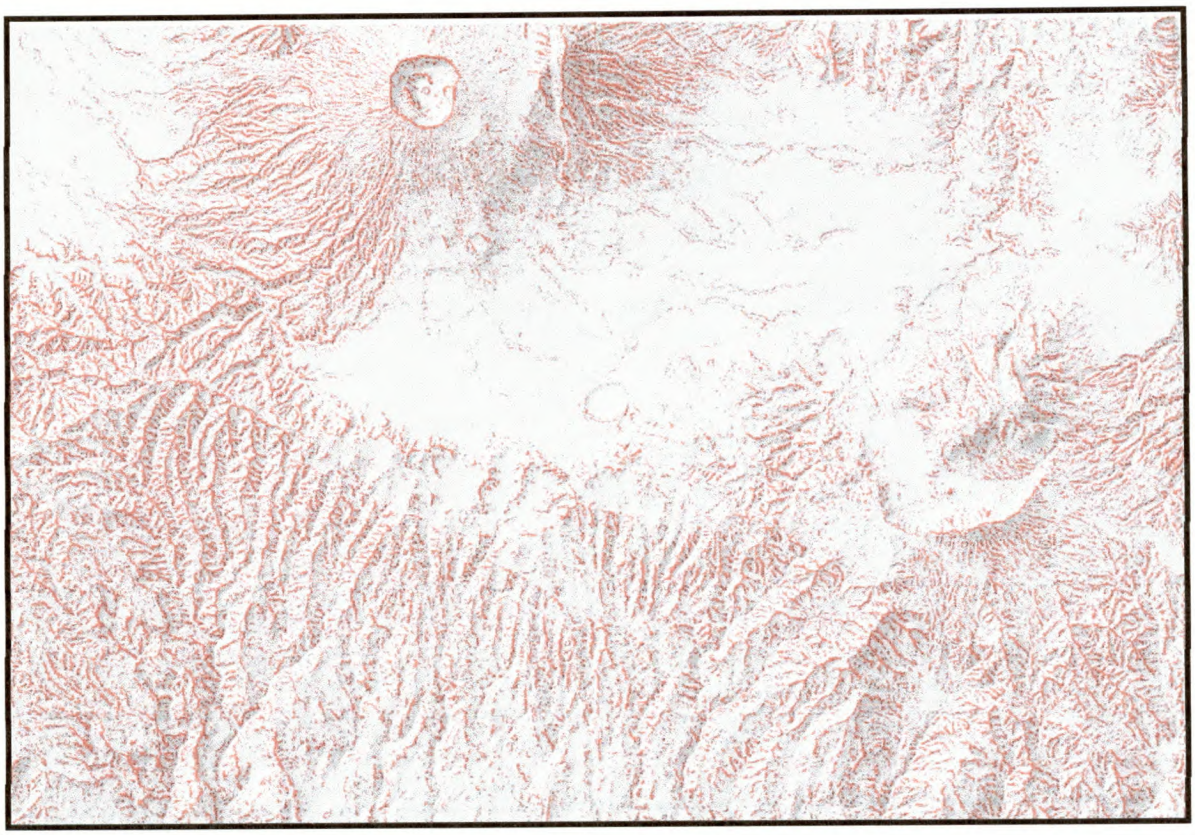

Figura 3.30. Zonas propensas de amplificación sísmica modificando el filtro LAPLACE<-3.

En la figura 3.30, las zonas identificadas con amplificación disminuyen en comparación a la figura 3.29. Se procedió a reproducir los resultados con valores de LAPLACE < -6, cuyo resultado se observa en la figura 3.31.

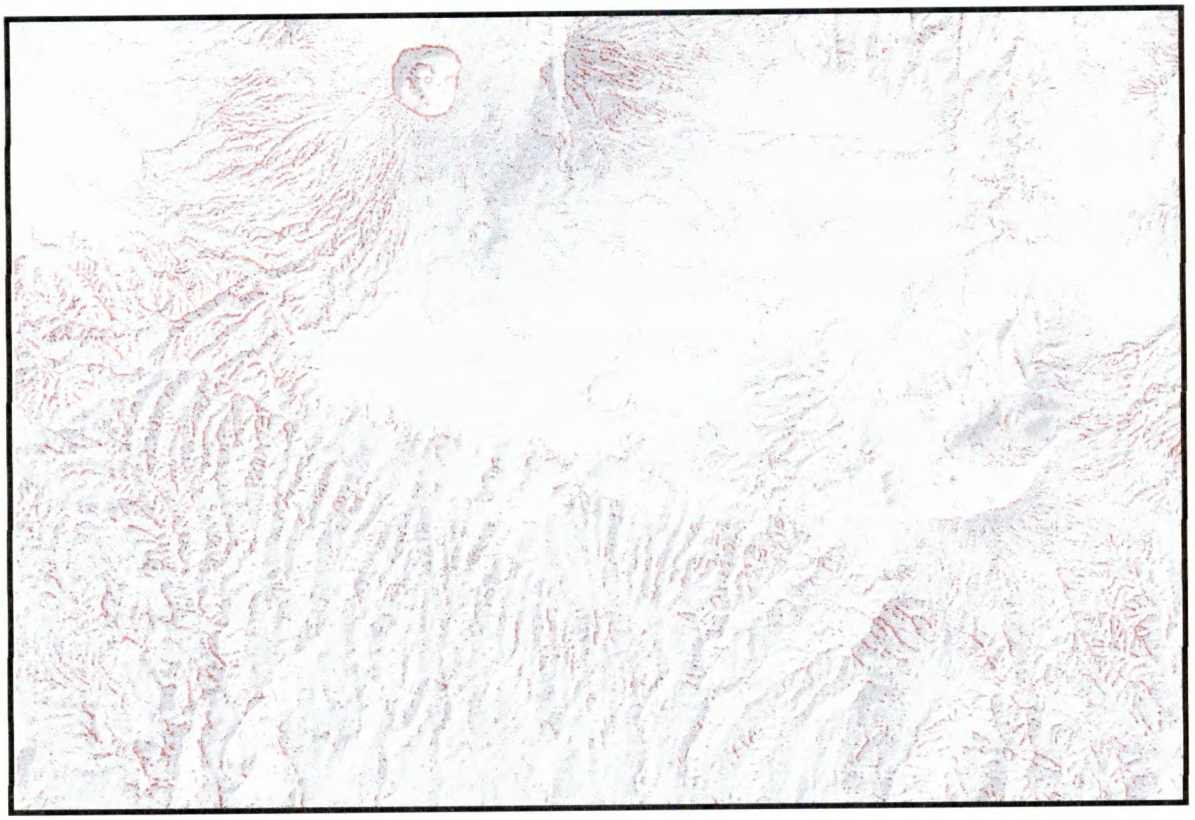

Figura 3.31. Zonas propensas de amplificación modificando el filtro LAPLACE<-6.

Se puede observar de la figura 3.31, que la densidad de información continua disminuyendo, pero deja de identificar aquellas zonas que teóricamente se espera que ocurra una amplificación sísmica por efecto de la topografía, como lugares cercanos a quebradas. Además cerca del cráter del volcán de San Salvador se identifican puntos aislados que deberán tener según la teoría amplificaciones más extensas. Para solucionar el problema de puntos aislados se utilizó un filtro Shrinkt el cual es de carácter binario y se utiliza para identificar áreas, asigna como verdadero el píxel central cuando sus píxeles vecinos horizontales y verticales tienen valor, caso contrario le asignará valores falsos. En su generación se utilizaron los siguientes comandos: image proccesing/filter, Se abre la ventana filtros, a la cual se coloca en tipo de filtro: "binario" y sobre el nombre del filtro se selecciona "shrink". La figura 3.32 muestra el proceso.

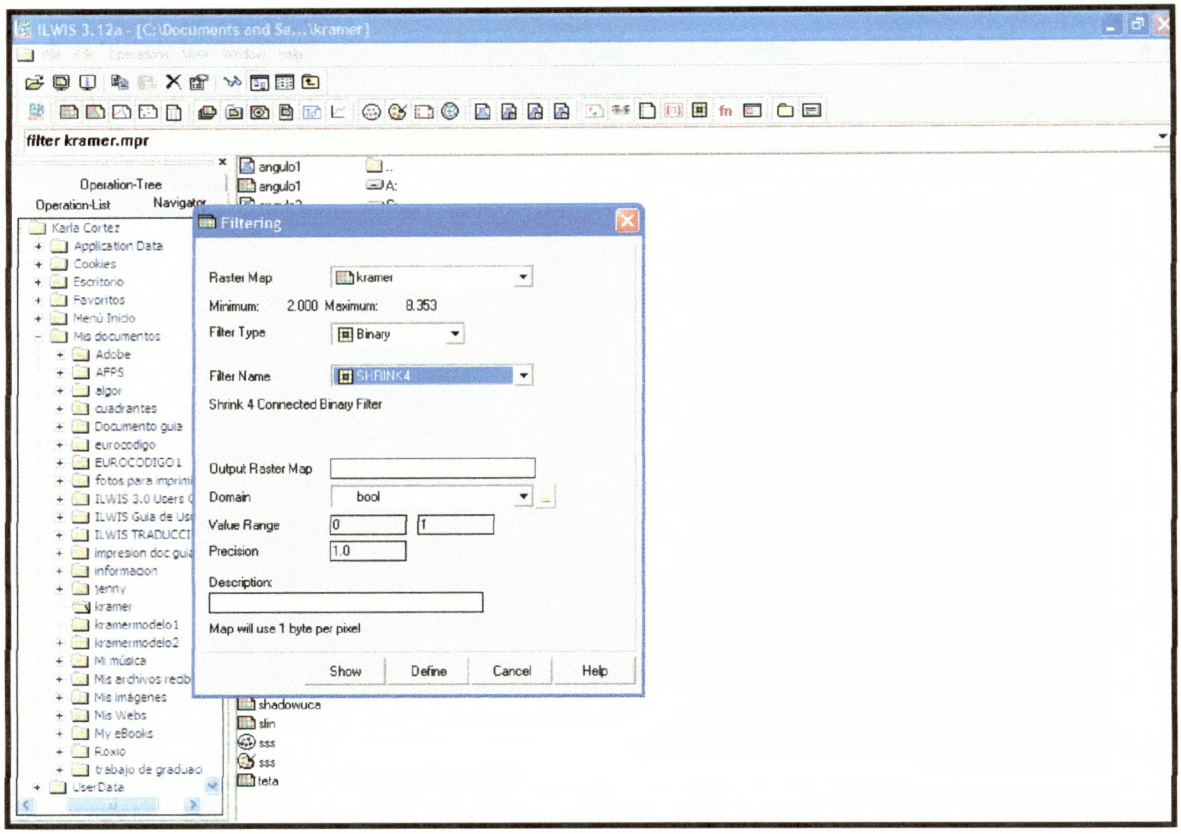

Figura 3.32 creación del filtro shrink4.

Después de aplicar el filtro de shrink4 a los tres modelos de Kramer creados, se procedió a elaborar nuevos mapas a partir de ellos, con el condicionante que si el modelo de Kramer con filtro tenía un valor falso entonces que lo indefiniera si no que le pusiera el valor de uno, al condicionarlo a que todo los valores de amplificación calculados tomaran el valor de uno se lograba calificar todas las áreas identificados como susceptible. Se escribió en la barra de operaciones: kramerlimpio=iff((kramershrink4=false),undef,1). La figuras 3.33, 3.34 y 3.35 muestra los resultados.

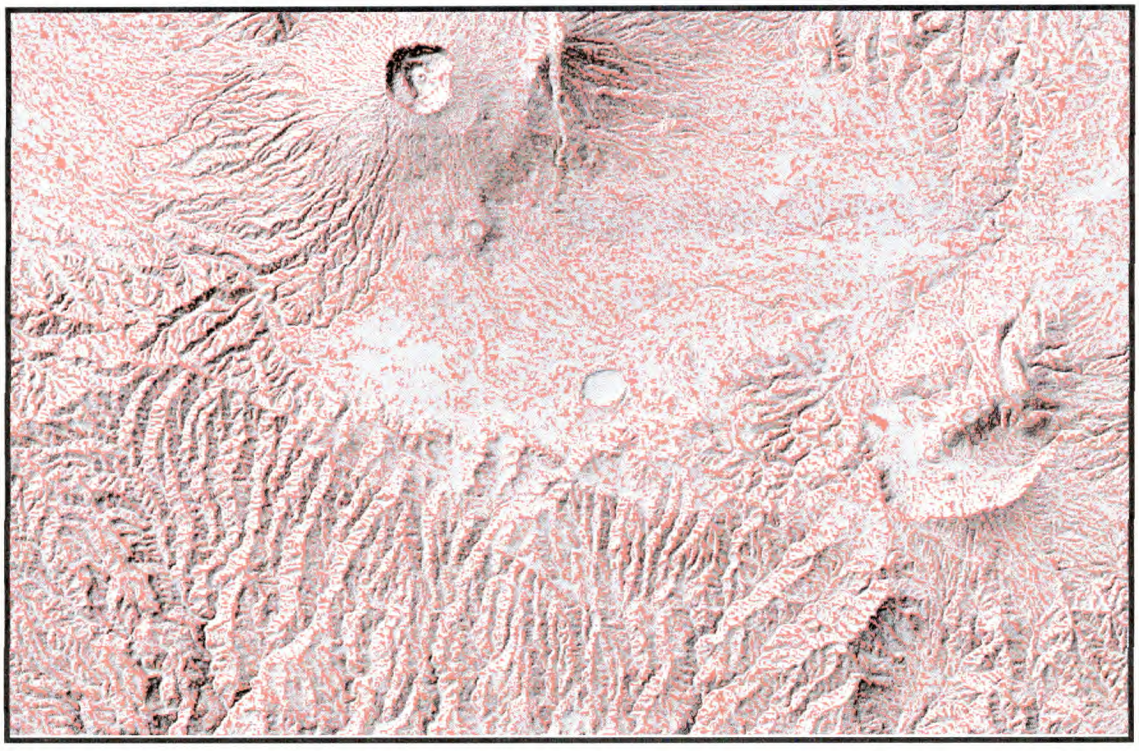

Figura 3.33, zonas susceptibles a la amplificación sísmica en el modelo Kramer (para LAPLACE<0) utilizando el filtro shrink4

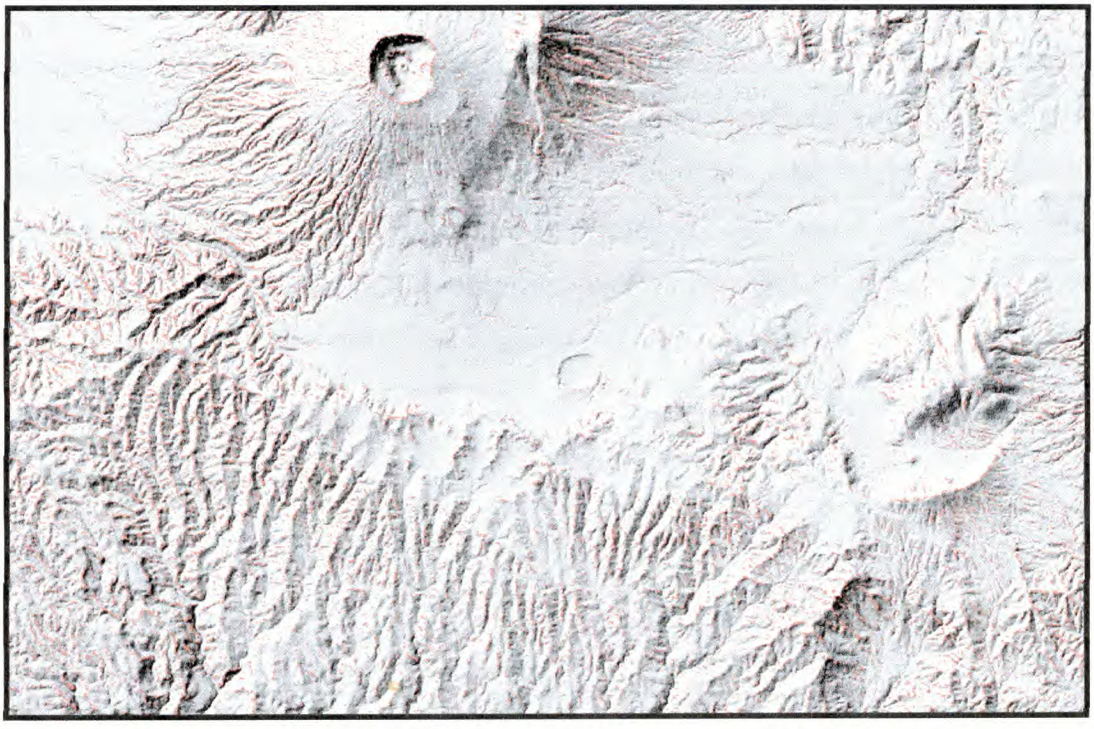

Figura 3.34, zonas susceptibles a la amplificación sísmica en el modelo Kramer (para LAPLACE<-3) utilizando el filtro shrink4.

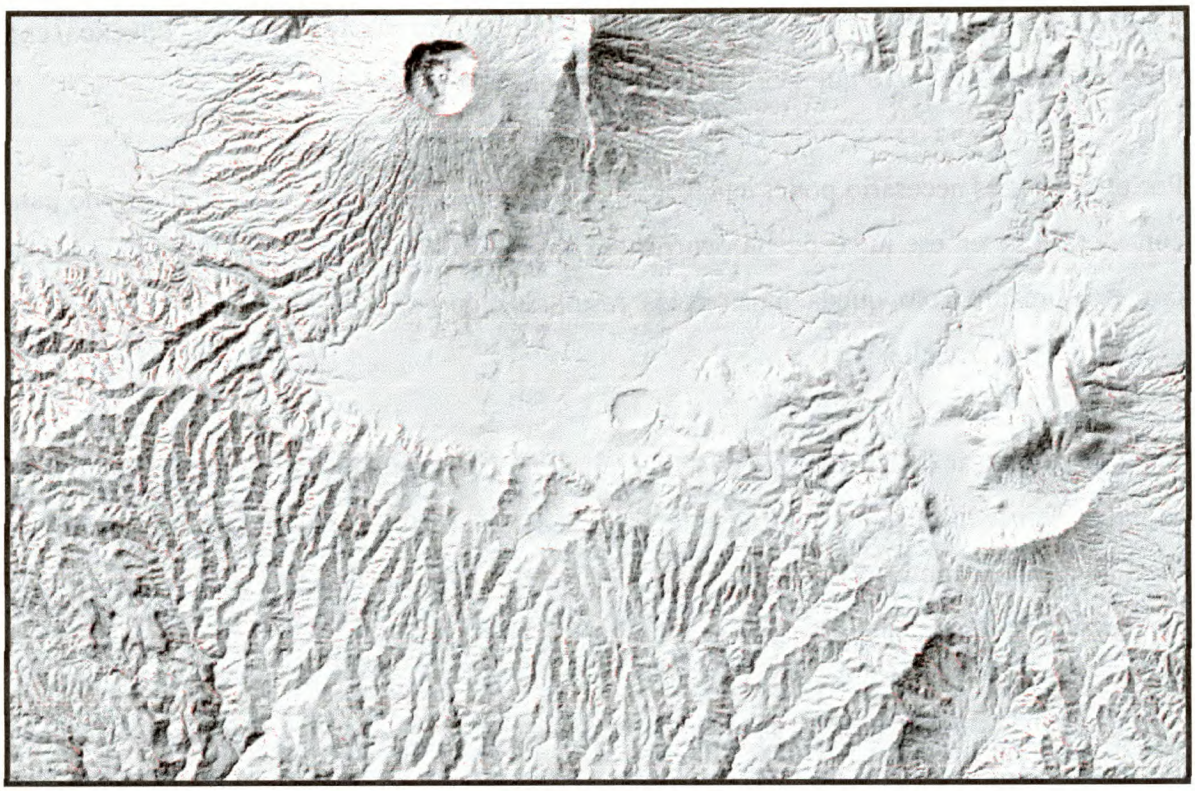

Figura 3.35, zonas susceptibles a la amplficación sísmica del modelo Kramer (para LAPLACE<-6) utilizando el filtro shrink4

En el anexo H se presenta un flujograma que resume la creación del método planteado por Kramer.

3.4.3 DISCUSIÓN.

De los resultados obtenidos a partir de la generación del modelo, surgen preguntas como ¿Son los resultados obtenidos los esperados?, ¿es el método el más idóneo?, ¿falta alguna variable que considerar en el modelo?, ¿se puede mejorar el método?

Según lo propuesto por Kramer [1996], los resultados obtenidos a partir de la generación del modelo son los esperados, ya que reproducen lo descrito en sus bases teóricas; pero al depender el modelo únicamente de la convexidad del terreno y del ángulo interno de las tangentes, deja de incluir otros aspectos como es la altura que al no considerarla se obtienen

resultados como identificar con igual susceptibilidad sísmica a terrenos convexos con diferente elevación, algo que teóricamente se esperaría no fuera igual.

Por otra parte es necesario poder cuantificar que tan convexo tendría que ser el terreno para considerar que en ese lugar pueda ocurrir una amplificación por el efecto de la topografía, por el momento solo queda mostrar los resultados que se han obtenido a partir de la generación del modelo.

El modelo, a pesar de la mejoras en la presentación obtenidas a partir de los filtros, no deja de identificar áreas aisladas con posible amplificación sísmica, lo cual no tendría validez en el análisis ya que el nivel de detalle con el que se está trabajando es poco, para poder decir con certeza que en esos puntos es confiable la información.