

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. - INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Geológica como ciencia aplicada al estudio y solución de problemas producidos por la interacción del medio geológico y la actividad humana, tiene entre sus principales aplicaciones la evaluación, prevención y mitigación de los riesgos geológicos, es decir, de los daños ocasionados por los procesos geodinámicos. En este contexto los fenómenos de remoción en masa (FRM), ya sean estos producidos por el carácter dinámico del medio geológico y la evolución natural del relieve, o bien provocados o desencadenados por el hombre, han causado en la mayoría de casos muchas víctimas y grandes pérdidas económicas.

En el país, son numerosos los casos en que dichos fenómenos han afectado vías de comunicación, poblados, obras de infraestructura, especialmente oleoductos y acueductos; así como líneas de transmisión eléctrica y sobretodo han cobrado gran cantidad de víctimas (Plaza G, 1996; Plaza G, 1998). Desde el punto de vista del marco geodinámico regional, el Ecuador se ubica en una zona de alta sismicidad, tectonismo y volcanismo activo, de tal manera que son grandes las probabilidades de que los fenómenos de remoción en masa se presenten en todo el territorio nacional, debido a que estos ocurren como fenómenos secundarios relacionados con agentes de primer orden. Otros agentes importantes para la ocurrencia de FRM son las condiciones hidrometeorológicas representadas por la humedad del suelo, precipitaciones e intensidad de lluvias que se incrementan especialmente durante el fenómeno de El Niño. También se puede observar que en el contexto de la expansión de centros urbanos y de la actividad antrópica en el Ecuador, el uso actual del suelo y la cobertura vegetal han sido fuertemente modificados y constituyen factores importantes para la ocurrencia de FRM.

La Evaluación y Zonificación de la susceptibilidad y amenaza por FRM, es un proceso que considera los factores naturales y antrópicos relacionados con la ocurrencia de dichos fenómenos, para determinar el nivel de susceptibilidad y

amenaza en una zona, de tal manera que, el producto final sea cual fuere la metodología represente de mejor manera las condiciones actuales o futuras. Para estos fines; y, tomando la cuenca sedimentaria de Loja como área de estudio, se aplican dos metodologías para evaluar la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa; cada una de las cuales presenta sus propios alcances y variables. Los productos finales de dichos métodos se presentan como a los mapas de susceptibilidad y de amenaza a los fenómenos de remoción en masa para el área estudiada.

1.2. - OBJETIVOS

1.2.1. - OBJETIVO GENERAL

- Ensayar metodologías de evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa (FRM), recomendadas para escalas media y regional.

1.2.2. - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar mapas de zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza por FRM para el área de estudio, con cada una de las metodologías escogidas.
- Comparar los resultados obtenidos con la finalidad de analizar las ventajas y desventajas de cada metodología.
- Determinar las condiciones de aplicabilidad de cada metodología para futuros trabajos en el Ecuador.

1.3. - ALCANCE

El área de estudio comprende una superficie aproximada de 252 km² en la cuenca sedimentaria de Loja, provincia de Loja. En esta zona se realizó la evaluación de la susceptibilidad con el método de Brabb (Varnes, 1984), que se presenta en forma cartográfica a escala 1:25000; y, la evaluación de la amenaza por el

método de Mora y Vahrson (1993), representado también en forma cartográfica a escala 1:25000. Para realizar lo antes señalado se utilizaron los siguientes datos:

- Base topográfica digitalizada a escala 1:25000 elaborada por la Unidad Civil, Geología y Minas (UCGM) de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).
- Fotografías aéreas correspondientes a 10 líneas de vuelo, editadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM), detalladas a continuación:

| Rollo | Fotos | Escala | Año |
|-------|-------------|---------|------|
| - | 4-20 | 1:5000 | 2003 |
| - | 21-46 | 1:5000 | 2003 |
| - | 47-71 | 1:5000 | 2003 |
| - | 72-95 | 1:5000 | 2003 |
| - | 96-112 | 1:5000 | 2003 |
| - | 113-127 | 1:5000 | 2003 |
| - | 135-158 | 1:5000 | 2003 |
| R108 | 19590-19593 | 1:30000 | 1984 |
| R108 | 19601-19605 | 1:30000 | 1984 |
| R-14 | 2816-2818 | 1:60000 | 1976 |

- Mapa Geológico a escala 1:25000, elaborado por la UCGM de la UTPL en colaboración con la Dirección Nacional de Geología (DINAGE).
- Datos meteorológicos de las estaciones: La Argelia-Loja, Malacatos, Vilcabamba, La Toma-Catamayo, San Lucas, Zamora, San Francisco, El Tambo, con series anuales de más de 10 años, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Datos sísmicos del Catálogo de intensidades y magnitudes (1541-2000) de la provincia de Loja, proporcionados por el Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).
- Mapa Inventario de FRM realizado por el autor sobre la base topográfica 1:25000.

Para el procesamiento de estos datos se empleó el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2, y para el procesamiento digital y representación cartográfica de la información se emplearon adicionalmente los programas Surfer 8.0, AutoCAD 2005 y ArcGis 9.0.

El mapa Inventario de FRM se elaboró en base a fotointerpretación y reconocimiento en el terreno, este último con un trabajo de campo de 30 días en los cuales se hizo además un reconocimiento general de la geología. Los datos generados se presentan en una base topográfica 1:25000. Este trabajo tuvo el apoyo logístico de la DINAGE, a través del Convenio de Cooperación vigente entre la EPN y el Ministerio de Energía y Minas, debido a que la DINAGE está encargada del Proyecto Multinacional Andino, que tiene como principal meta obtener una mejor comprensión de los movimientos en masa en la región andina y hacer que esta información sea accesible y disponible para quienes la necesiten.

Como documentos base para el desarrollo de este estudio se citan los siguientes trabajos:

- Aplicación Metodológica para el Estudio de Susceptibilidad por Deslizamientos, Provincia de Imbabura. *ABAD, F. (2004)*, Proyectos Geológicos, Carrera de Ingeniería Geológica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 31pp. Informe inédito.
- Zonificación de Riesgos por Deslizamientos utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). *BOJORQUE, J. (2001)*. Programa para el Manejo del Agua y Suelo, 10pp.
- Macrozonificación de la Amenaza de Deslizamientos y resultados obtenidos en el Área del Valle Central de Costa Rica. *MORA, R.; MORA, S.; VAHRSON, W. G. (1993)*. Escuela Centroamericana de Geología; Departamento de Geología, ICE; Escuela de Ciencias Geográficas, UNA; Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales de América Central, CEPREDENAC).
- Innovative Approaches to Landslides Hazard and Risk Mapping. *BRABB, E. (1984)*. USGS, IV International Symposium on Landslides, Toronto, Vol. I, pp. 307-324.

- Metodología para la Evaluación de Riesgo por Deslizamientos en el ámbito intermedio. *GONZÁLEZ, A. (1990)*. Tomo I, Memorias de las VI Jornadas Geotécnicas Colombianas, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá-Colombia.
- Zonificación de la Amenaza por Deslizamientos por el Método de Moravahrsen en Pimampiro, Provincia de Imbabura. *IDROVO, A. (2004)*. Proyectos Geológicos, Carrera de Ingeniería Geológica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 72pp. Informe inédito.
- Zonificación de las laderas inestables considerando el efecto sísmico, casos de las cuencas de Rumipamba y Rumihurcu. *JIMENEZ, E. (1999)*. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 132pp.
- Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, TC4, ISSMFE. December (1993).
- Zonificación de Peligros Sismogeotécnicos por Deslizamientos y Fenómenos Hidrometeorológicos en la ciudad de Bahía de Caráquez. *PLAZA, G.*, Escuela Politécnica Nacional; Dirección Nacional de Defensa Civil, Quito.
- Experiencias de Evaluación y Cartografía del Peligro por Deslizamientos en las regiones costera y andina del Ecuador. *PLAZA, G. (2001)*. Simposio Internacional de Movimientos en Masa, Cuenca-Ecuador.
- Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice in Natural Hazard. *VARNES, D.J. (1984)*., Vol. 3, 63pp.
- Caracterización de los Fenómenos de Remoción en Masa producidos en las laderas Sur orientales del Complejo Volcánico Pichincha. *YUGSI, F. (2004)*. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 118pp.

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizaron varios conceptos básicos que se describen como Glosario en el Anexo 1.

1.4. - MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN UTILIZADOS

El método de Brabb fue el pionero en el análisis de estabilidad de laderas en California; y, sigue siendo uno de los más exhaustivos y completos usados en Estados Unidos. Esta metodología utiliza además información que puede ser accesible y fácilmente obtenida a través de trabajo de campo y fotointerpretación. De igual forma el método de Mora-Vahrson utiliza pocos y sencillos parámetros en la evaluación de la amenaza. Estas dos metodologías, además, ya han sido ensayadas simultáneamente en algunas zonas del país (Plaza G, 2000), y han demostrado tener buenos resultados. Por estas razones, y sabiendo que los dos métodos pueden ser utilizados para una evaluación a escala media y regional han sido tomados en cuenta en este trabajo.

1.4.1. – EL MÉTODO DE BRABB (1972)

Este método de tipo explícito empírico utiliza tres factores para evaluar la susceptibilidad por FRM: un inventario de FRM, un mapa de unidades litológicas y un mapa de pendientes. Fue utilizado por primera vez en el condado de San Mateo, California por su autor Earl Brabb et al. El método ha sido detallado para ser utilizado en forma cartográfica por Varnes (1984), y se expone a continuación:

A.- Primero, se determina el área limitada por cada una de las unidades y subunidades litológicas de la zona, utilizando una malla con resolución de 0.01 millas cuadradas (2.6 hectáreas).

B.- El Mapa Inventario de Fenómenos de Remoción en Masa se sobrepone al Mapa de Unidades Litológicas para identificar las unidades en las cuales ocurren FRM; y, se calculan las áreas deslizadas en cada una de las unidades litológicas usando la malla.

C.- Las unidades litológicas del mapa son luego listadas en orden creciente considerando el porcentaje determinado por la relación entre las áreas deslizadas en cada unidad litológica y las áreas determinadas para cada unidad litológica. De

esta manera se determina una susceptibilidad relativa o parcial (SP), según el porcentaje de masa deslizada para cada litología, identificándola con numerales I, II, III, IV, V y VI.

D.- La clase más alta de susceptibilidad (L) se asigna a los depósitos de FRM, porque contienen mucha más área deslizada (100%) que las litologías de las cuales ellos provienen. Así, los depósitos de FRM se consideran como una unidad litológica.

E.- Las otras clases de susceptibilidad parcial (I a VI) se determinan en función de intervalos convenientes de los porcentajes de masa deslizada identificados para cada unidad litológica, asignándolos de esta forma un símbolo a cada uno de ellos. Según Varnes (1984), los intervalos de estas clases de SP no son uniformes (1, 6, 16, 10%, etc).

F.- El mapa de pendientes se sobrepone al Mapa Litológico y al Mapa Inventario de FRM combinados; y, se examinan sistemáticamente para determinar los intervalos de pendiente que muestran la máxima frecuencia de FRM para cada unidad litológica. Los intervalos de pendiente que presentan los valores máximos, son etiquetados con las clases de susceptibilidad más alta (números romanos). Los intervalos de pendiente que muestran significativamente menos FRM son etiquetados con numerales de clases de susceptibilidad menores. Así, la unidad litológica que tenga una susceptibilidad parcial (SP) máxima de III, puede ser designada con ese numeral solamente donde las pendientes exceden el 30%, y debido a que se espera tener menor número de FRM en las pendientes menores, sus denominaciones de susceptibilidad en los rangos de pendientes menores pueden ser II o inclusive I, dependiendo de la razón de cambio entre la susceptibilidad parcial y la pendiente. Los rangos de pendientes determinados en la metodología no tienen una solución estadística y no son uniformes (5, 10, 15, 20, 20%), según Varnes (1984).

El mapa de susceptibilidad por FRM obtenido con esta metodología puede incluir dentro de la misma clase de susceptibilidad unidades de rocas resistentes en terrenos con pendientes fuertes y unidades litológicas con rocas de baja resistencia en terrenos de media y baja pendientes. De igual forma, los límites de clases de susceptibilidad pueden separar rocas de igual resistencia que tengan diferentes susceptibilidades en cada rango de pendientes.

Este mapa además, no muestra distinción cartográfica entre los diferentes tipos de FRM o sobre el grado de actividad, aunque los FRM activos fueron identificados en el mapa Inventario de FRM.

Se puede observar que la matriz de susceptibilidad utilizada es de 6 x 7; con 6 rangos de pendientes y 7 rangos de susceptibilidad parcial (SP). También se debe indicar que la escala de trabajo del autor (Brabb, 1972) parece haber sido 1:62500, y por ello utilizó una malla de 2.6 Ha ($1\text{km}^2 = 0.01\text{Ha}$).

1.4.2. – EL MÉTODO DE MORA-VAHRSON (1993)

Este método propuesto por Mora y Vahrson (1993) fue desarrollado en Tapanti, en el Valle Central de Costa Rica. Es de tipo explícito semianalítico y tiene por objeto predecir la amenaza por FRM. En este método se consideran cinco factores que son: el relieve relativo, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la intensidad de lluvias. La combinación de los tres primeros (elementos pasivos) se realiza considerando que los FRM ocurren cuando una ladera adquiere un grado de susceptibilidad, debido a la interacción entre la pendiente, la litología y la humedad del suelo. Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos) actúan como elementos de disparo que destruyen los equilibrios, la mayoría de las veces precarios, que mantienen las laderas. De esta forma se considera que el grado o nivel de amenaza es el producto de la susceptibilidad y de la acción de los elementos de disparo:

$$\mathbf{H1 = Susc * Disp \quad (1)}$$

donde:

H1: Grado o Nivel de amenaza por FRM

Susc: valor de los factores de susceptibilidad

Disp: valor de los factores de disparo

Por su parte, el valor de susceptibilidad se compone de los siguientes parámetros:

$$\mathbf{Susc = Sr * Sh * SI \quad (2)}$$

donde:

Sr: valor del parámetro de relieve relativo

Sh: valor del parámetro de humedad del suelo

SI: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

El valor de los factores de disparo se compone de los siguientes parámetros:

$$\mathbf{Disp = Ts + Tp \quad (3)}$$

donde:

Ts: valor del parámetro de disparo sismológico

Tp: valor del parámetro de disparo por lluvia

La ecuación (1) se puede entonces expresar en los términos:

$$\mathbf{H1 = (Sr * Sh * SI) * (Ts + Tp) \quad (4)}$$

de la cual se pueden derivar las relaciones siguientes:

$$\mathbf{Hs = Ts * (Sr * Sh * SI) \quad (5)}$$

donde:

Hs: potencial generador de deslizamientos por la sismicidad; y,

$$\mathbf{Hp = Tp * (Sr * Sh * SI) \quad (6)}$$

donde:

Hp: potencial generador de deslizamientos por las lluvias.

A continuación se describen cada uno de los factores del método.

1.4.2.1.- El Relieve Relativo (Sr)

Es el parámetro utilizado para analizar la rugosidad del terreno, involucra el concepto de pendiente de las laderas y se define como:

$$Rr = dh_{max} / A$$

donde:

Rr: Índice de Relieve Relativo (m/Km²)

dh_{max}: máxima diferencia de elevación por unidad de área (m)

A: área (km²)

En la Tabla 1.1 se muestran los valores determinados por Mora y Vahrson (1993) para el Valle Central de Costa Rica con sus respectivas clases.

| Índice de Relieve Relativo (m/km ²) | Calificativo | Valor del parámetro Sr |
|--|--------------|---------------------------|
| 0-75 | Muy Bajo | 0 |
| 76-175 | Bajo | 1 |
| 176-300 | Moderado | 2 |
| 301-500 | Medio | 3 |
| 501-800 | Alto | 4 |
| >800 | Muy Alto | 5 |

Tabla 1.1: Índice de Relieve Relativo (Tomado de Mora y Vahrson, 1993.)

1.4.2.2.- La Humedad del Suelo (Sh)

Para la determinación del parámetro de susceptibilidad por humedad del suelo, los autores utilizaron los valores promedios mensuales de la precipitación y el valor de la evapotranspiración promedio mensual, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado. Luego, asumieron una evapotranspiración potencial promedio de 125mm mensuales, para lo cual precipitaciones mensuales inferiores a 125mm no implican aumento de la humedad del suelo, mientras que una precipitación entre 125 y 250mm, sí la aumenta; y, precipitaciones superiores a

250mm conducen a una humedad del suelo muy alta. Por lo tanto, asignaron ponderaciones a los valores de la precipitación como se indica en la Tabla 1.2.

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

Tabla 1.2: Valores asignados a los promedios mensuales de lluvias (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

Posteriormente, los valores asignados se sumaron, obteniéndose así un resultado que varía, según la estación meteorológica, entre 0 y 24 unidades. El resultado refleja aspectos de la saturación del suelo, así como la distribución temporal de la presencia de humedad. Su clasificación se muestra en la Tabla 1.3.

| Suma de los valores asignados | Calificativo | Valor de parámetro Sh |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 0-4 | Muy Bajo | 1 |
| 5-9 | Bajo | 2 |
| 10-14 | Medio | 3 |
| 15-19 | Alto | 4 |
| 20-24 | Muy Alto | 5 |

Tabla 1.3: Clasificación del parámetro de humedad (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

1.4.2.3.- La Litología (SI)

Los tipos de suelo y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas. Su composición mineralógica, capacidad de retención de humedad, espesores y grado de meteorización, nivel de fracturación, buzamientos, posición y variabilidad de los niveles freáticos, etc. influyen en la estabilidad o inestabilidad de la ladera. Es claro que las propiedades geotécnicas deben ser lo mejor conocidas posible, sin embargo esto no siempre puede alcanzarse y la evaluación debe hacerse tan solo a base de descripciones geológicas generales. En la Tabla 1.4 se presentan las características más

relevantes (no excluyentes) que deben tomarse en cuenta para calificar el factor litológico según Mora y Vahrson (1993):

| Litologías | Calificativo | Valor del Parámetro |
|---|---------------------|----------------------------|
| Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo. Calizas duras, permeables. Rocas intrusivas poco fisuradas, nivel freático bajo. Basaltos, andesitas ignimbritas y otras rocas efusivas, sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas, sanas poco fisuradas, nivel freático bajo. Materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno. | Baja | 1 |
| Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, estratificación maciza (decimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, ignimbritas, rocas metamórficas poco o medianamente alteradas y fisuradas. Aluviones levemente compactos, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias. Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables. | Moderada | 2 |
| Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas, mediana a fuertemente alteradas, coluviales, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactos, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos. Resistencia al corte moderada a media, fracturación importante. | Media | 3 |
| Depósitos fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactos, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliación a favor de la pendiente y rellenos arcillosos, niveles freáticos someros. Resistencia al corte moderada a baja. | Alta | 4 |
| Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados. Resistencia al corte baja a muy baja. | Muy Alta | 5 |

Tabla 1.4: Calificativo del Factor Litológico (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

1.4.2.4.- La Sismicidad (Ts)

Mora y Vahrson (1993) analizaron varios eventos sísmicos, a partir de 1888, que generaron FRM importantes en el Valle Central. Considerando las condiciones litológicas, de relieve y de lluvias, observaron que el potencial de generación de deslizamientos a partir de sismos puede correlacionarse con la Escala de Intensidades de Mercalli Modificada. La Tabla 1.5 indica la capacidad generadora

de deslizamientos de los sismos según su intensidad MM y el valor del factor respectivo.

| Intensidad Mercalli Modificada | Calificativo | Valor del parámetro Ts |
|---|-----------------------|-----------------------------------|
| 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 | Extremadamente Fuerte | 10 |

Tabla 1.5: Calificación del Factor Sismicidad (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

1.4.2.5.- La Intensidad de Lluvias (Tp)

Para determinar las intensidades potenciales de las lluvias, los autores utilizaron los valores de lluvias máxima diaria para un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución GUMBEL a series temporales de lluvias extremas con tiempo de registro de más de 10 años. En la Tabla 1.6, se observa la ponderación posterior de los valores para series mayores y menores a 10 años.

| Precipitaciones máx. en 24 horas (mm) n>10 años, Tr = 100 años (GUMBEL) | Precipitaciones máx. en 24 horas (mm) N<10 años, Promedio | Calificativo | Valor del Parámetro Tp |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|
| <100 | <50 | Muy Bajo | 1 |
| 100-200 | 51-90 | Bajo | 2 |
| 200-300 | 91-130 | Mediano | 3 |

| | | | |
|---------|---------|----------|---|
| 300-400 | 130-175 | Alto | 4 |
| >400 | >175 | Muy Alto | 5 |

Tabla 1.6: Clasificación de los valores de las lluvias máximas de una duración del día con un período de retorno de 100 años (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

Con los valores de los valores descritos, Mora y Vahrson (1993) determinaron los siguientes valores y niveles de amenaza para el Valle Central de Costa Rica utilizando la ecuación (4):

| 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 |

Tabla 1.7: Clasificación del Nivel de Amenaza por FRM (Tomado de Mora y Vahrson, 1993).

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1.- CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS

2.1.1.- UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio se ubica en la provincia de Loja al sur del Ecuador y cubre una superficie de 252 km², ubicados entre las siguientes coordenadas: 694.000 a 706.000 de longitud Oeste; y, 9547.000 a 9568.000 de latitud Sur.

La zona se localiza a 647 km de la ciudad de Quito, desde la cual se puede acceder a través de la carretera Panamericana que cruza todo el valle interandino. Otras vías de acceso terrestre son desde Cuenca, también por la carretera Panamericana o desde la Costa ecuatoriana, por la carretera Guayaquil-Machala-Loja. También se puede llegar vía aérea, hasta el aeropuerto Camilo Ponce Enríquez de la ciudad de Catamayo, distante de Loja unos 36km.

La Figura 2.1 muestra la ubicación de la zona de estudio.

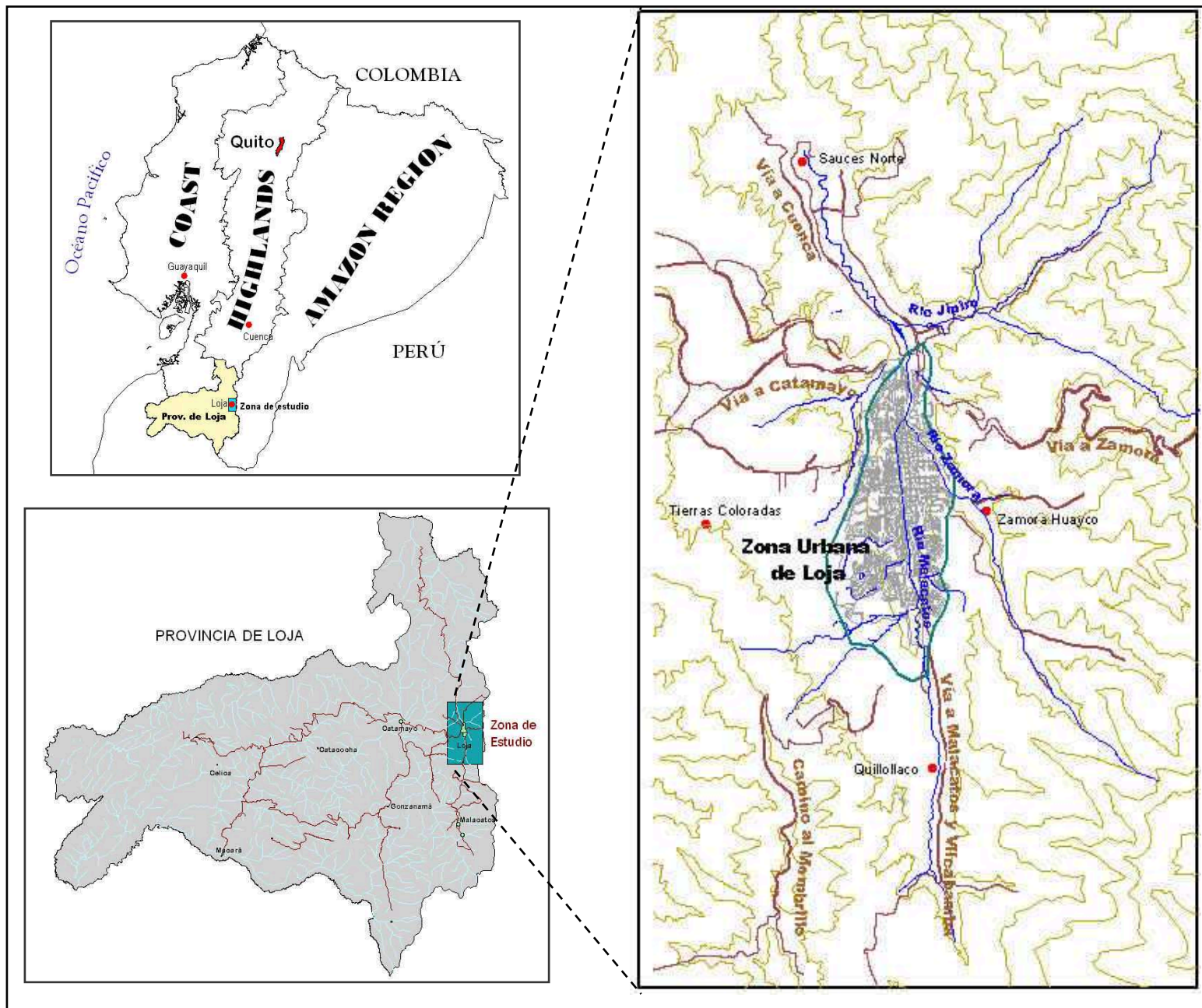


Figura 2.1:
Ubicación de la
zona de
estudio.

2.1.2.- MORFOLOGÍA

La cuenca de Loja forma parte del relieve de los Andes ecuatorianos del Sur. Tiene una forma elíptica, elongada N-S, con aproximadamente 25km en el eje N-S y 10km en el eje transversal (Kennerley, 1973). Su morfología presenta relieves variados desde estados juveniles de desarrollo hasta etapas de madurez; que reflejan el proceso de evolución y relleno de la cuenca sedimentaria a lo largo de su historia geológica.

La morfología general de la cuenca presenta las siguientes características:

- Una zona central, topográficamente baja (2120-2200msnm), que ocupa el eje principal de la cuenca, donde se asienta la ciudad, con un relieve casi plano y cubierta por material aluvial, el cual denota el curso de drenaje N-S del Río Malacatos, con un gradiente que varía entre 3° y 6°.
- Una zona de premontaña, rodeando la zona antes descrita, comprende los bordes sedimentarios que actúan como límites de la cuenca sedimentaria, cubre en parte los declives de las elevaciones circundantes compuestas por rocas metamórficas, con alturas promedio de 2400msnm que denotan un moderado relieve con suaves pendientes en el sentido de la depositación y muestran grandes y abruptas caídas o desfiladeros en contrapendiente originadas por procesos endógenos y exógenos.
- Otra zona de montaña en los bordes occidental y oriental de la cuenca, que constituye las estribaciones de las cordilleras y sus filos, compuesta exclusivamente por rocas metamórficas, con alturas entre 2600 y 3418 msnm. Muchas de las quebradas y pequeños drenajes que alimentan los ríos principales nacen en estas montañas.

2.1.3.- HIDROGRAFÍA

El área es drenada principalmente por los ríos Zamora y Malacatos, cuyos caudales fluyen hacia el Norte por el centro de la cuenca. Estos dos ríos se unen en la ciudad, continuando hasta el recinto Las Juntas, en donde cambian

radicalmente de dirección hacia el Este pasando por Jimbilla y tomando el nombre único de Zamora. El río Zamora es un afluente del río Amazonas que desemboca en el océano Atlántico.

Como unidades hidrográficas secundarias o subsecuentes, que circulan en direcciones mas o menos perpendiculares a los drenajes principales antes mencionados, se pueden citar los ríos Zamora Huayco y Jipiro, así como las quebradas Mónica, Quillollaco, Potrerillos, Violeta, Alumbre, Las Pavas, San Cayetano, La Banda, El Salado, etc, cuyas configuraciones forman una red dendrítica con caudales, que en la mayor parte de casos presentan volúmenes poco considerables. Se puede notar una mayor densidad de drenaje en la parte oriental de la cuenca (estribaciones de la Cordillera Real), básicamente debido al incremento de la pendiente, característico en las rocas metamórficas. Esto contrasta con el lado occidental, que tiene una configuración de tipo espaciado-subparalelo, presentes tanto al Norte como al Sur de este lado de la cuenca, reflejando la litología principalmente compuesta por rocas sedimentarias.

2.1.4.- CLIMA Y VEGETACIÓN

La cuenca de Loja goza de un régimen climático húmedo, debido a la acción de los vientos alisos que siempre soplan desde el Este, presentes entre los meses de Mayo y Junio; mientras que, en los meses de Julio a Agosto, en la cuenca se manifiestan variantes climatéricos del Este y desde el cañón del río Zamora, manifiestas en forma de garúas o lluvias dispersas, modificando el clima a frío y de humedad penetrante, especialmente hacia las cordilleras. Las temperaturas en la cuenca decrecen gradualmente con el incremento de elevación, fluctuando de 6-10° hacia las estribaciones y de 15-22° hacia el valle. Estos rangos de temperatura caracterizan a la cuenca con una temperatura promedio anual del aire a la sombra de 16°, una humedad relativa del 75%, y un promedio anual de precipitaciones que fluctúan entre 727,7 y 1018,6mm. Además, el viento se desplaza en diferentes direcciones con velocidades que varían entre 1-4,3 m/s.

La vegetación de la zona está controlada por los períodos de lluvias; sin embargo la altitud topográfica también es un factor importante que controla la densa vegetación de las estribaciones de la cordillera Real y las áreas bisecadas del Sur y Oeste de la cuenca. Esta vegetación consiste de fajas arbóreas, bosque de montaña baja, alterados por la acción antrópica; entre los cuales sobresalen: romerillo, alisos, pinos, eucaliptos; así como, algunas especies de vegetación silvestre típica de la región, tales como: chamana y chilca. Adicionalmente existen matorrales y hierba rojiza que cubren las pendientes prominentes (Espinosa y Pacheco, 1999).

2.1.5.- ASPECTOS SOCIALES Y ECONÓMICOS

La ciudad de Loja es un centro comercial e industrial, donde se negocian y transforman los productos agropecuarios, forestales y mineros de su región. Los productos tropicales, ganadería ovina y vacuna abastecen su industria agroalimentaria (harinera, aceitera, cafetera, azucarera), la más importante tras el retroceso de la tradicional textil. Otras industrias medicinales (quina) y de materiales de construcción añaden variedad a su hacer industrial. Dentro de la urbe existen atractivos turísticos como parques, iglesias y espacios de distracción. Su proximidad al Parque Nacional Podocarpus es un atractivo más de la ciudad. En la actualidad, toda la región en general registra una importante emigración. La población promedio de la ciudad es 127.200 habitantes. (Enciclopedia Encarta, 2005).

Según el INEC (Censo Poblacional del 2001), la población económicamente activa de 5 años y más corresponde a 62039 personas en el cantón Loja, de las cuales 40339 son hombres y 21700 mujeres. Las ocupaciones están distribuidas de la siguiente manera: operarios y operadores de maquinarias (22.5%), Trabajadores no calificados (17.8%), Profesionales técnicos (16.5%), Trabajadores de los servicios (15.4%), Agricultores (11.6%), Oficinistas (7.04%) y otros (9.5%). El total de analfabetismo en la ciudad es 4.5%, respecto al total de la población. En hombres corresponde a 3.7% y en mujeres a 5.3%.

2.2.- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

2.2.1.- MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de estudio se localiza en las estribaciones occidentales de la Cordillera Real que comprende un cinturón metamórfico de edad variada entre Paleozoico y Jurásico formada por divisiones litotectónicas separadas por fallas o suturas regionales con rumbos NNE. Estas divisiones comprenden unidades que muestran un grado de coherencia litotectónica y son de Este a Oeste: Zamora, Salado, Loja, Alao y Guamote.

La división Loja corresponde al basamento del área de estudio y debe su nombre a la ciudad de Loja, sobre cuya región aparece en su mayor extensión (aproximadamente 35km) (Aspden y Litherland, 1994). Ésta división está representada por rocas sedimentarias semipelíticas metamorfizadas, de edad Paleozoico (Unidades Chiguinda y Agoyán) intruídas por granitos Tres Lagunas del Triásico. También se incluyen en ella las anfíbolitas y migmatitas Sabanilla.

Las características de las unidades que conforman este terreno y están dentro del área de estudio se presentan en la Figura 2.2 y se describen a continuación:

- **Unidad Chiguinda (Paleozoico):** esta unidad domina la parte Sur de la Cordillera Real y constituye parte de la Serie no diferenciada Zamora de Kennerley (1973). Su litología comprende esencialmente cuarcitas y filitas negras como una secuencia semipelítica. En la parte Sur forma un cinturón de rocas de más de 30km de ancho, acuñándose hacia el Norte. Está en contacto tectónico con el granito Tres Lagunas hacia el Este y la migmatita Sabanilla hacia el Oeste. El espesor de esta secuencia es desconocido pero se lo podría medir en kilómetros (Aspden y Litherland, 1994). La unidad Chiguinda fue derivada de una fuente continental, probablemente en una cuenca intracratónica o un ambiente de margen pasivo. Esta Unidad aflora a lo largo de los drenajes de la parte oriental de la zona y la carretera Loja-Zamora.

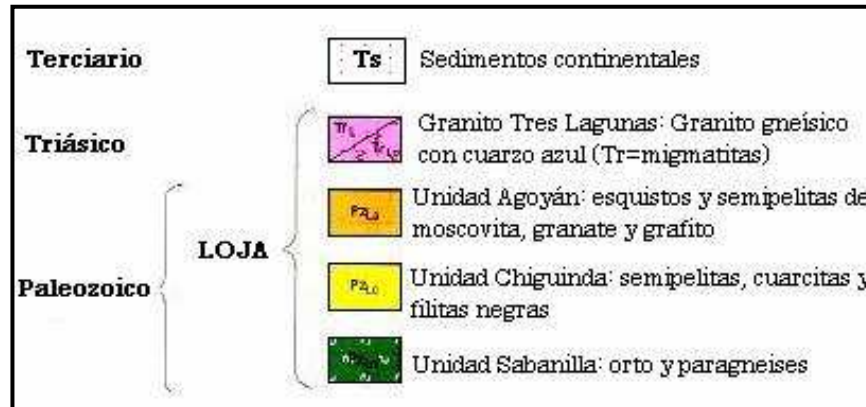
- **Unidad Agoyán (Paleozoico ?):** esta unidad de esquistos pelíticos y paragneises aflora principalmente en la parte Norte de la cordillera. El afloramiento más accesible se encuentra justo al Este de los túneles de Agoyán, cerca de Baños. Los contactos con las unidades adyacentes son tectónicos y está estrechamente relacionada con el granito Tres Lagunas (Aspden y Litherland, 1994).

La unidad Agoyán es más pelítica; y por tanto, en sentido estricto no es el equivalente de mayor grado de las semipelitas Chiguinda. Sin embargo, no hay evidencia para indicar que ella no se formó dentro de una cuenca común.

- **Granitos Tres Lagunas (Triásico Superior):** es la principal unidad ígnea del terreno Loja (Aspden et al, 1992a) pero ocurre también fuera de él como pequeños bloques tectónicos. Se encuentra asociada con las rocas metasedimentarias de Chiguinda y Agoyán a lo largo de toda la Cordillera Real. Sus contactos se infieren como tectónicos. Ocurre como lentes que varían de tamaño desde unos pocos centímetros hasta batolíticos. Su aspecto varía desde masivo a cizallado y esquistoso. Litológicamente consisten en monzogranitos y granodioritas de tamaño de grano medio a grueso y presentan megacristales de feldespato alcalino y cristales de cuarzo azul de hasta 14cm; características de identificación de la unidad en el campo.

- **Unidad Sabanilla (Paleozoico y Triásico):** comprende un grupo de orto y paragneises de grado medio a alto formando un cinturón de 10km de ancho. Los afloramientos más accesibles ocurren en la localidad de Sabanilla, en la carretera Loja-Zamora, la cual da su nombre a la unidad. Los contactos con las unidades adyacentes Chiguinda e Isimanchi, ambas de grado metamórfico bajo, son tectónicos. Geoquímicamente, la unidad Sabanilla es muy similar a la de Tres Lagunas (granitos tipo "S"). Se ha sugerido que las dos comparten un mismo origen (Litherland et al, 1994). Esta Unidad también aflora a lo largo de la carretera Loja-Zamora.

LEYENDA GEOLÓGICA



La evolución geodinámica de la cuenca de Loja es similar a la de las demás cuencas sedimentarias Miocénicas del Sur del Ecuador (Cuenca, Girón, Nabón, Malacatos-Vilcabamba y Catamayo-Gonzanamá) que presentan facies costeras marinas y sedimentarias continentales de edad Mioceno Medio a Tardío (Steinmann et al, 1999).

La sedimentación desde 19 hasta 9Ma (llamada Estado Pacífico Costero), fue predominantemente de tipo marino costero, extendiéndose sobre un área mucho mayor que los actuales perímetros de las cuencas. En esta etapa, la subsidencia extensional en la región interandina causó una ingresión de mares someros en las “bahías” de Loja y Cuenca, desde las cuencas de Manabí y Progreso (Hungerbühler et al, 2002). La fuente de la sedimentación en este período fue predominantemente la Cordillera Real. Éste Estado terminó cuando una etapa de compresión E-W hace aproximadamente 9.5-8Ma, exhumó la región y por tanto, la sedimentación se restringió a cuencas más pequeñas, remanentes de las cuencas extensivas más antiguas. Este período fue denominado Estado Intramontano (Steinmann et al, 1999); y, su fuente principal fue la Cordillera Occidental.

2.2.2.- GEOLOGÍA LOCAL

La cuenca de Loja corresponde a una de las cuencas sedimentarias Neógenas del Sur del Ecuador y tiene una forma elíptica elongada en dirección N-S (Kennerley, 1973). El basamento de la cuenca corresponde a rocas metamórficas de la Unidad Chiguinda, descrita anteriormente, perteneciente a la Cordillera Real; en tanto que la secuencia sedimentaria ha sido estudiada y descrita por varios autores como Kennerley (1973), Hungerbühler et al (2002), Steinmann et al (1999) y Noblet et al (1988). Las series sedimentarias en la cuenca de Loja están tectónicamente divididas por una falla inversa importante post-deposicional con vergencia al W, en dos partes, una oriental y otra occidental; yuxtaponiendo diferentes secuencias de sedimentos en sus límites mutuos (Hungerbühler et al, 2002). Dichas series yacen discordantemente sobre el basamento a los dos lados de la cuenca (Litherland et al, 1994). La litología de esta cuenca se resume a continuación y se presenta en la Figura 2.3:

- **Formación El Trigal:** Aparece en el lado occidental de la cuenca desde Salapa en el Norte hasta la carretera Catamayo-Loja en el Sur (Izquierdo, 1991); y, consiste en areniscas gruesas, capas conglomeráticas finas y en menor cantidad limolitas, las cuales fueron depositadas en ambiente predominantemente fluvial. En contraste con las otras formaciones del área de Loja, las cuales contienen abundantes clastos metamórficos; la Formación El Trigal contiene principalmente clastos volcánicos (Hungerbühler et al, 2002). Las limolitas son poco consolidada y no presentan espesores mayores a 0.30m; mientras que los conglomerados y areniscas forman intercalaciones con bancos de hasta 12m.
- **Formación La Banda:** Yace concordante sobre la Fm El Trigal, y consiste en calizas blancas, lutitas margosas, cherts, brechas de calizas intraformacionales y areniscas de grano fino de color amarillento. Esta formación tiene un espesor máximo de 20m, es fácilmente distinguible y lateralmente continua. El incremento de capas de areniscas marca la transición hacia arriba, de la Fm La Banda a la Fm El Belén (Hungerbühler et al, 2002).

- **Formación El Belén:** Tiene un espesor de 300m y se caracteriza por la presencia de gruesos canales de areniscas y depósitos conglomeráticos, los cuales alternan con areniscas más finas con estratificación cruzada; y, en menor cantidad capas de lutitas. En la parte inferior de la Formación se observan slumps de escala métrica. La variación de facies se interpreta como una transición de un ambiente lagunar (Fm La Banda) a uno mixto fluvio-deltaico (Fm El Belén) (Hungerbühler et al, 2002).
- **Formación San Cayetano:** Es contemporánea con las formaciones La Banda y El Belén y aflora en el lado oriental de la cuenca. Está dividida en tres miembros separados por límites transicionales (Hungerbühler et al, 2002), y posiblemente alcanza un espesor máximo de 800m. El *Miembro Arenisca Inferior* consiste principalmente en areniscas y conglomerados canalizados; mientras que, el *Miembro Limonita* se caracteriza por lutitas cafés, grises y blancas (parcialmente silicificadas), abundantes capas de diatomitas y algunos horizontes piroclásticos. El *Miembro Arenisca Superior* muestra un similar carácter litológico que el inferior, pero generalmente con tamaño de grano más fino y tendencia grano-creciente (Hungerbühler et al, 2002). La formación presenta grandes planos de estratificación con buzamientos variables entre 35 y 50°, hacia NE y NNE. Las lutitas tienen un alto grado de meteorización (formación de arcillas rojizas y argilitización), lo que provoca la formación de suelos arcillosos plásticos.
- **Formación Quillollaco:** Está presente tanto al lado oriental como al occidental de la cuenca y sobreyace las formaciones más antiguas con discordancia angular. La Formación alcanza un espesor máximo de 600m al Este de la ciudad de Loja y generalmente consiste en conglomerados clasto-soportados con aporte metamórfico y areniscas en forma de lentes. La imbricación de los cantos implica que el transporte fue de E a W. En los afloramientos de la carretera Loja-Zamora esta formación tiene una potencia superior a los 30m con fuertes ángulos de buzamiento (30-45°)

hacia el eje de la cuenca; y, presenta fuerte erosión en surcos y cárcavas debido a que la matriz arenosa de los conglomerados es poco consolidada.

- **Metamórficos indiferenciados:** corresponden a esquistos pelíticos, filitas negras y cuarcitas en menor cantidad. Afloran en la carretera antigua a Catamayo y en algunos cortes de talud en caminos cercanos al barrio Tierras Coloradas.
- **Depósitos aluviales:** corresponden a depósitos de los ríos Malacatos y Zamora, ubicados en la parte central de la cuenca. Estos depósitos tienen una matriz areno-arcillosa con líticos de tipo metamórfico como cuarcitas y filitas y sedimentarios como conglomerados y lutitas.
- **Depósitos cuaternarios:** están representados por coluviales consolidados con matriz arenosa y una mezcla de clastos de aporte volcánico y metamórfico. Afloran en algunas zonas a lo largo de la carretera Loja-Catamayo.

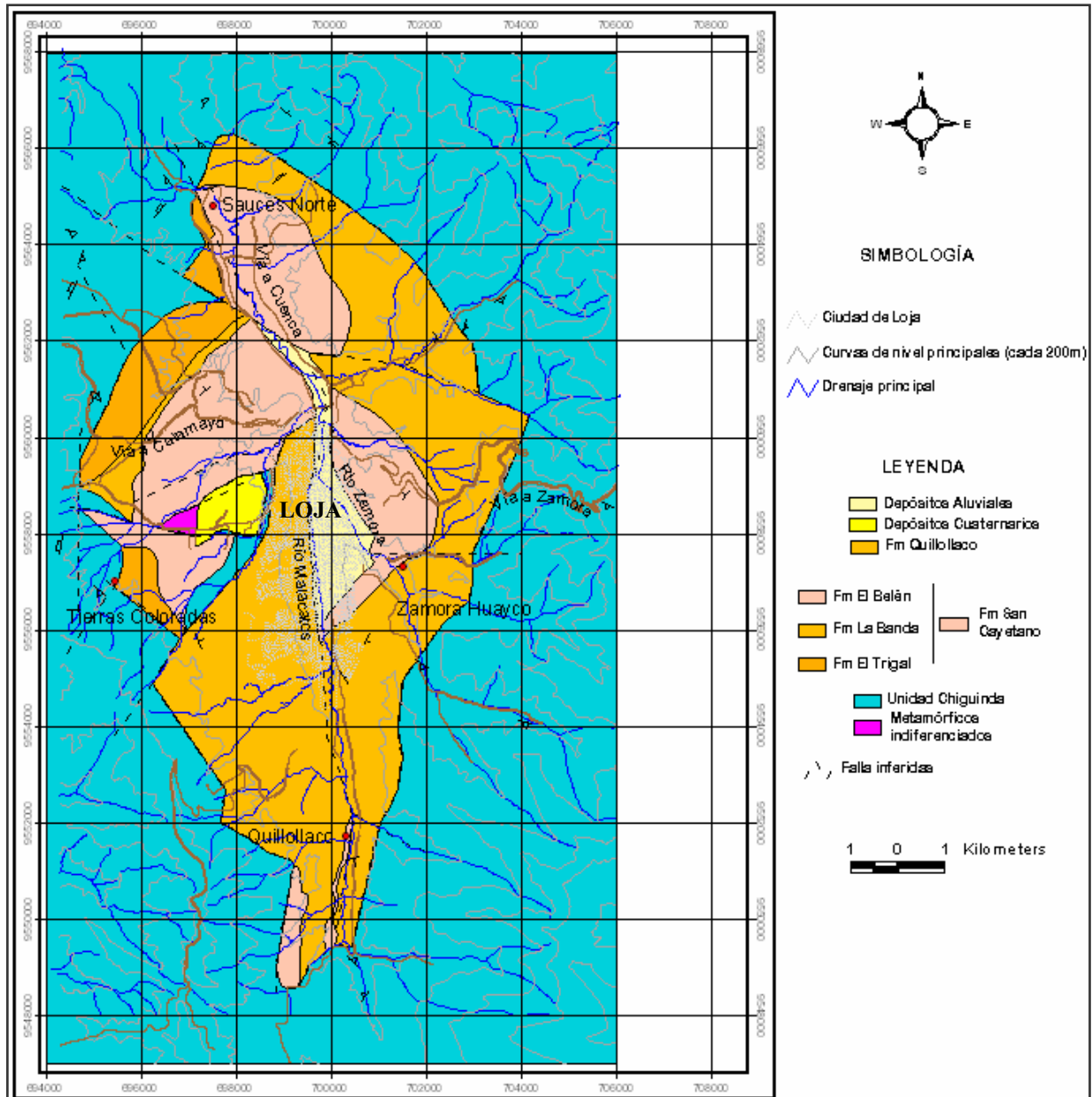


Figura 2.3: Mapa Geológico de la cuenca de Loja (Tomado, modificado y simplificado de UCGM-UTPL, 2005)

2.2.3.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Según Izquierdo (1991), la cuenca se encuentra dividida en un área oriental y otra occidental por efecto de una falla longitudinal N160-N170°, que coincide con el curso actual del río Zamora; y, la cual se activó durante la depositación de la Fm San Cayetano.

La actividad de otras fallas con rumbo aproximado E-O en el extremo oriental de la cuenca, como las que se encuentra a lo largo de la Qda Pangora y el río Jipiro; al igual que los sistemas de pliegues encontrados en Virgenpamba y la nueva vía Loja-Zamora, evidencian mayor actividad tectónica en ese lado de la cuenca (Izquierdo, 1991).

En términos generales los sedimentos expuestos en el lado Este de la Cuenca de Loja de edad Mioceno (15-10 Ma) han sufrido un volcamiento producto de la acción de una falla de edad Mioceno Tardío ubicada en el margen oriental. Esta misma falla causó la superposición de las rocas metamórficas del Mesozoico sobre los sedimentos del Mioceno y un acortamiento adicional evidenciado por pliegues abiertos en la Formación Quillollaco. Simultáneamente se dio un plegamiento originando formas isoclinales cuyos ejes son paralelos a la falla.

Respecto a la sismicidad en la zona de estudio, Egred (1999) destaca los siguientes terremotos con intensidades iguales o mayores a VIII, según el catálogo sísmico del Ecuador:

| Nro | Fecha | Epicentro | | Profundidad (km) | Intensidad MM | Provincia de Referencia |
|-----|------------|-----------|--------|---------------------|------------------|---------------------------------|
| | | Lat. | Long. | | | |
| 1 | 1749 01 20 | -4.00 | -79.20 | - | VIII | Loja |
| 2 | 1913 02 23 | -4.00 | -79.40 | - | VIII | Loja, Azuay |
| 3 | 1953 12 12 | -3.40 | -80.60 | - | VIII | Loja y N de Perú |
| 4 | 1970 12 10 | -3.79 | -80.66 | 42 | IX | Loja, El Oro, Azuay y N de Perú |

Tabla 2.1: Terremotos históricos con Intensidad >VIII en la zona de estudio.

Correa et al (2003), desarrollaron un mapa preliminar de isoaceleraciones del Ecuador a partir del método de Trifunac (1976), en donde destacan (dentro de la zona de Cordillera Occidental, Callejón Interandino y Cordillera Real), el trend Cuenca-Machala-Loja, que involucra las fallas Tarqui, Girón y Celica-Macará (?) con una tendencia general NE que le dan el rumbo a las curvas de aceleración. En las dos últimas fallas se registran los valores más altos (0.5-0.7 g).

Esta zona interandina presenta una peligrosidad sísmica de alta a media dominada por fallas con una tendencia NE. En este sector (que además incluye parte de la cuenca Alamor-Lancones en la frontera con el Perú) se da un importante cambio en la dirección de los Andes de NE a NO. A pesar de que en esta zona no se tienen suficientes datos, se puede señalar que este nivel de peligrosidad sísmica se debe al proceso de subducción generado en la costa de Ecuador-Perú y que se caracteriza por un cambio importante en la dirección de la subducción y de los Andes. Los valores de aceleraciones sísmicas determinados para la parte sur del Ecuador (que incluye la zona de estudio) corresponden a 0.3-0.9 g, y son relativamente menores a la sismicidad de la zona centro-norte del país (Isoaceleraciones entre 1.1 y 1.9g).

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR FRM

3.1. – EL MÉTODO DE BRABB

Este método utiliza tres factores básicos para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad por FRM representados en forma cartográfica; y son: el Mapa Inventario de FRM, el Mapa de Unidades Litológicas y el Mapa de Pendientes.

El Mapa Inventario de FRM se desarrolló en base a fotointerpretación y trabajo de campo y el Mapa de Unidades Litológicas fue sintetizado a partir de la información existente, mientras que el Mapa de pendientes se derivó del mapa topográfico digital a escala 1:25000 a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM).

Para la determinación de la Susceptibilidad Parcial (SP) se realizó un geoprocésamiento (Union) entre el Mapa de Unidades Litológicas y el Mapa Inventario de FRM, utilizando Spatial Analyst de ArcView. De esta forma se obtuvo una matriz de susceptibilidad parcial o relativa. Finalmente, para establecer la matriz de susceptibilidad Total (ST), se tabularon las áreas deslizadas en cada unidad litológica para cada rango de pendiente utilizando álgebra de mapas. Este procedimiento se esquematiza en la Figura 3.1.

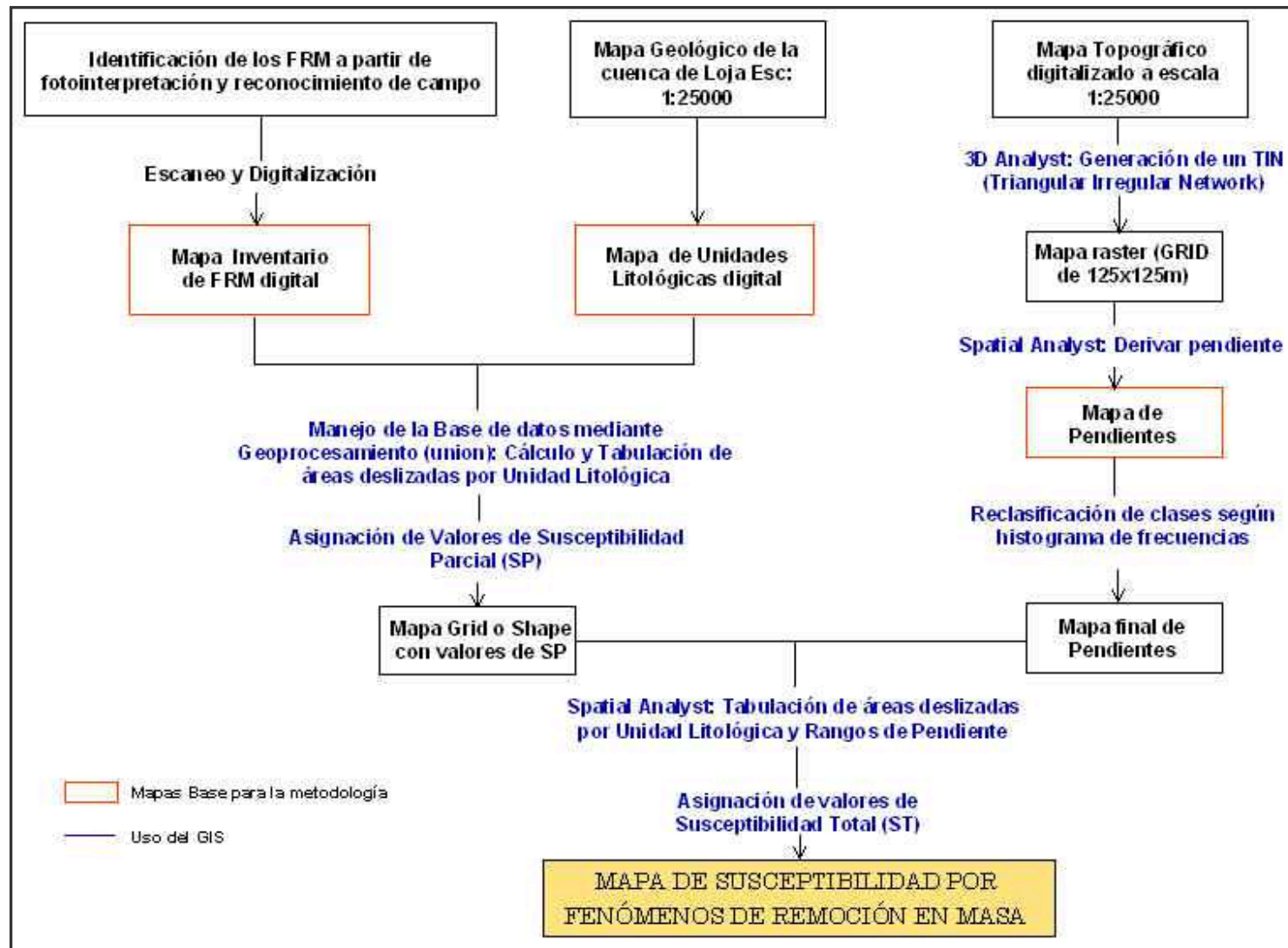


Figura 3.1: Diagrama de Flujo del Método de Brabb, utilizando un SIG.

3.1.1. – EL MAPA INVENTARIO DE FRM

Para elaborar el Mapa Inventario de FRM, se realizó primero el análisis e interpretación de 9 fotografías aéreas a escala 1:30000 del año 1984. Adicionalmente se utilizaron fotografías a escala 1:5000 del año 2003 para algunas zonas. Se identificaron los movimientos en masa evidentes, su tipología y grado de actividad; así como, los depósitos y escarpes relictos relacionados con movimientos en masa.

Posteriormente se realizó el reconocimiento de campo para identificar, localizar y caracterizar de manera más precisa los movimientos en masa e identificar y localizar aquellos más pequeños no visibles en fotos aéreas. Se puso énfasis en la tipología, grado de actividad y medidas morfométricas aproximadas; así como, el material del cual se componen, su morfología, las condiciones de agua superficial existentes en cada uno y se realizó un esquema general o foto. La información se recopiló en fichas de campo, cuyos ejemplos se muestran en el Anexo 2.

Adicionalmente se consideraron también algunos FRM puntuales identificados por Valarezo (2002), que presentan áreas menores a 10000 m², y que son importantes para este trabajo por su grado de actividad y ubicación, los mismos que se detallan en la Tabla 3.1. En el Mapa 1 (Inventario de FRM) se presenta la información referente a los movimientos en masa y en la Tabla 3.2 se muestra una síntesis de las características principales de los FRM identificados.

| DESGLIZAMIENTOS PUNTUALES EN LA CUENCA SEDIMENTARIA DE LOJA | | | | | | |
|---|---------|---------|--------------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| Número | UTM (X) | UTM (Y) | Sector | Largo (m) | Ancho (m) | Área (m ²) |
| 1 | 696224 | 9558190 | Bolonia | 10 | 10 | 100 |
| 2 | 701396 | 9558709 | Las Palmeras | 120 | 30 | 3600 |
| 3 | 699897 | 9549269 | Nudo de Cajanuma | 100 | 60 | 6000 |
| 4 | 701106 | 9559412 | Los Faiques | 50 | 50 | 2500 |
| 5 | 700204 | 9558972 | Univisión | 30 | 20 | 600 |
| 6 | 699038 | 9558794 | Colegio A Valarezo | 7 | 20 | 140 |
| 7 | 699492 | 9556310 | Colegio 27 febrero | 80 | 50 | 4000 |
| 8 | 700255 | 9559105 | Calle Berlín | 60 | 30 | 1800 |
| 9 | 700486 | 9556134 | Urbanización El Prado | 20 | 20 | 400 |
| 10 | 699749 | 9549051 | Nudo de Cajanuma | 50 | 100 | 5000 |
| 11 (a y b) | 701168 | 9558123 | Zamora Huayco | xxx | xxx | xxx |
| 12 | 700945 | 9558225 | Casa del Ángel | 80 | 30 | 2400 |
| 15 | 697129 | 9560470 | El Belén | 40 | 20 | 800 |
| 18 | 698656 | 9561920 | Aguas Hediondas | 10 | 20 | 200 |
| 19 | 967793 | 9563422 | Sauces Norte | 30 | 25 | 750 |
| 20 | 699077 | 9558900 | Escuela Alejandrino Velasco | 25 | 40 | 1000 |
| 21 | 699241 | 9558563 | Iglesia El Pedestal | 3 | 6 | 18 |
| 22 | 699235 | 9558510 | Calle Nicolás García | 1 | 50 | 50 |
| 23 | 699273 | 9559164 | Celi Román | 100 | 100 | 10000 |
| 24 | 700512 | 9558428 | Colegio Beatriz Cueva de Ayora | 3 | 60 | 180 |
| 25 | 700057 | 9559370 | Av. Santiago de las Montañas | 25 | 10 | 250 |
| 26 | 696446 | 9560147 | El Belén | 40 | 40 | 1600 |
| 27 | 695710 | 9559986 | El Belén | 100 | 100 | 10000 |
| 28 | 700435 | 9550343 | Dos Puentes | 40 | 20 | 800 |
| 29 | 700254 | 9555062 | Los Rosales | 15 | 20 | 300 |

Tabla 3.1: Deslizamientos puntuales en la Cuenca de Loja (Tomado de Valarezo Roberto, Tesis UTPL-2002)

| SÍNTESIS DE LOS FRM EN LA CUENCA DE LOJA | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------------------------|--------------------------|--|
| Tipología | Activos | Inactivos | Relictos | Total | Área Total (m ²) | Profundidad Promedio (m) | Densidad (nro de FRM/km ²) |
| Avalanchas de detritos | 0 | 2 | 0 | 2 | 61,779 | | 0.008 |
| Caídas de Roca | 0 | 0 | 6 | 6 | 816,856 | | 0.024 |
| Deslizamientos rotacionales | 21 | 11 | 8 | 40 | 3,516,061 | 9.9 | 0.159 |
| Deslizamientos traslacionales | 24 | 4 | 8 | 36 | 3,762,889 | 5.09 | 0.143 |
| Zonas de erosión regresiva fluvial | 2 | 0 | 0 | 2 | 768,585 | | 0.008 |
| Flujos | 0 | 16 | 15 | 31 | 5,436,630 | 8.2 | 0.123 |
| Zonas de reptación | 10 | 0 | 0 | 10 | | 0.4 | 0.040 |
| Total | 57 | 33 | 37 | 127 | 14,362,800 | | |

Tabla 3.2: Resumen de las características de los FRM representados en el mapa inventario.

3.1.2. – EL MAPA DE UNIDADES LITOLÓGICAS

Para la realización de este mapa se utilizó como base el Mapa Geológico a escala 1:25000 elaborado por la Unidad Civil, Geología y Minas (UCGM) de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), en el año 2005 (ver página 28). A partir de este mapa se elaboró un mapa de unidades litológicas con el fin de agrupar o subdividir unidades con las mismas características litológicas y similar comportamiento de susceptibilidad a FRM. Esto se hizo en base a las descripciones de litología, estructuras y reconocimiento de campo de las unidades.

3.1.3. – EL MAPA DE PENDIENTES

Para la realización del mapa de pendientes se utilizó el mapa topográfico digital a escala 1:25000, elaborado por la UCGM de la UTPL. A partir de este mapa se generó un Modelo de Elevación del Terreno (DEM) (Figura 3.2) con ayuda de la extensión 3D Analyst de ArcView, el mismo que muestra la morfología de la cuenca, los rangos de elevación y la distribución de la ciudad en la cuenca sedimentaria.

Luego, a partir del DEM, se creó un mapa Raster o Grid, con una tamaño de celdas de 125x125m. Para escoger este tamaño de celda se utilizó el criterio del menor tamaño de FRM cartografiado en el Mapa Inventario de FRM; el mismo que corresponde aproximadamente a 100m en su longitud máxima.

Finalmente, con el tamaño de celda determinado (125x125m), se derivó el mapa de pendientes, el mismo que por defecto genera 5 rangos, como lo muestra el histograma de la Figura 3.3.

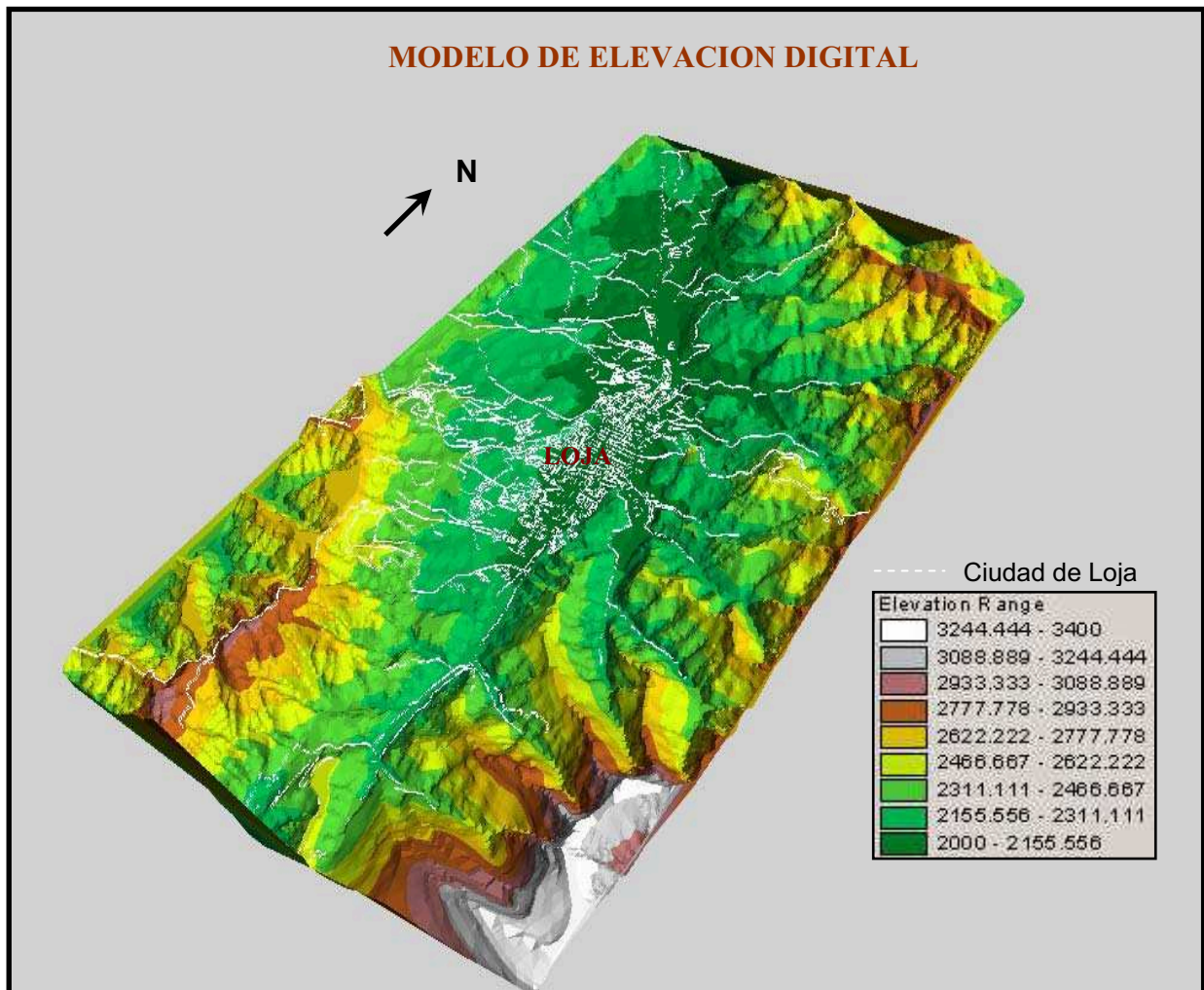


Figura 3.2: Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio.

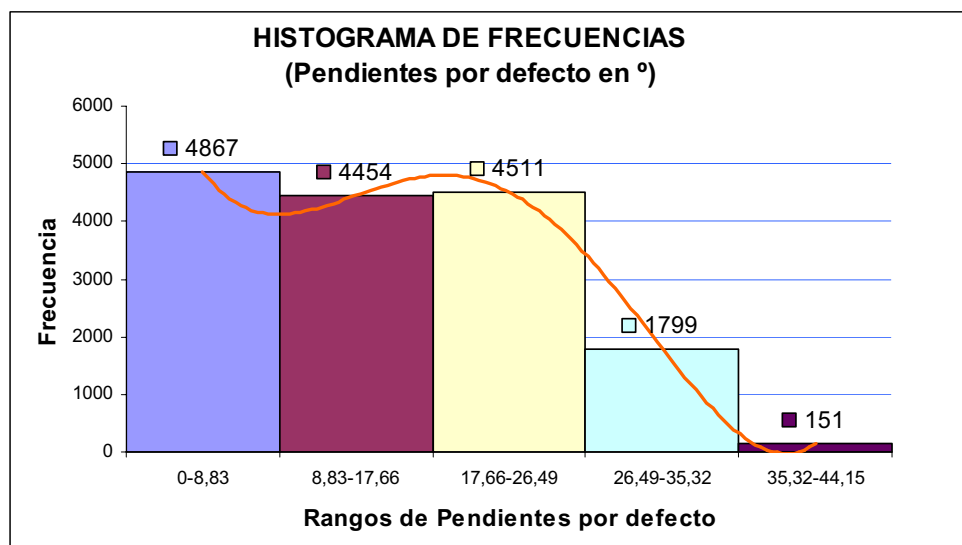


Figura 3.3: Histograma de frecuencias para los rangos de pendiente por defecto.

Puesto que los rangos de pendientes obtenidos son por defecto, seleccionados automáticamente por el SIG, es indispensable redefinir o reclasificar dichos rangos. Como se observa en la Figura 3.3, el histograma de frecuencias muestra una distribución no-uniforme, de manera que los rangos de pendiente tienen una amplitud constante de 8.33° , pero con un número de celdas (frecuencia) diferente, en cada uno de estos rangos.

Para que los rangos de pendiente tengan la misma representatividad en el desarrollo del método se uniformizaron los rangos de manera que todos tengan la misma frecuencia. Esto es una modificación a la metodología original de Brabb (Varnes, 1984). Para esto, se elaboró un histograma plano; y, a partir de él, se encontraron los rangos de pendiente, que se usaron finalmente para obtener el mapa. Este histograma se muestra en la figura 3.4.

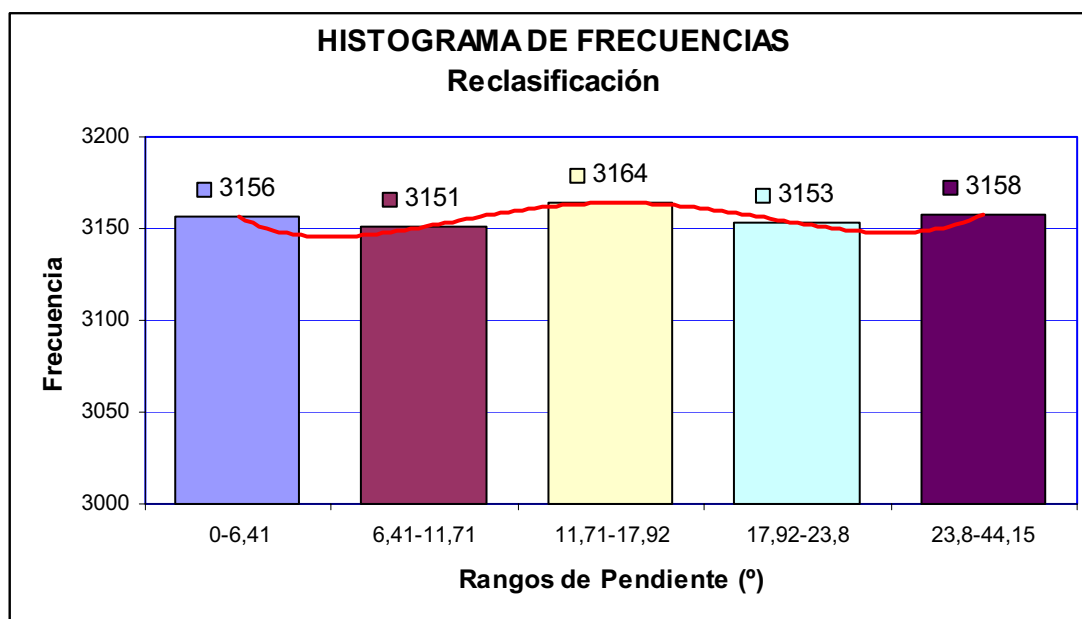


Figura 3.4: Histograma de frecuencias plano. Rangos de pendiente reclasificados.

La Figura 3.5 muestra los Mapas de pendientes (a) por defecto; y, (b) con los rangos reclasificados; mostrando que los rangos de pendientes más fuertes (colores más oscuros) se han realzado en el mapa reclasificado.

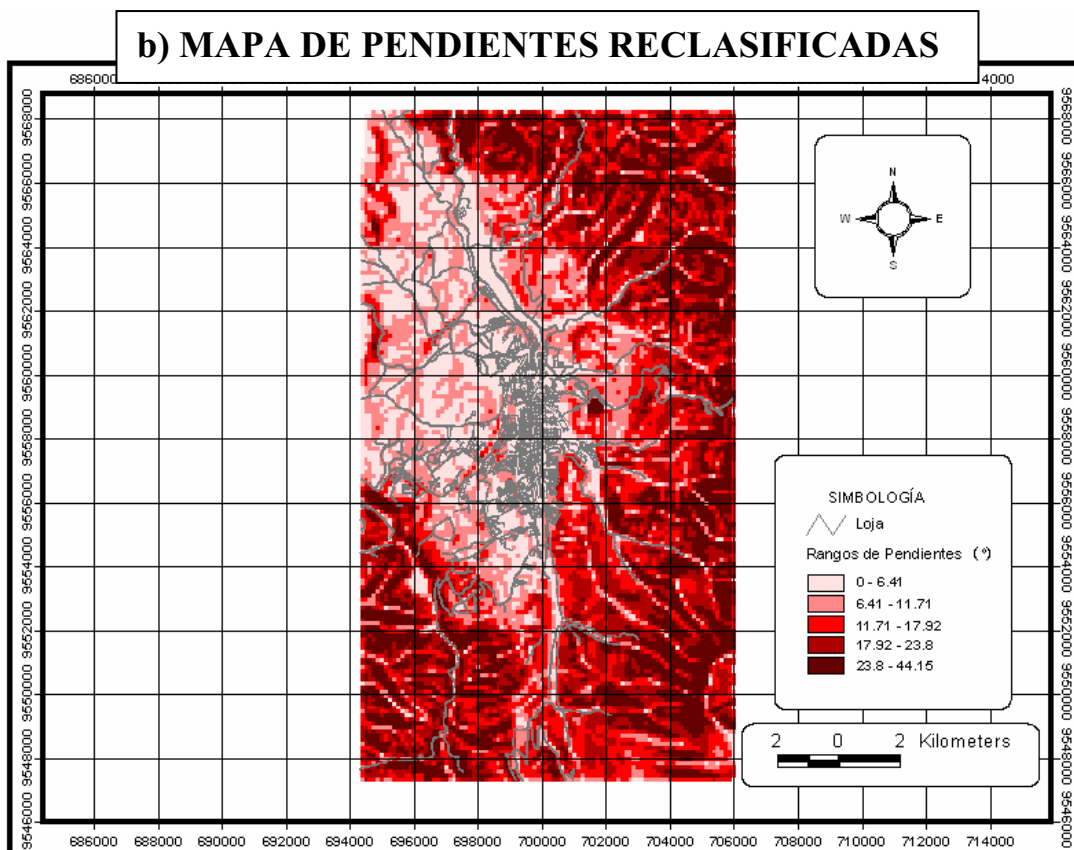
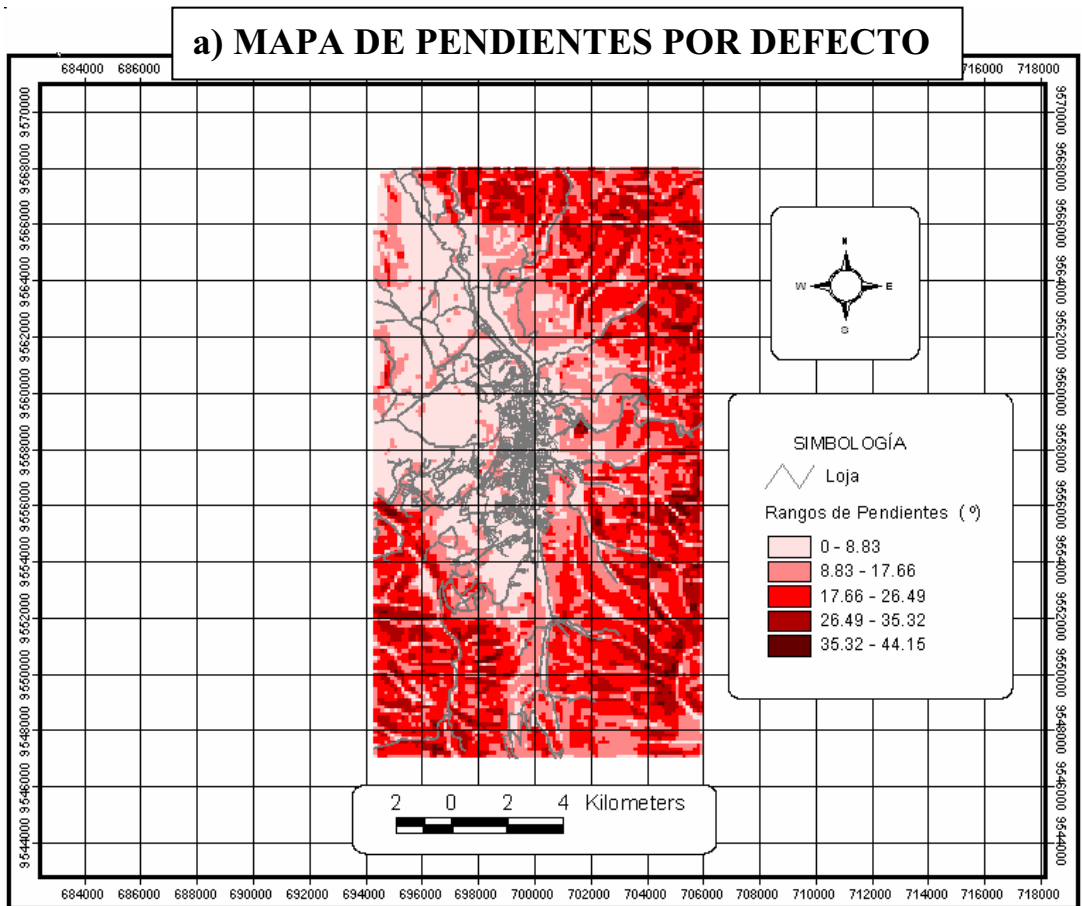


Figura 3.5: a) Mapa de Pendientes por defecto y b) Mapa de Pendientes reclasificadas.

Para la elaboración del método de Brabb originalmente propuesto en 1978, se utilizó un mapa con seis rangos de pendiente en porcentajes: 0-5, 5-15, 15-30, 30-50, 50-70 y >70% (Varnes, 1984).

3.1.4. – EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR FRM

En el presente trabajo se realiza la evaluación de la susceptibilidad por FRM mediante el método de Brabb, tal como fue propuesto en 1978 (Varnes 1984); y, adicionalmente se ensayan cuatro variaciones a este método. Para determinar la SP en este trabajo, no se consideraron los FRM relictos, puesto que los procesos que los originaron no existen actualmente y no son iguales a aquellos que provocaron los FRM activos e inactivos actuales.

3.1.4.1.- Método Original

Las principales características de esta evaluación son utilizar un mapa de pendientes con 6 rangos de pendientes en porcentajes, 7 rangos de SP (incluidos los depósitos de deslizamientos), utilizar el criterio del 30% para la determinación de la susceptibilidad total (ST) y denominar a los depósitos deslizados como L o máxima SP.

- **Determinación de la Susceptibilidad Relativa o Parcial (SP)**

Se elabora la matriz de susceptibilidad parcial (SP) considerando el área aflorante de cada unidad litológica (columna 1) y el área deslizada en cada una de ellas (columna 2), para obtener el porcentaje deslizado por unidad litológica (columna 3). A la unidad denominada depósitos deslizados se le atribuye la máxima susceptibilidad parcial o relativa (L) y a las demás unidades se las clasifica en susceptibilidades menores, considerando sus rangos de porcentaje de área deslizada en relación al área aflorante. Debido a la falta de información detallada de las características de las unidades litológicas, se determinan los rangos de SP mediante un análisis puramente estadístico considerando 6 clases entre 0 y 4.75%, de manera que el rango es igual a 0.791. Esto es diferente a lo propuesto por Brabb (Varnes, 1984), en donde aparentemente la clasificación de la

susceptibilidad parcial no tiene una solución estadística y posiblemente se basa en similitudes sobre las características de las diferentes unidades litológicas. En la Tabla 3.3 se muestran las susceptibilidades parciales según los rangos determinados y en la Tabla 3.4 se presenta la matriz de SP.

| RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD PARCIAL | |
|-----------------------------------|-----|
| RANGOS | SP |
| 0-0.791 | I |
| 0.791-1.583 | II |
| 1.583-2.375 | III |
| 2.375-3.166 | IV |
| 3.166-3.958 | V |
| 3.958-4.75 | VI |
| >4.75 | L |

| |
|--------------------|
| $4.75-0 = 4.75$ |
| $4.75 / 6 = 0.791$ |

Tabla 3.3: Rangos de SP considerando porcentajes.

| UNIDADES LITOLÓGICAS | (1) AREA LITOLÓGICA (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS REGIONALES (CAMPO) (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS PUNTUALES (m ²) | (2) AREA TOTAL DESLIZADA (m ²) | (3) % TOTAL DESLIZADO POR LITOLOGIA | SP |
|------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|-------------------------------------|-----|
| Fm La Banda | 1.558.341,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 301.969,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Depósitos Aluviales | 4.051.793,00 | 0,00 | 1.030,00 | 1.030,00 | 0,03 | I |
| Fm El Trigal | 6.168.529,00 | 5.254,28 | 10.000,00 | 15.254,28 | 0,25 | I |
| Fm El Belén | 11.307.602,00 | 38.251,43 | 2.700,00 | 40.951,43 | 0,36 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 1.493.652,00 | 7.844,48 | 0,00 | 7.844,48 | 0,53 | I |
| Unidad Chiguinda | 165.718.326,00 | 2.819.621,65 | 11.000,00 | 2.830.621,65 | 1,71 | III |
| Fm Quillollaco | 47.723.160,00 | 2.069.973,43 | 16.708,00 | 2.086.681,43 | 4,37 | VI |
| Fm San Cayetano | 13.675.416,00 | 638.724,03 | 11.050,00 | 649.774,03 | 4,75 | VI |
| Depósitos deslizados | 5.579.669,30 | 5.579.669,30 | 0,00 | 5.579.669,30 | 100,00 | L |
| TOTAL AREA | 251.998.788,00 | | | | | |

Tabla 3.4: Determinación de la Susceptibilidad Parcial (SP).

- **Determinación de la Susceptibilidad Absoluta o Total (ST)**

Se elabora otra matriz considerando las unidades litológicas y su susceptibilidad parcial, los rangos de pendientes determinados en el Mapa de pendientes (6 rangos en porcentaje) y la frecuencia (número por unidad litológica) de FRM en cada rango de pendientes. La Tabla 3.5 muestra la matriz de frecuencias de FRM para cada unidad litológica tabulada para cada rango de pendiente.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | 0-5 | 5--15 | 15--30 | 30--50 | 50--70 | >70 | |
| Fm La Banda | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Aluviales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Trigal | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Belén | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | I |
| Unidad Chiguinda | 5 | 25 | 41 | 51 | 44 | 7 | III |
| Fm Quillollaco | 4 | 23 | 37 | 31 | 8 | 0 | VI |
| Fm San Cayetano | 3 | 10 | 11 | 10 | 2 | 0 | VI |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.5: Tabulación del número de FRM por unidades litológicas y pendientes.

La Figura 3.6 muestra de mejor forma la distribución de las frecuencias en las unidades litológicas y en los rangos de pendientes determinados.

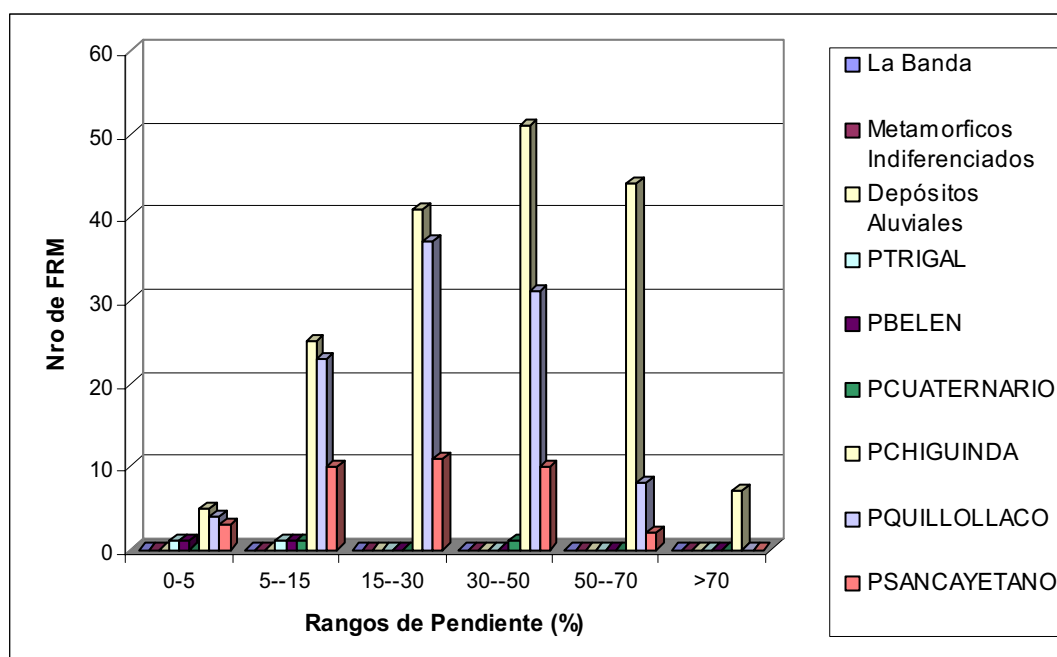


Figura 3.6: Distribución de las frecuencias de FRM (Método original).

A partir de la Tabla 3.5, se determina la susceptibilidad absoluta. Para ello se aplicó el criterio del 30%, por el cual una litología tiene el máximo valor de su SP únicamente en donde la pendiente exceda el 30% (Varnes, 1984). Además, a los depósitos de deslizamientos se denominan con la mayor SP = L. La Tabla 3.6 muestra la determinación de la susceptibilidad total.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | 0-5 | 5--15 | 15--30 | 30--50 | 50--70 | >70 | |
| Fm La Banda | I | I | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | I | I | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | I | II | II | III | III | I | III |
| Fm Quillollaco | I | IV | V | VI | II | I | VI |
| Fm San Cayetano | II | V | V | VI | II | I | VI |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.6: Matriz con valores de ST obtenidos.

En base a la tabla anterior y usando ArcView, se elabora el Mapa de Susceptibilidad para la zona de estudio. Para la representación cartográfica final de la susceptibilidad total se consideran únicamente los 7 rangos de ST determinados en esta evaluación. La Figura 3.7 muestra el Mapa de Susceptibilidad para esta evaluación.

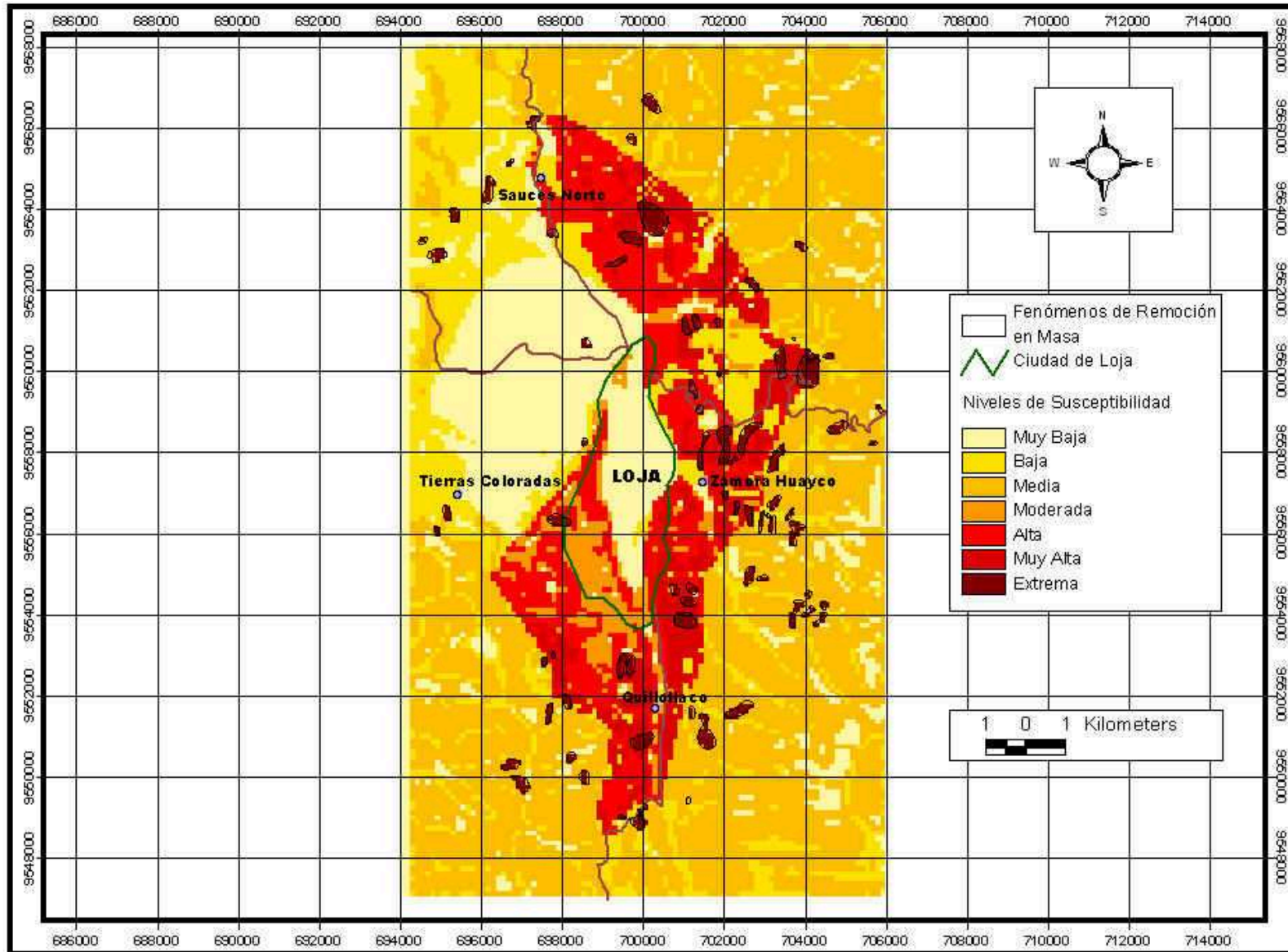


Figura 3.7:
Mapa de
Susceptibilidad para
la zona de estudio
mediante el método
original de Brabb.

3.1.4.2.- Variación Nro 1

Esta evaluación difiere de la original, antes desarrollada, únicamente en la determinación de la susceptibilidad total (ST), que se realiza en base a la tabulación de las áreas deslizadas por cada unidad litológica y en cada rango de pendientes.

- **Determinación de la Susceptibilidad Absoluta o Total (ST)**

Partiendo de los valores establecidos para la SP (Tabla 3.4), se elabora la matriz de ST, considerando las unidades litológicas, el mapa de pendientes con 6 rangos y las áreas deslizadas de FRM, tabuladas para cada unidad litológica en cada rango de pendientes (Tabla 3.7).

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SR |
|------------------------------|----------------------|---------|---------|-----------|---------|--------|-----|
| | 0-5 | 5--15 | 15--30 | 30--50 | 50--70 | >70 | |
| Fm La Banda | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Aluviales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Trigal | 716 | 4,540 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Belén | 37,557 | 698 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 0 | 6,289 | 0 | 1,545 | 0 | 0 | I |
| Unidad Chiguinda | 45,983 | 298,345 | 279,890 | 1,274,289 | 885,011 | 53,210 | III |
| Fm Quillollaco | 17,061 | 183,544 | 727,559 | 1,081,247 | 65,407 | 0 | VI |
| Fm San Cayetano | 49,940 | 33,863 | 411,435 | 125,960 | 17,436 | 0 | VI |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.7: Tabulación de las áreas deslizadas por unidades litológicas y pendientes.

La Figura 3.8 muestra la distribución de las áreas deslizadas en cada unidad litológica y para cada rango de pendientes.

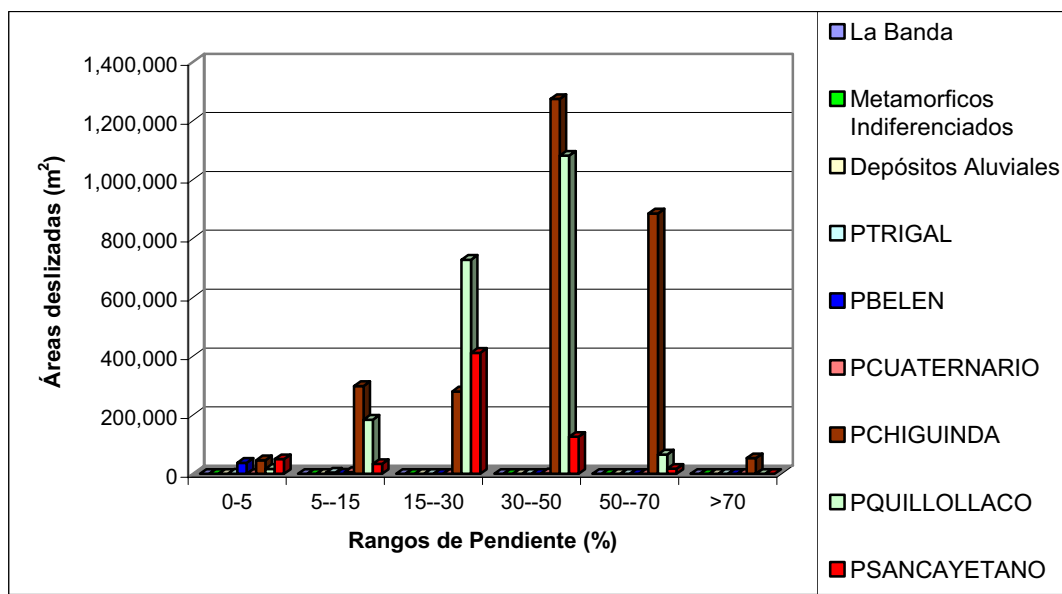


Figura 3.8: Distribución de las frecuencias de FRM (Variación 1).

A partir de la Tabla 3.7, se determina la susceptibilidad absoluta. Para ello, de igual forma que la evaluación anterior (método original) se aplicó el criterio del 30%, por el cual una litología tiene el máximo valor de su SP únicamente en donde la pendiente exceda el 30% (Varnes, 1984). Además, a los depósitos de deslizamientos se denominan con la mayor SP (L). La Tabla 3.8 muestra la determinación de la susceptibilidad total.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|------|-------|-------|-------|-----|-----|
| | 0-5 | 5-15 | 15-30 | 30-50 | 50-70 | >70 | |
| Fm La Banda | I | I | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | I | I | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | I | II | II | III | III | I | III |
| Fm Quillollaco | I | II | V | VI | I | I | VI |
| Fm San Cayetano | III | I | V | III | I | I | VI |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.8: Matriz con valores de ST obtenidos.

La Tabla 3.7 muestra para la Fm San Cayetano que aunque su valor de SP es VI, los mayores valores de áreas deslizadas están en los menores rangos de

pendiente y por tanto aplicando el criterio del 30%, no existe ningún rango de pendientes para el cual corresponda un valor de $ST = VI$, como lo muestra la Tabla 3.8.

En base a la tabla anterior y usando ArcView, se elabora el Mapa de Susceptibilidad para la zona de estudio. Para la representación cartográfica final de la susceptibilidad total se consideran los 7 rangos de ST determinados en esta evaluación. La Figura 3.9 muestra el Mapa de Susceptibilidad para esta evaluación.

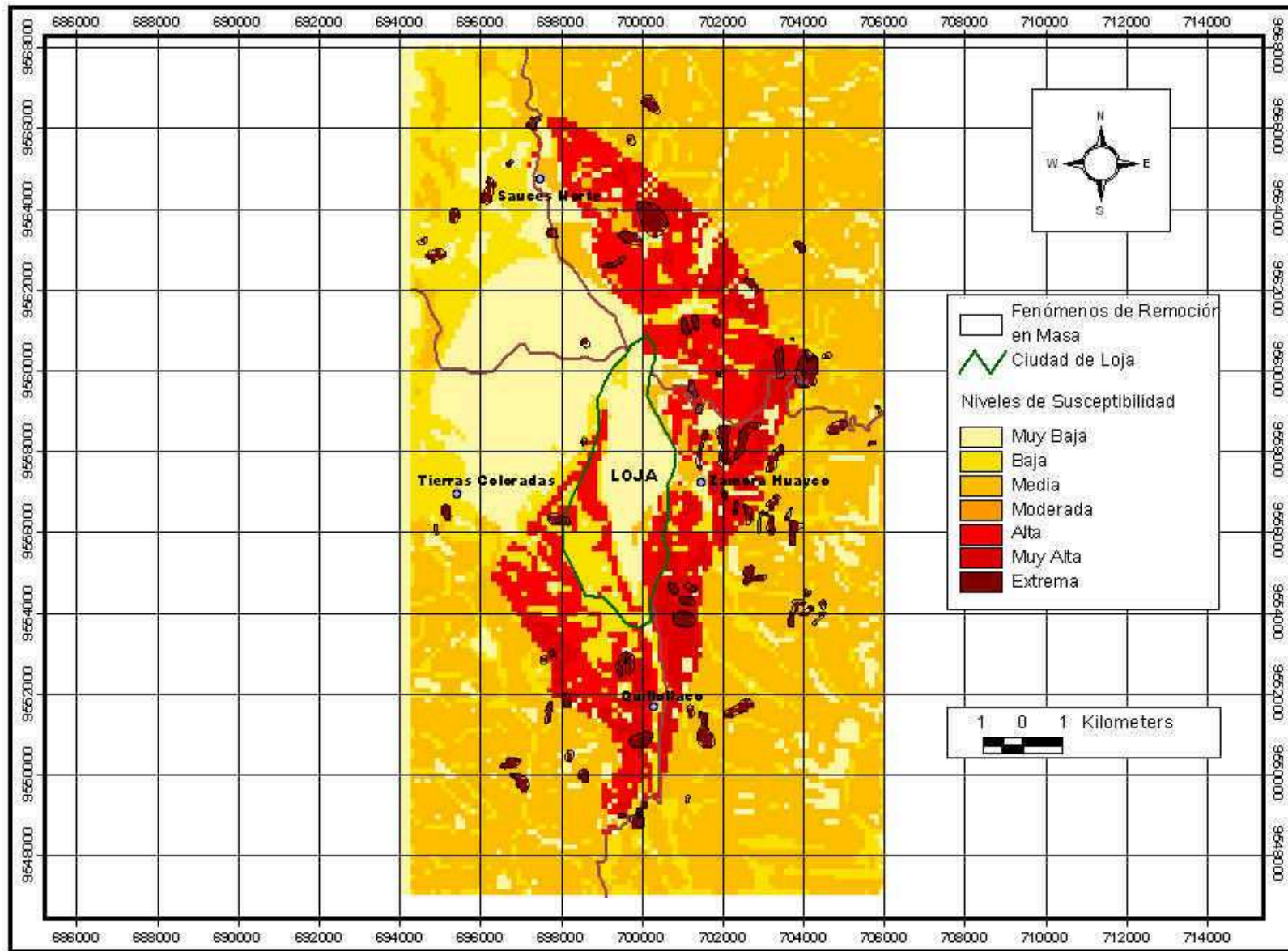


Figura 3.9:
Mapa de
Susceptibilidad para
la zona de estudio
(Variación 1)

3.1.4.3.- Variación Nro 2

Esta evaluación consiste en utilizar únicamente 4 rangos de SP (incluidos los depósitos de deslizamientos con L). Las otras consideraciones son idénticas a la valoración original de Brabb, es decir, 6 rangos de pendientes calculadas en porcentajes y el criterio del 30% establecido para la determinación de ST.

- **Determinación de la Susceptibilidad Relativa o Parcial (SP)**

De igual forma que en la evaluación del método original, se elabora la matriz de susceptibilidad parcial (SP) considerando el área aflorante de cada unidad litológica y el área deslizada en cada una de ellas, para obtener el porcentaje deslizado por unidad litológica. A la unidad denominada depósitos deslizados se le atribuye la máxima susceptibilidad parcial (L) y a las demás unidades se las clasifica en susceptibilidades menores, considerando sus rangos de porcentaje de área deslizada en relación al área aflorante de cada unidad. Los rangos de SP se determinan mediante un análisis estadístico considerando para este caso 3 clases entre 0 y 4.75%, de manera que el rango es igual a 1.58. En la Tabla 3.9 se muestran las susceptibilidades parciales según los rangos determinados y en la Tabla 3.10 se presenta la matriz de SP.

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| $4.75 - 0 = 4.75$ | RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD PARCIAL | |
| $4.75 / 3 = 1.58$ | RANGOS | SP |
| | 0-1.58 | I |
| | 1.58-3.16 | II |
| | 3.16-4.75 | III |
| | >4.75 | L |

Tabla 3.9: Rangos de SP considerando porcentajes.

| UNIDADES LITOLÓGICAS | AREA LITOLÓGICA (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS REGIONALES (CAMPO) (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS PUNTUALES (m ²) | AREA TOTAL DESLIZADA (m ²) | (3) % TOTAL DESLIZADO POR LITOLOGIA | SP |
|------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|-------------------------------------|-----|
| Fm La Banda | 1.558.341,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 301.969,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Depósitos Aluviales | 4.051.793,00 | 0,00 | 1.030,00 | 1.030,00 | 0,03 | I |
| Fm El Trigal | 6.168.529,00 | 5.254,28 | 10.000,00 | 15.254,28 | 0,25 | I |
| Fm El Belén | 11.307.602,00 | 38.251,43 | 2.700,00 | 40.951,43 | 0,36 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 1.493.652,00 | 7.844,48 | 0,00 | 7.844,48 | 0,53 | I |
| Unidad Chiguinda | 165.718.326,00 | 2.819.621,65 | 11.000,00 | 2.830.621,65 | 1,71 | II |
| Fm Quillollaco | 47.723.160,00 | 2.069.973,43 | 16.708,00 | 2.086.681,43 | 4,37 | III |
| Fm San Cayetano | 13.675.416,00 | 638.724,03 | 11.050,00 | 649.774,03 | 4,75 | III |
| Depósitos deslizados | 5.579.669,30 | 5.579.669,30 | 0,00 | 5.579.669,30 | 100,00 | L |
| TOTAL AREA | 251.998.788,00 | | | | | |

Tabla 3.10: Determinación de la Susceptibilidad Parcial (SP).

- **Determinación de la Susceptibilidad Absoluta o Total (ST)**

Se elabora otra matriz considerando las unidades litológicas y su susceptibilidad parcial, los rangos de pendientes determinados en el Mapa de pendientes (6 rangos calculados en porcentaje) y la frecuencia (número por unidad litológica) de FRM en cada rango de pendientes. La Tabla 3.11 muestra la matriz de frecuencias de FRM para cada unidad litológica tabulada para cada rango de pendiente.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | 0-5 | 5--15 | 15--30 | 30--50 | 50--70 | >70 | |
| Fm La Banda | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Aluviales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Trigal | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Belén | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | I |
| Unidad Chiguinda | 5 | 25 | 41 | 51 | 44 | 7 | II |
| Fm Quillollaco | 4 | 23 | 37 | 31 | 8 | 0 | III |
| Fm San Cayetano | 3 | 10 | 11 | 10 | 2 | 0 | III |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.11: Tabulación del número de FRM por unidades litológicas y pendientes.

La Figura 3.10 muestra la distribución de las frecuencias de FRM en las unidades litológicas y en los rangos de pendientes determinados. Como se observa en la figura, la Unidad Chiguinda presenta la mayor cantidad de FRM en todos los rangos de pendientes.

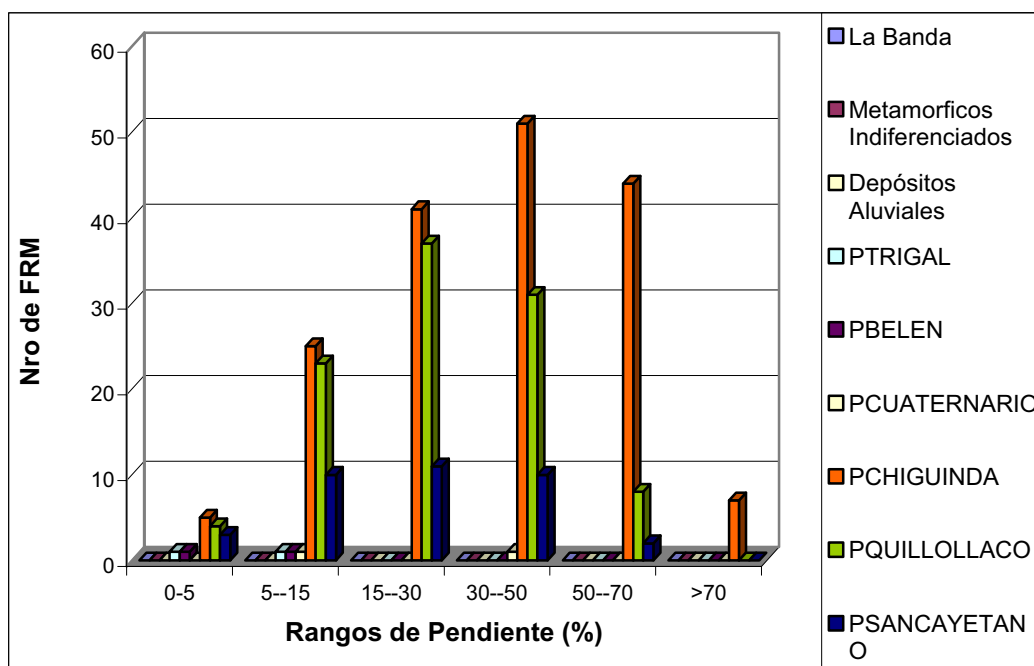


Figura 3.10: Distribución de las frecuencias de FRM (Variación 2).

A partir de la Tabla 3.11, se determina la susceptibilidad absoluta, para lo cual se aplicó el criterio del 30%, de igual forma que el la aplicación del método en su forma original. La Tabla 3.12 muestra la determinación de la susceptibilidad total.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|------|-------|-------|-------|-----|-----|
| | 0-5 | 5-15 | 15-30 | 30-50 | 50-70 | >70 | |
| Fm La Banda | I | I | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | I | I | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | I | I | I | II | II | I | II |
| Fm Quillollaco | I | II | II | III | I | I | III |
| Fm San Cayetano | I | II | II | III | I | I | III |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.12: Determinación de ST.

Para la representación cartográfica de la susceptibilidad en esta evaluación se han considerado 4 rangos o niveles de ST, elaborados en ArcView y cuyo mapa de presenta en la Figura 3.11.

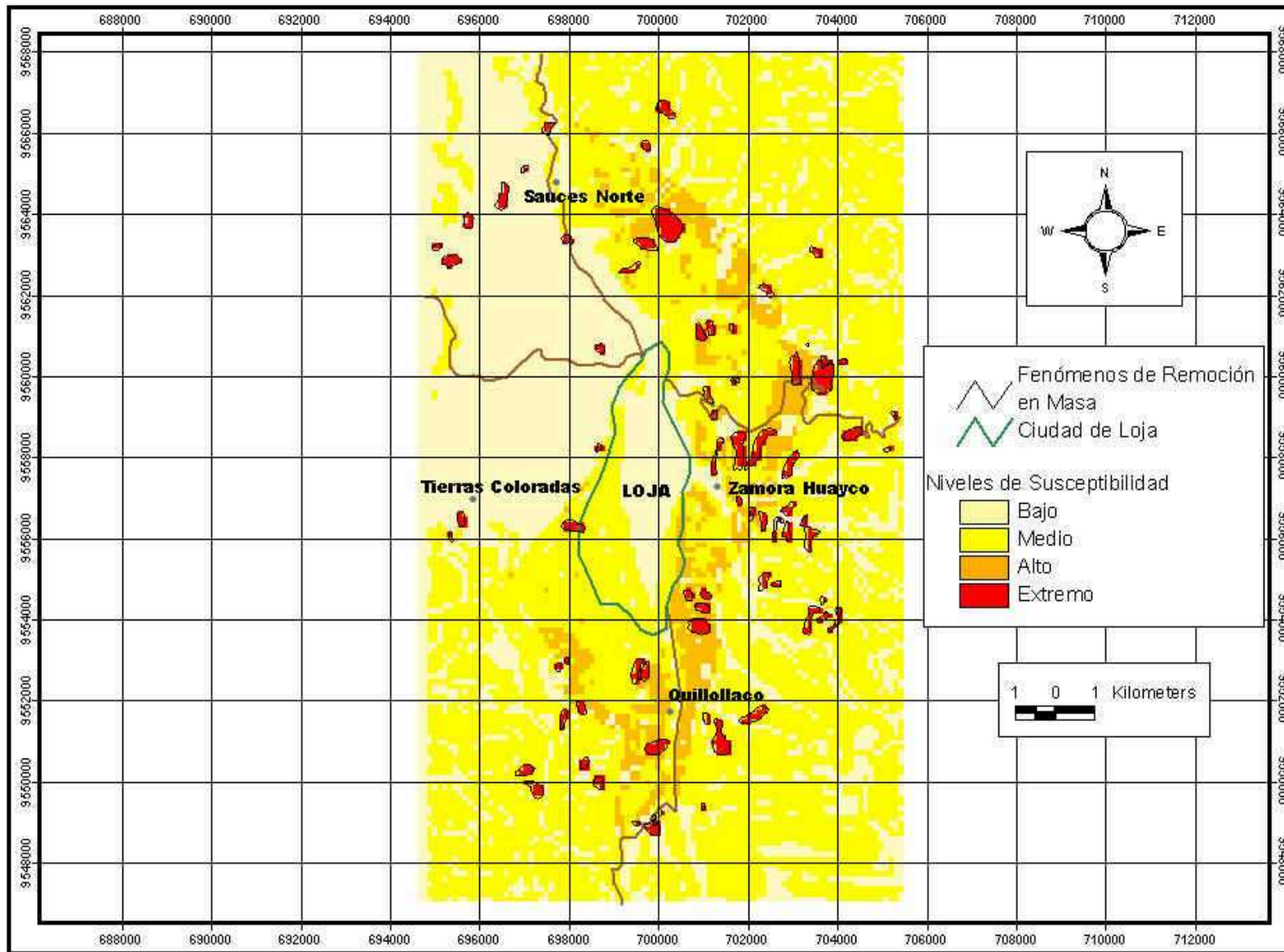


Figura 3.11:
Mapa de
Susceptibilidad para
la zona de estudio
(Variación 2)

3.1.4.4.- Variación Nro 3

Para esta evaluación se han establecido algunas consideraciones diferentes a la propuesta original de Brabb (Varnes, 1984). Por ejemplo, se ha utilizado un mapa de pendientes con 5 rangos calculados en grados y reclasificados en base al criterio estadístico del histograma plano (Figura 3.5b). Además, se han establecido 5 rangos de susceptibilidad parcial (SP), incluidos los depósitos de deslizamientos y no se ha adoptado el criterio del 30% (equivalente a 13.5°). El único aspecto que se mantiene respecto a la valoración original es asignar a los depósitos de deslizamientos el máximo valor de SP (L).

- **Determinación de la Susceptibilidad Relativa o Parcial (SP)**

La determinación de SP es igual que para las evaluaciones precedentes, considerando la relación entre el área aflorante de cada unidad litológica y el área deslizada en cada una de ellas, y obteniendo el porcentaje deslizado por unidad litológica. Los rangos de SP se determinan mediante un análisis estadístico considerando para este caso 4 clases entre 0 y 4.75%, de manera que el rango es igual a 1.1875. La Tabla 3.13 muestra las susceptibilidades parciales según los rangos determinados y en la Tabla 3.14 se presenta la matriz de SP.

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| 4.75-0 = 4.75 | RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD PARCIAL | |
| 4.75 / 4 = 1.1875 | RANGOS | SP |
| | 0-1.1875 | I |
| | 1.1875-2.375 | II |
| | 2.375-3.5625 | III |
| | 3.5625-4.75 | IV |
| | >4.75 | L |

Tabla 3.13: Rangos de SP considerando porcentajes.

| UNIDADES LITOLÓGICAS | AREA LITOLÓGICA (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS REGIONALES (CAMPO) (m ²) | AREA DESLIZAMIENTOS PUNTUALES (m ²) | AREA TOTAL DESLIZADA (m ²) | (3) % TOTAL DESLIZADO POR LITOLOGIA | SP |
|------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|-------------------------------------|----|
| Fm La Banda | 1.558.341,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 301.969,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | I |
| Depósitos Aluviales | 4.051.793,00 | 0,00 | 1.030,00 | 1.030,00 | 0,03 | I |
| Fm El Trigal | 6.168.529,00 | 5.254,28 | 10.000,00 | 15.254,28 | 0,25 | I |
| Fm El Belén | 11.307.602,00 | 38.251,43 | 2.700,00 | 40.951,43 | 0,36 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 1.493.652,00 | 7.844,48 | 0,00 | 7.844,48 | 0,53 | I |
| Unidad Chiguinda | 165.718.326,00 | 2.819.621,65 | 11.000,00 | 2.830.621,65 | 1,71 | II |
| Fm Quillollaco | 47.723.160,00 | 2.069.973,43 | 16.708,00 | 2.086.681,43 | 4,37 | IV |
| Fm San Cayetano | 13.675.416,00 | 638.724,03 | 11.050,00 | 649.774,03 | 4,75 | IV |
| Depósitos deslizados | 5.579.669,30 | 5.579.669,30 | 0,00 | 5.579.669,30 | 100,00 | L |
| TOTAL AREA | 251.998.788,00 | | | | | |

Tabla 3.14: Determinación de la Susceptibilidad Parcial (SP).

- **Determinación de la Susceptibilidad Absoluta o Total (ST)**

Se elabora otra matriz considerando las unidades litológicas y su susceptibilidad parcial, los rangos de pendientes determinados en el Mapa de la Figura 3.5b y la frecuencia (número por unidad litológica) de FRM en cada rango de pendientes. La Tabla 3.15 muestra la matriz de frecuencias de FRM para cada unidad litológica tabulada para cada rango de pendiente.

| UNIDADES | RANGOS DE PENDIENTE (grados) | | | | | SP |
|------------------------------|------------------------------|------------|-------------|------------|------------|----|
| | 0-6,41 | 6,41-11,71 | 11,71-17,92 | 17,92-23,8 | 23,8-44,15 | |
| Fm La Banda | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Metamórficos indiferenciados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Aluviales | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Fm El Trigal | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | I |
| Fm El Belén | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Depósitos Cuaternarios | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | I |
| Unidad Chiguinda | 22 | 31 | 52 | 50 | 32 | II |
| Fm Quillollaco | 18 | 31 | 39 | 24 | 2 | IV |
| Fm San Cayetano | 8 | 12 | 11 | 2 | 2 | IV |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.15: Número de FRM por unidad litológica y rangos de pendiente.

La Figura 3.12 muestra la distribución de las frecuencias de FRM en las unidades litológicas y en los rangos de pendientes determinados.

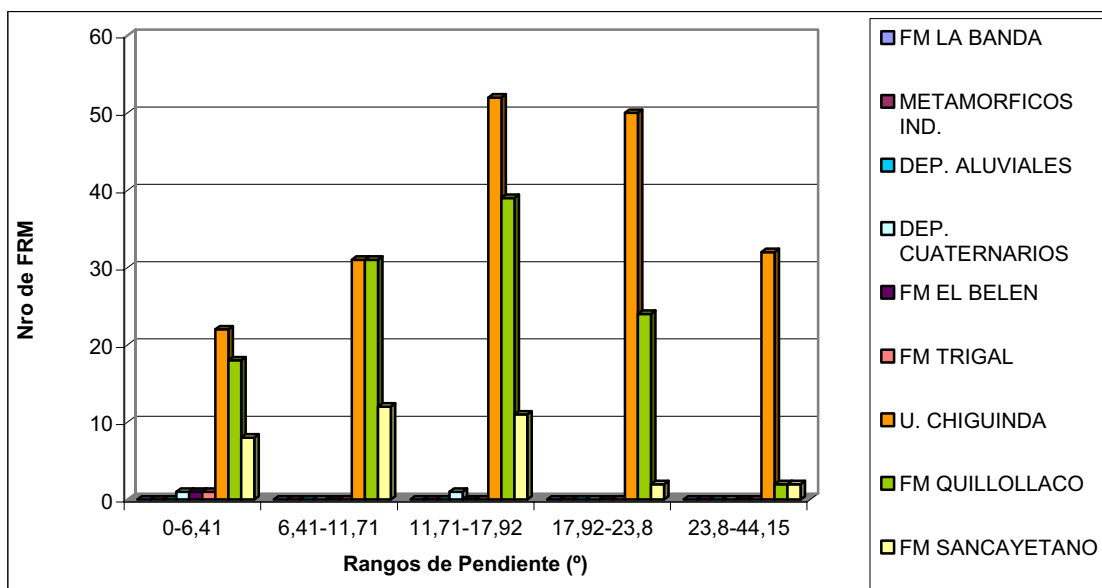


Figura 3.12: Distribución de las frecuencias de FRM (Variación 3).

A partir de la Tabla 3.15, se determina la susceptibilidad absoluta. Debido a que no se tomo en cuenta el criterio del 30% de la pendiente para la determinación de ST, como lo establece el método original, se consideraron la mayor y menor frecuencias de FRM para cada unidad litológica. Por ejemplo, para la Fm Quillollaco, con SP=IV, se tiene una frecuencia máxima de 39 y una mínima de 2. Con estos valores se construye la tabla de ST, así:

$$39 - 2 = 37$$

$$37/4 \text{ (máximo valor de SP)} = 9.25$$

| Rangos de ST para litologías con SP=III | ST |
|---|-----|
| 2 – 11.25 | I |
| 11.25 – 20.5 | II |
| 20.5 – 29.75 | III |
| 29.75 - 39 | IV |

De igual forma se determina la ST para cada una de las litologías en base a su valoración de SP. La Tabla 3.16 muestra la determinación de la susceptibilidad total.

| UNIDADES | RANGOS DE PENDIENTE (grados) | | | | | SP |
|------------------------------|------------------------------|------------|-------------|------------|------------|----|
| | 0-6,41 | 6,41-11,71 | 11,71-17,92 | 17,92-23,8 | 23,8-44,15 | |
| Fm La Banda | I | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | I | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | I | II | II | II | II | II |
| Fm Quillolaco | II | IV | IV | III | I | IV |
| Fm San Cayetano | III | IV | IV | I | I | IV |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L |

Tabla 3.16: Determinación de ST.

En base a la tabla anterior y usando ArcView, se elabora el Mapa de Susceptibilidad para la zona de estudio. Para la representación cartográfica final de la susceptibilidad total (I a V) se consideran dos opciones para determinar cualitativamente los rangos, como lo indica la siguiente tabla:

| Valor de ST | Susceptibilidad (5 niveles) | Susceptibilidad (3 niveles) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| I | Muy Baja | Baja |
| II | Baja | Moderada |
| II | Moderada | Moderada |
| IV | Alta | Alta |
| V | Muy Alta | Alta |

Los mapas de susceptibilidad (con 5 y 3 niveles) se muestran en la Figura 3.13 y 3.14, respectivamente.

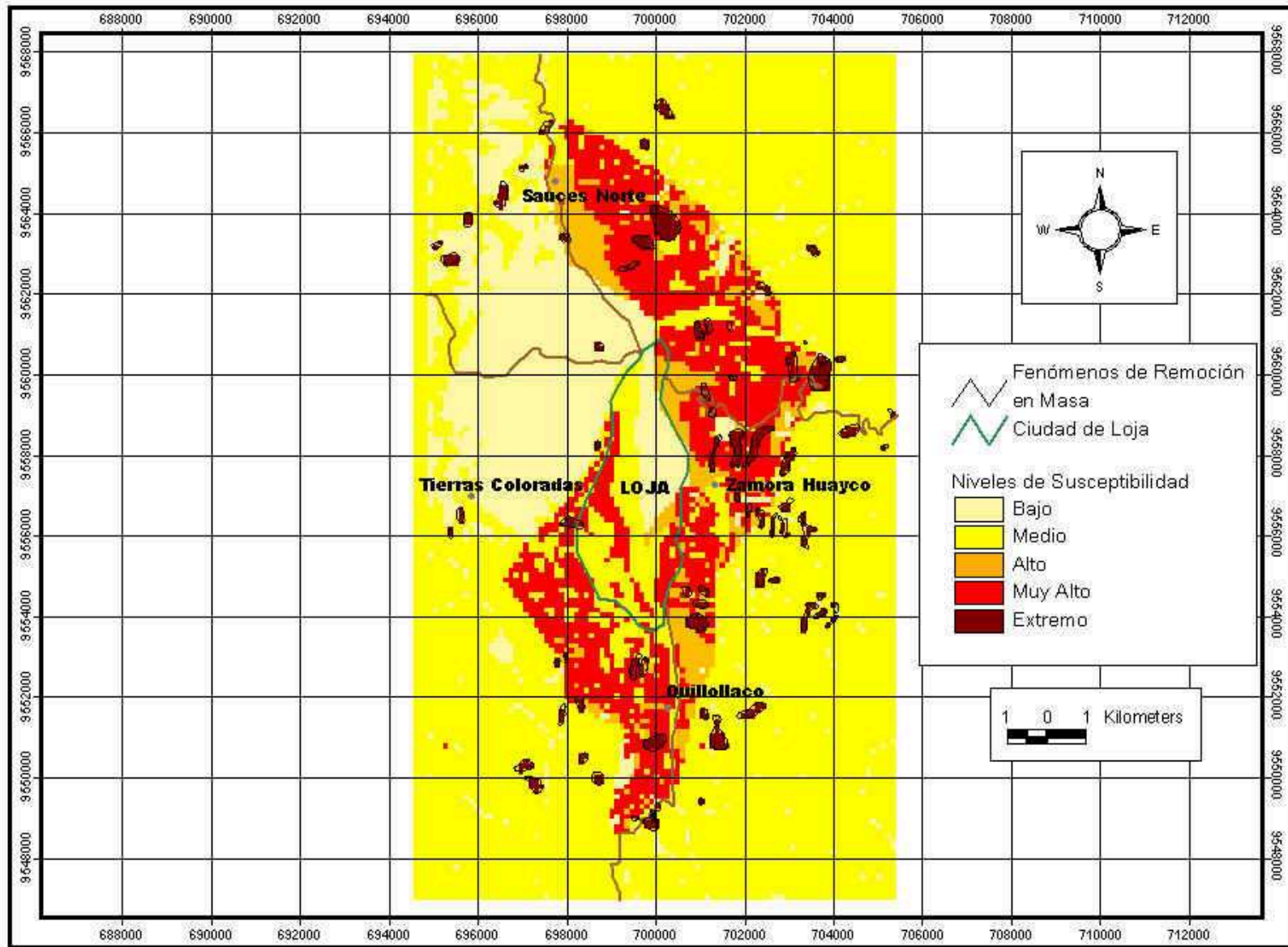


Figura 3.13:
Mapa de
Susceptibilidad para
la zona de estudio
(Variación 3 con 5
niveles)

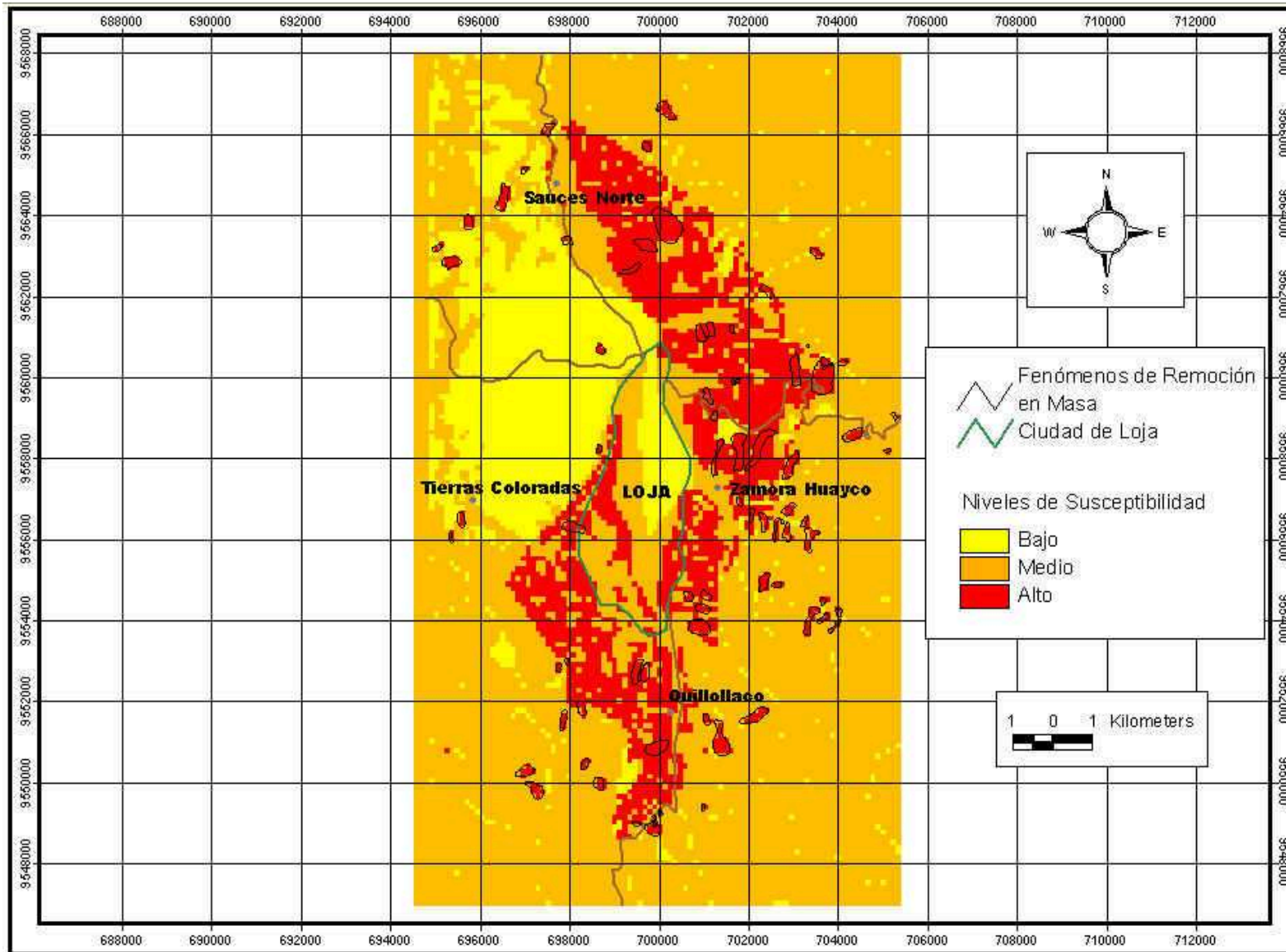


Figura 3.14:
Mapa de
Susceptibilidad para
la zona de estudio
(Variación 3 con 3
niveles)

La leyenda correspondiente al mapa de susceptibilidad de la Figura 3.14 se presenta a continuación:



Susceptibilidad Baja: zonas con pendientes entre 0 y 12°, que presentan rocas metamórficas tipo esquistos y gneises, sedimentarias como calizas, lutitas y areniscas de grano grueso; y, aluviales poco consolidados con matriz areno-arcillosa. Existen discontinuidades como estratificación y fracturas que no favorecen deslizamientos. Solo existen deslizamientos puntuales (<10000m²) estabilizados y en la zona urbana.



Susceptibilidad Media: corresponde a una zona con pendiente variable, pero mayormente entre 18 y 45°, formada por rocas metamórficas como filitas, cuarcitas y esquistos. Presenta el nivel freático somero y alto grado de meteorización. Presenta además discontinuidades como fracturamiento y esquistosidad, tiene un 60% de los FRM del área de estudio y corresponden mayormente a deslizamientos traslacionales y algunos rotacionales activos e inactivos



Susceptibilidad Alta: . zonas con pendientes muy variables, pero especialmente entre 7 y 18°, formadas principalmente por conglomerados intercalados con areniscas, filitas, cuarcitas y lutitas meteorizadas. La zona presenta discontinuidades importantes como diaclasas, estratificación y foliación, que han favorecido la ocurrencia de movimientos en masa y contiene aproximadamente un 40% de FRM, principalmente deslizamientos rotacionales y flujos de detritos inactivos. Representa la zona con mayor probabilidad de presentar deslizamientos.

Adicionalmente, para realizar una comparación y evaluación, se ensaya el Método de Brabb considerando la fórmula $S=Ar*fr$, (Susceptibilidad = Área relativa * frecuencia relativa), donde se considera tanto el área deslizada por unidad litológica (área relativa) como la frecuencia de FRM por unidad litológica (frecuencia relativa). Esta fórmula fue concebida por Palacios (2006) mediante comunicación personal, como una propuesta preliminar del método y se muestra en el Anexo 3. El Mapa de Susceptibilidad producto de esta propuesta se asemeja más al mapa desarrollado por con la evaluación originalmente propuesta por Brabb (Figura 3.7), excepto en las zonas de mayor susceptibilidad. Además los límites entre niveles de susceptibilidad en esta propuesta son más definidos, aunque, esto no es importante en una macrozonificación.

3.2.- EL MÉTODO DE MORA-VAHRSON

Para la evaluación y zonificación de la Amenaza por FRM mediante esta metodología, en forma cartográfica; se considera una malla con tamaño de celdas de 125x125m, para la representación del área de estudio. Para cada celda se determina el valor ponderado de cada uno de los factores que intervienen en la evaluación de la amenaza y que son: el relieve relativo, la humedad del suelo, la litología, la intensidad de lluvias y la sismicidad. El procedimiento para obtener el mapa de amenaza se muestra en la Figura 3.15 y detalla a continuación:

Para cuantificar el factor relieve relativo (S_r), se elabora un mapa raster a partir de la topografía digital y luego se realiza una estadística de puntos vecinos (entre 4 celdas o píxeles) con ayuda de Spatial Analyst de ArcView, determinando las alturas relativas máximas y mínimas en cada grupo de celdas. Para cada grupo de celdas se determina el índice de relieve relativo (R_r), mediante la relación $R_r = (H_{máx} - H_{mín}) / \text{Área (m/Km)}$. Luego, se establecen rangos y se asignan valores a cada uno de ellos para su representación cartográfica.

Para la cuantificación del factor humedad del suelo (S_h) se identifican las estaciones meteorológicas que tienen datos de temperaturas medias mensuales y se calcula el valor promedio de evapotranspiración de cada estación. Con estos valores se establecen rangos del factor humedad del suelo, los cuales se representan cartográficamente por medio de polígonos de Thiessen, con ayuda del GIS ArcView.

Respecto a la valoración cualitativa del factor litológico (S_l), se parte de la descripción de las unidades litológicas y sus características geotécnicas, para establecer los puntajes ponderados de susceptibilidad; y, a partir de ellos elaborar el mapa de factor litológico.

Para cuantificar el factor intensidad de lluvias (T_p), se determinan las estaciones meteorológicas con datos de precipitaciones máximas en 24 horas cercanas al área de estudio. Luego, por medio de una distribución Gumbel, se calcula el valor umbral o mínimo valor de precipitación esperado para un período de retorno de 100 años. En base a éste valor y a los promedios de precipitaciones máximas de cada estación se construyen rangos y se asignan pesos ponderados para cada una de ellas. Para la representación cartográfica de este factor, se utilizan polígonos de Thiessen con ayuda del GIS ArcView.

Finalmente, para la valoración del factor intensidad sísmica (T_s), se identifican los datos de intensidades sísmicas de la zona de estudio, con los cuales se construye un mapa de isosistas máximas con ayuda del programa cartográfico Surfer. En base a la tabla de Intensidades Mercalli Modificada se establecen rangos y

valores ponderados que se representan cartográficamente con ayuda de ArcView para obtener el mapa de factor intensidad sísmica.

Con ayuda de funciones de álgebra de mapas de Spatial Analyst, se construye el mapa de Amenaza (Ht) por FRM, mediante la relación: $Ht = \text{Susceptibilidad} (Sr * Sh * SI) * \text{Elementos de disparo} (Tp + Ts)$. Finalmente se establecen cinco rangos de amenaza para representarlos cartográficamente con ayuda del mapa raster de la zona.

3.2.1.- EL FACTOR RELIEVE RELATIVO (Sr)

Para la valoración de este factor se utiliza la topografía digital de la zona de estudio, a partir de la cual se calcula el índice de relieve relativo (Rr) para cada celda o píxel.

La representación cartográfica (Mapa) del Índice de relieve Relativo (Rr) presenta, por defecto, 9 rangos; sin embargo, para ajustarse a la metodología originalmente propuesta por Mora y Vahrson (1993), se reclasifican en 6 rangos, cuyo histograma de frecuencias se muestra en la Figura 3.16.

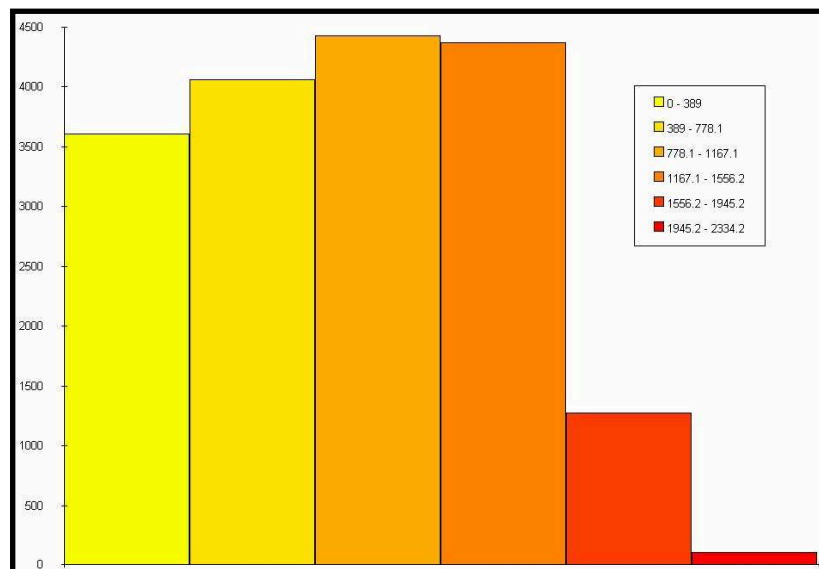


Figura 3.16: Histograma del Índice de Relieve relativo (por defecto).

Como se observa en la Figura 3.16, los rangos derivados por defecto presentan frecuencias diferentes. Estos rangos se reclasifican adoptando el criterio del

histograma plano, es decir, que todos los rangos del índice de Rr tengan similar o igual frecuencia; sin importar la amplitud de los rangos. La Tabla 3.17 presenta los rangos y sus frecuencias relativas iguales y la Figura 3.17 muestra el histograma de frecuencias para estos rangos.

| Rangos de Rr | Frecuencia | Frecuencia relativa (%) |
|-------------------------|------------|-------------------------|
| 0-361.95 | 2975 | 16,66199944 |
| 361.95-598.81 | 2975 | 16,66199944 |
| 598.81-906.02 | 2975 | 16,66199944 |
| 906.02-1150.27 | 2975 | 16,66199944 |
| 1150.27-1389.24 | 2975 | 16,66199944 |
| 1389.24-2324.23 | 2980 | 16,6900028 |
| # datos (celdas) | 17855 | 99,96 % |

Tabla 3.17: Rangos del Índice de Relieve Relativo Rr.

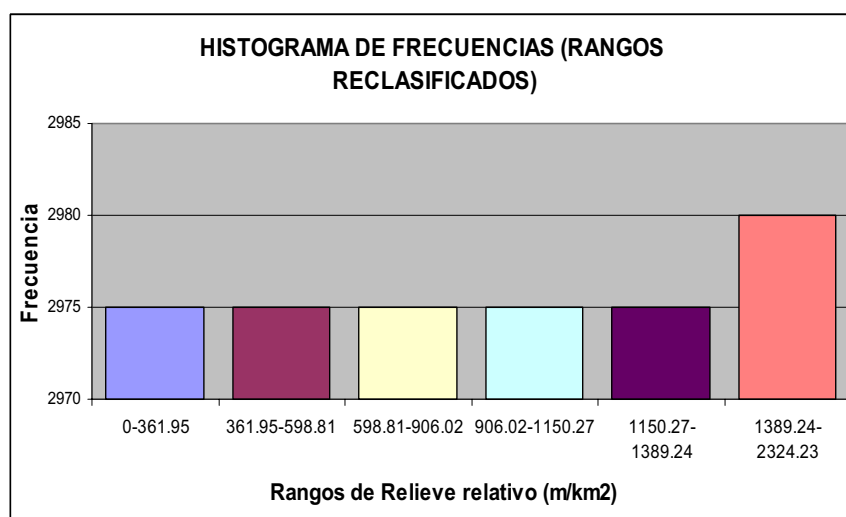


Figura 3.17: Histograma de Frecuencia para los rangos del índice de Rr.

Finalmente, para la valoración del factor de relieve relativo (Sr), se toman en cuenta los 6 rangos de susceptibilidad obtenidos y sus pesos, propuestos por Mora y Vahrson (1993), como se muestra en la Tabla 3.18.

| Índice de Relieve Relativo (Rr) (m/km ²) | Susceptibilidad | Factor de Relieve Relativo (Sr) |
|--|------------------|---------------------------------|
| 0-361.95 | Muy Baja | 0 |
| 361.95-598.81 | Baja | 1 |
| 598.81-906.02 | Media o Moderada | 2 |

| | | |
|-----------------|----------|---|
| 906.02-1150.27 | Alta | 3 |
| 1150.27-1389.24 | Muy Alta | 4 |
| 1389.24-2324.23 | Extrema | 5 |

Tabla 3.18: Valoración del factor Relieve Relativo (Sr).

La representación cartográfica (Mapa) del Índice de Relieve Relativo para el área de estudio se presenta en la Figura 3.18.

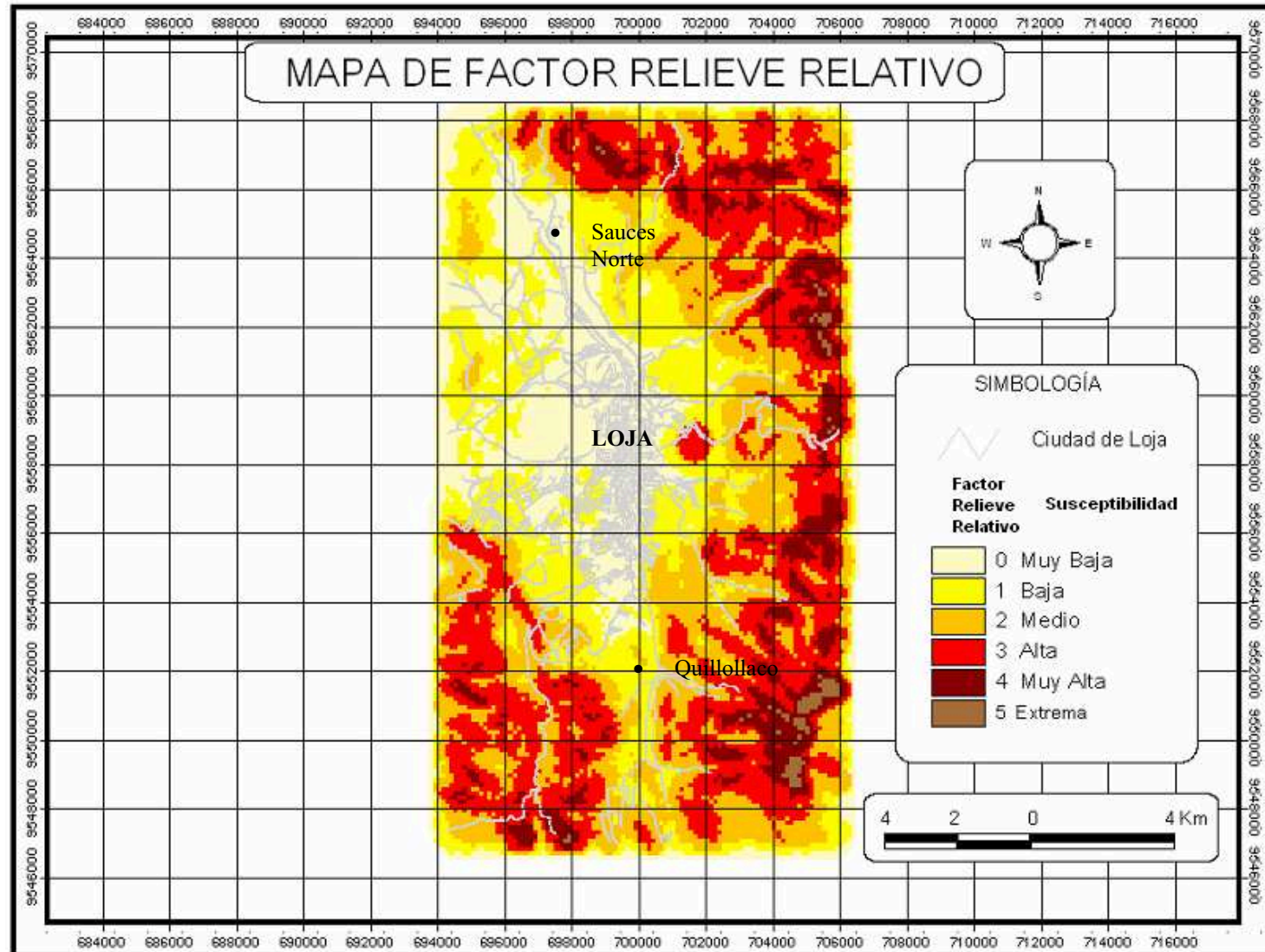


Figura 3.18: Mapa del Factor Relieve Relativo (Sr).

3.2.2. - EL FACTOR HUMEDAD DEL SUELO (Sh)

Este factor representa la humedad del suelo considerando que ésta puede ser expresada como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Para evaluar este parámetro se utilizan los datos de temperaturas medias mensuales y precipitaciones medias mensuales de las estaciones Argelia, Malacatos, Zamora, La Toma y Vilcabamba. El procedimiento se detalla a continuación:

- Con los datos de las temperaturas medias mensuales (Anexo 4) se determina el valor de la evapotranspiración promedio para cada estación, mediante el método de Thornwaite (ver metodología y ejemplo en el Anexo 5), que calcula la evapotranspiración potencial como una función de las temperaturas medias mensuales (Aparicio, F. J., 1994). Se escogió este método porque considera un único parámetro (temperatura) del cual se tienen registros en 5 estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio.
- Luego, se obtiene el valor promedio de evapotranspiración para la zona (7.02 cm) a través del promedio aritmético de las cinco estaciones referidas. La Tabla 3.19 sintetiza los resultados obtenidos.

| EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO MENSUAL PARA CADA ESTACION (cm) | | | | | | | | | | | | | Evapotransp. Promedio (cm) |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------------------|
| ESTACION | E | F | M | A | M | JN | JL | A | S | O | N | D | |
| Argelia | 5,56 | 5,46 | 6,11 | 6,01 | 6,06 | 5,57 | 5,46 | 5,56 | 5,85 | 6,20 | 6,03 | 5,70 | 5,80 |
| Malacatos | 7,05 | 6,14 | 6,71 | 6,66 | 5,06 | 4,84 | 6,35 | 6,23 | 4,97 | 5,52 | 4,85 | 5,09 | 5,79 |
| Zamora | 9,07 | 6,96 | 8,35 | 7,98 | 7,39 | 7,03 | 7,49 | 7,73 | 6,72 | 8,16 | 8,52 | 8,08 | 7,79 |
| La Toma-Catamayo | 8,32 | 8,53 | 8,64 | 9,04 | 9,01 | 9,46 | 9,82 | 9,29 | 8,70 | 9,09 | 8,89 | 7,94 | 8,90 |
| Vilcabamba | 7,91 | 6,38 | 7,97 | 6,80 | 6,90 | 6,74 | 6,05 | 6,32 | 6,36 | 7,36 | 6,89 | 6,34 | 6,83 |
| Para el Área de estudio | 7,58 | 6,69 | 7,56 | 7,30 | 6,88 | 6,73 | 7,03 | 7,03 | 6,52 | 7,27 | 7,04 | 6,63 | 7,02 |

Tabla 3.19: Evapotranspiración potencial calculada para la zona de estudio.

- Una vez obtenido el valor promedio (70,2mm), se procede a evaluar las condiciones hidrometeorológicas de la zona, considerando las precipitaciones mensuales registradas en las estaciones, cuyos datos se encuentran detallados en el Anexo 6. Para realizar este tipo de análisis con series de datos meteorológicos, fue necesario primero realizar la completación de las series; ya que, existen estaciones pluviométricas con

datos faltantes en sus registros. La metodología para realizar estos cálculos se detalla en el Anexo 7.

- Con las series completadas se determina el valor de la precipitación media mensual promedio, para cada estación. Con estos valores promedio; y, con el promedio de evapotranspiración antes calculado, se construyen rangos con pesos ponderados para cada estación (Anexo 8). En base a estos pesos ponderados se determinan valores asignados (VA) para cada mes de la serie dependiendo del valor promedio mensual que tienen.

Hay que señalar que el criterio para la construcción de estos rangos es tomar en cuenta el valor del promedio de precipitación de la estación, siempre y cuando éste sea mayor al valor de evapotranspiración (70.2mm). Con esto se mantiene el concepto de que la humedad del suelo se expresa como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

- Luego, se suman los valores asignados (VA) para cada estación. Estos cálculos se presentan en el Anexo 8 para todas las estaciones involucradas. En base a los valores máximo y mínimo de las sumatorias de VA de las estaciones, se construye una tabla de valoración con su respectivo peso para el factor humedad del suelo (Tabla 3.20), como lo indica la metodología original.

| METODOLOGIA CONVENCIONAL | | | |
|--------------------------|-----------|----------------------|--------------------------|
| VALORES DE SUMA | | Rangos de valoración | Factor Humedad del Suelo |
| Argelia | 10 | <3.4 | 1 |
| Malacatos | 14 | 3.4-6.8 | 2 |
| Zamora | 18 | 6.8-10.2 | 3 |
| La Toma-Catamayo | 1 | 10.2-15.6 | 4 |
| Vilcabamba | 14 | >15.6 | 5 |

Tabla 3.20: Valores de sumatorias, rangos y factor humedad del suelo.

Máximo valor = 18

Mínimo valor = 1

Entonces: $18 - 1 / 5 = \underline{\underline{3.4}}$

- Finalmente en base a los valores de “Suma” de las estaciones, se asigna a cada una la valoración del factor humedad del suelo (de 1 a 5) como lo indica la Tabla 3.21.

| Valoración del Factor Humedad del Suelo | |
|---|---|
| Estación | Valor del Factor Humedad del Suelo (Sh) |
| Argelia | 3 |
| Malacatos | 4 |
| Zamora | 5 |
| La Toma-Catamayo | 1 |
| Vilcabamba | 4 |

Tabla 3.21: Valoración del Factor Humedad del Suelo (Sh) para las estaciones involucradas.

Para representar los resultados cartográficamente, es necesario determinar el área de acción de cada estación. Para esto, en base al mapa raster (GRID), y, conociendo la ubicación (UTM) de las estaciones pluviométricas, se generan polígonos de Thiessen con las valoraciones del factor humedad del suelo correspondiente a cada estación, con ayuda de ArcView. La Figura 3.19 muestra los polígonos o áreas de acción de las estaciones y su respectiva valoración del factor humedad del suelo; mientras que, la Figura 3.20, representa el mapa de factor humedad del suelo (Sh) para la zona de estudio.

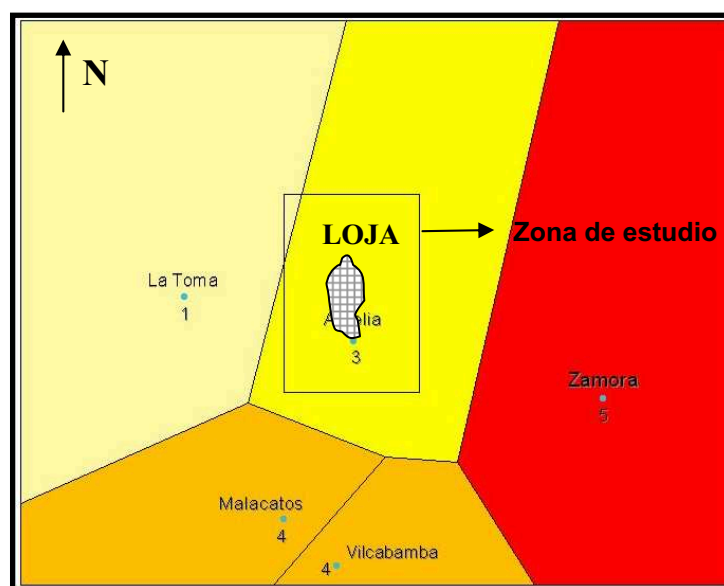


Figura 3.19: Polígonos de Thiessen generados para las estaciones involucradas en el análisis.

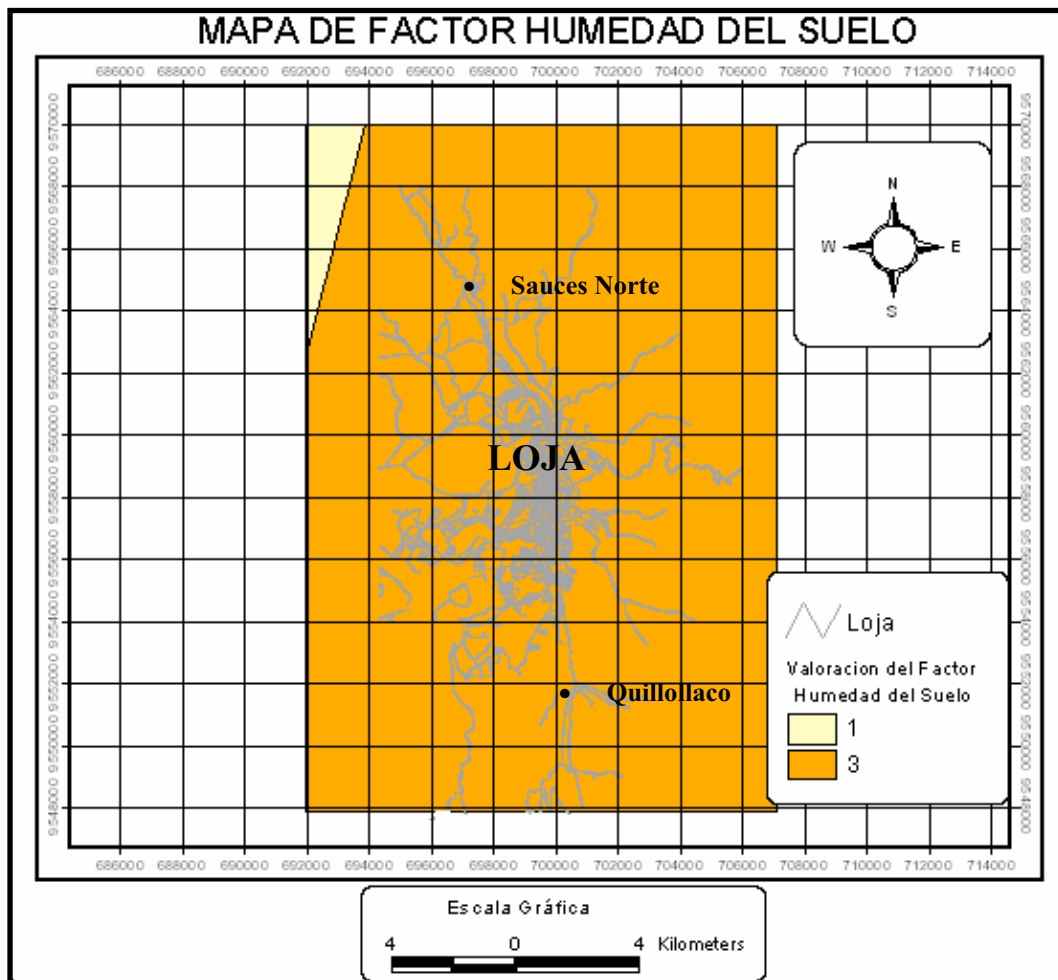


Figura 3.20: Mapa de Factor Humedad del Suelo (Sh).

Como se observa en la figura anterior, prácticamente toda la zona estudiada tiene un mismo valor de factor humedad del suelo ($Sh=3$). Esto se debe principalmente, a que las estaciones San Lucas, El Tambo y San Francisco, que son también cercanas al área de estudio, no presentaron datos de temperaturas medias mensuales; y por tanto, no fueron tomadas en cuenta en el análisis.

Adicionalmente, se ensayó una segunda opción para construir los rangos y pesos ponderados para cada una de las estaciones en el análisis del factor humedad del suelo, la misma que se detalla en el Anexo 9.

Comparando las tablas de valoración obtenidas por medio de la metodología convencional y el ensayo realizado, se observan los mismos resultados de valoración del Factor Humedad del Suelo en la zona de estudio. Sin embargo,

para el primer caso, al tomar en cuenta la evapotranspiración promedio de toda la zona, los polígonos resultado de ello reflejan la respuesta regional a la distribución de las precipitaciones y de la humedad del suelo, es decir, se considera al área de estudio como un todo que interactúa (Dr. Remigio Galárraga, com. per.); lo cual, es real y correcto tomando en cuenta que el presente trabajo corresponde a un análisis regional.

Por otro lado, para el segundo caso, al tomar en cuenta los promedios de la evapotranspiración de cada estación, el resultado cartográfico de ello refleja que las áreas de acción de cada estación son tratadas aisladamente; es decir, que no interactúan entre sí (Galárraga Remigio, com. per.), lo cual es erróneo para los objetivos regionales del presente trabajo. Por tanto, se tomó como mapa final de factor Humedad del Suelo (Sh), el desarrollado en base a la metodología convencional; aunque, los resultados finales no difirieron con la segunda opción adoptada.

3.2.3.- EL FACTOR LITOLÓGICO (SI)

Para evaluar este factor se utilizan las descripciones de las unidades litológicas representadas en el mapa geológico (ver Figura 2.3) y las características geotécnicas de algunas de estas unidades, determinadas en algunos puntos dentro de la zona de estudio (Valarezo, 2002) a través de ensayos triaxiales y de compresión simple (Anexo 10).

A partir de las descripciones litológicas y las características de meteorización y resistencia a la compresión simple (Tabla 3.22) se valora el factor litológico (SI) para cada unidad o formación litológica como lo muestra la Tabla 3.23.

| Descripción Litológica | Descripción Geotécnica |
|--|--|
| <u>Unidad Chiguinda:</u> filitas negras, cuarcitas, esquistos grafitosos muy perturbados tectónicamente, presentando varias familias de diaclasas, fracturas y pliegues de varios tamaños. Presenta foliación que varía en buzamiento. | Roca blanda (R2) (37Kg/cm2 de resistencia a la compresión simple). |
| <u>Fm El Trigal:</u> areniscas de grano grueso, láminas de conglomerados finos y capas menores de limonitas. Contiene clastos principalmente volcánicos y su naturaleza | ----- |

| | |
|---|--|
| arcillosa contribuye a su inestabilidad cuando está saturada de agua. | |
| <u>Fm La Banda</u> : calizas blancas, lutitas margosas, cherts, brechas de calizas intraformacionales y areniscas de grano fino de color amarillento. Hay yeso secundario en las fisuras. | ----- |
| <u>Fm El Belén</u> : gruesos canales de areniscas y depósitos conglomeráticos, los cuales alternan con areniscas más finas y de estratificación cruzada; y, en menor cantidad capas de lutitas. En la parte inferior se observan slumps de escala métrica. | Roca moderadamente meteorizada (W3), y muy blanda (R1), (resistencia a la compresión simple = 10-30Kg/cm ²). |
| <u>Fm San Cayetano</u> : tiene tres miembros: <i>Arenisca Inferior</i> : consiste principalmente en areniscas y conglomerados canalizados; <i>Limonita</i> : lutitas cafés, grises y blancas parcialmente silisificadas, abundantes capas de diatomitas y algunos horizontes piroclásticos; y, <i>Arenisca Superior</i> : similar carácter litológico que la Inferior pero con tamaño de grano más fino y tendencia grano-creciente. | Roca moderadamente meteorizada (W3), y muy blanda (R1), (resistencia a la compresión simple = 10-30Kg/cm ²). |
| <u>Fm Quillollaco</u> : conglomerados clasto-soportados con aporte metamórfico y areniscas en forma de lentes. Son erosionables, presentando múltiples surcos producidos por el agua. | Roca fresca (W1), de blanda a muy blanda (R1-R2) (resistencia a la compresión simple entre 7-10 kg/cm ²). |
| <u>Aluviales</u> : antiguo aluvial del río Zamora. Tiene una matriz areno-arcillosa con clastos sedimentarios. Es muy blando y presenta un a meteorización moderada. | Roca ligeramente meteorizada (W2) y muy blanda (R1) (resistencia a la compresión simple = 7.53 kg/cm ²). |
| <u>Metamórficos indiferenciados</u> : corresponden a cuarcitas y ocasionalmente esquistos. | ----- |
| <u>Depósitos cuaternarios Indiferenciados</u> : corresponde a coluviales antiguos poco cementados con una matriz arcillo-arenosa y clastos de tamaños muy variados. | ----- |

Tabla 3.22: Descripción litológica y geotécnica de las Unidades.

| Formación / Unidad | Susceptibilidad | Factor Litológico (SI) |
|--|------------------------|-------------------------------|
| Unidad Chiguinda | Media | 3 |
| Formación El Trigal | Moderada | 2 |
| Formación La Banda | Moderada | 2 |
| Formación El Belén | Media | 3 |
| Formación San Cayetano | Alta | 4 |
| Formación Quillollaco | Media | 3 |
| Aluviales | Muy Alta | 5 |
| Metamórficos Indiferenciados | Media | 3 |
| Depósitos Cuaternarios Indiferenciados | Muy Alta | 5 |

Tabla 3.23: Valoración del Factor Litológico (SI).

En la Figura 3.21 se presenta el mapa de factor litológico (SI) para la zona de estudio.

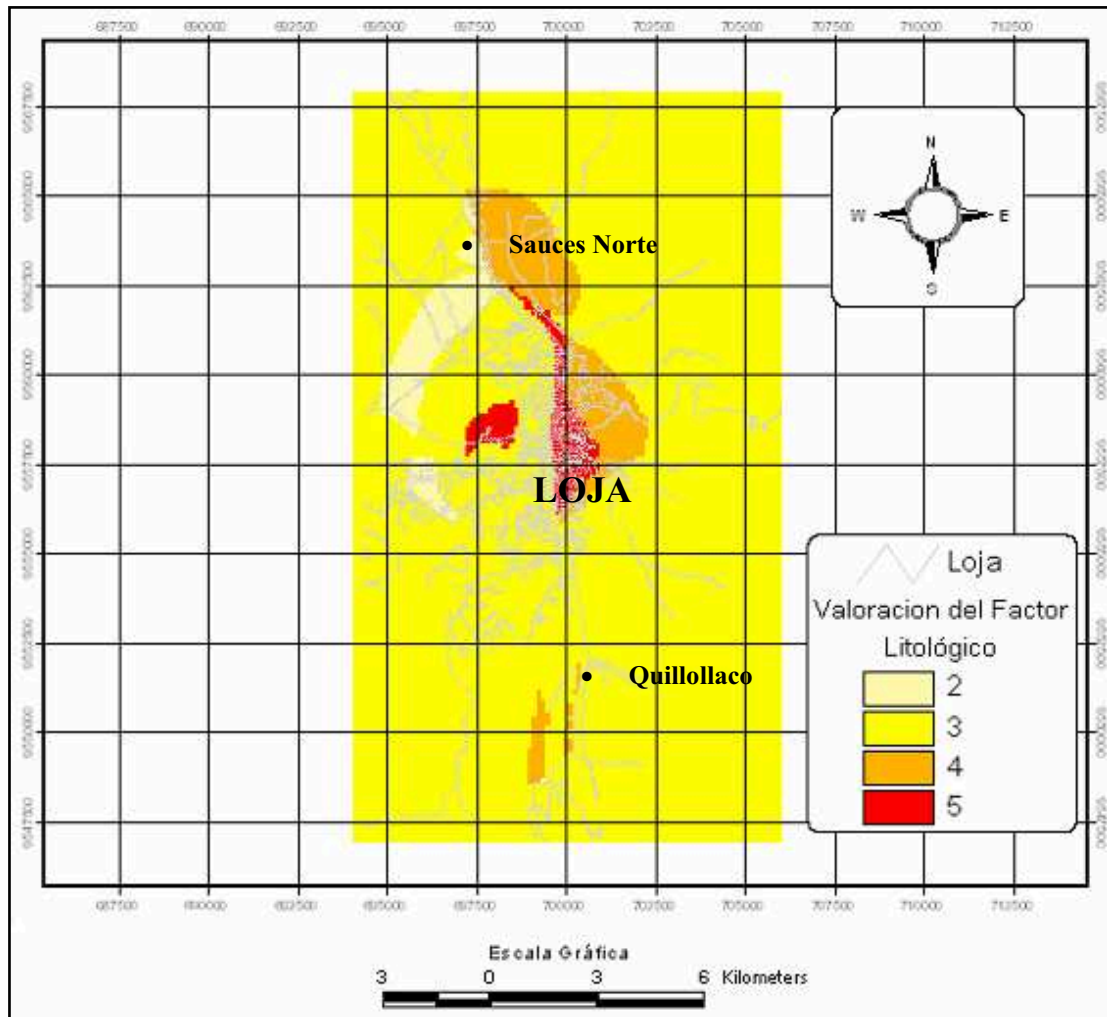


Figura 3.21: Mapa del Factor Litológico (SI).

3.2.4.- EL FACTOR INTENSIDAD SÍSMICA (Ts)

Para la evaluación y representación de este factor se determinan los valores de Intensidad Sísmica en la escala de Mercalli Modificada (MM), identificados en toda la provincia de Loja (Anexo 11). Con estos datos se procede a realizar los siguientes pasos:

- Se toman las intensidades máximas y mínimas de cada uno de sitios con registro en la provincia de Loja. Para la ciudad de Loja, las intensidades sísmicas máxima y mínima son 8k y 1k, respectivamente.
- Luego, se construye un mapa de isosistas con las intensidades máximas de la zona (Figura 3.22). Se consideraron las intensidades máximas para representar el peor escenario que podría presentarse en base al registro de datos considerados.

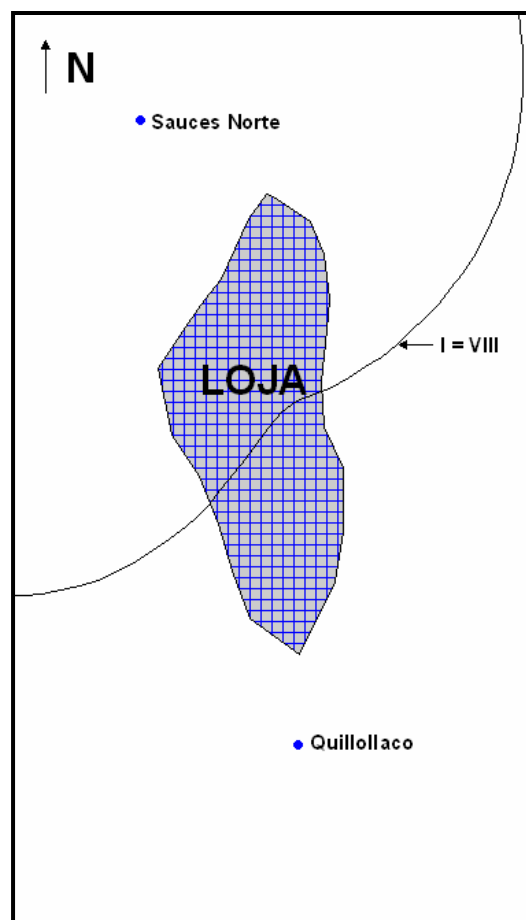


Figura 3.22: Mapas de Isosistas máximas para la zona de estudio.

- Con este mapa, se procede a la valoración del factor sísmico. No se toma en cuenta el concepto de distribución Gumbel como lo sugieren los autores originalmente, debido a que la intensidad no es una variable continua y por tanto no se puede utilizar ninguna distribución de probabilidad conocida. En este caso se adoptó el valor de la mínima intensidad sísmica relacionada

con deslizamientos en Ecuador, que es III (Adolfo Idrovo, com. per.); y, XII, como el máximo valor de intensidad de la escala Mercalli Modificada para construir la tabla de valoración del factor sísmico (Tabla 3.24).

| Intensidad (MM) Tr = 100 años | Susceptibilidad | Valoración del Factor Sísmico (Ts) |
|--|------------------------|---|
| III | Leve | 1 |
| IV | Muy Baja | 2 |
| V | Baja | 3 |
| VI | Moderada | 4 |
| VII | Media | 5 |
| VIII | Considerable | 6 |
| IX | Importante | 7 |
| X | Fuerte | 8 |
| XI | Muy Fuerte | 9 |
| XII | Extremadamente Fuerte | 10 |

Tabla 3.24: Valoración del Factor Sísmico (Ts).

- Para representar estos resultados cartográficamente, a partir del mapa de isosistas se genera un TIN (Triangular Interpolated Network) con ayuda del SIG ArcView, y, posteriormente se deriva una mapa raster (GRID), para asignar los correspondientes valores del Factor Sísmico. El Mapa de factor sísmico se muestra en la Figura 3.23.

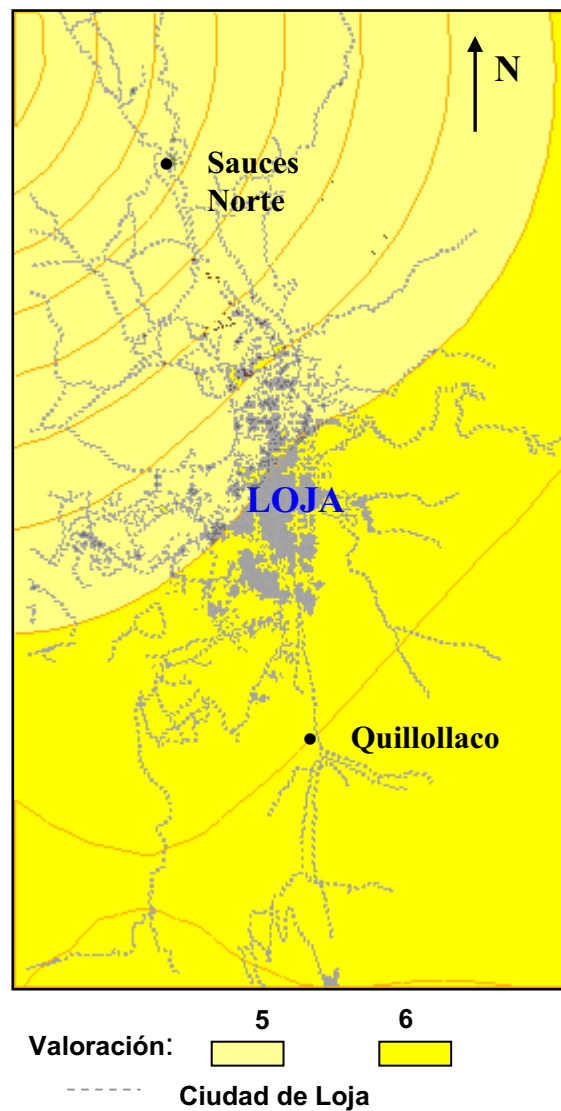


Figura 3.23: Mapa de Factor Sísmico (Ts).

3.2.5.- EL FACTOR INTENSIDAD DE LLUVIAS (Tp)

Para la valoración y representación cartográfica de este factor, se consideran las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones: La Argelia, Malacatos, Zamora, La Toma-Catamayo, Vilcabamba, El Tambo y San Lucas. Estos datos se presentan en el Anexo 12.

Con los datos antes mencionados se proceden a realizar los siguientes pasos:

- Se toman los datos de precipitaciones en 24 horas de la estación La Argelia como representativa de la zona de estudio, debido a que es la única estación dentro del área de estudio; y a la vez, la que presenta la serie continua de mas

años (40 años); y se calcula el valor umbral de precipitación, es decir, el mínimo valor de precipitaciones para un período de retorno de 100 años (Anexo 12). Para este cálculo se empleó el método de Gumbel o de valores extremos detallado en el Anexo 13, para el cual se recomienda utilizar una serie de datos mayor a 20 años (COSUDE, 2002) o mayor a 10 años (Mora y Vahrson, 1993).

- Con este valor umbral calculado (22.33mm), se construyen los rangos para la valoración del factor intensidad de lluvias, como lo indica la Tabla 3.25. Se tiene que señalar que se mantuvieron los valores ponderados desde 1 a 5, como lo propusieron originalmente Mora y Vahrson (1993).

| Rangos | Susceptibilidad | Factor intensidad de lluvias (Tp) |
|-----------|-----------------|-----------------------------------|
| <22.3 | Muy baja | 1 |
| 22.3-44,6 | Baja | 2 |
| 44,6-66,9 | Media | 3 |
| 66,9-89,2 | Alta | 4 |
| >89,2 | Muy Alta | 5 |

Tabla 3.25: Rangos y ponderación del Factor Intensidad de Lluvias.

- Luego se calcula el promedio de las precipitaciones máximas en 24 horas de cada una de las series de las estaciones involucradas en el análisis, como lo muestra la Tabla 3.26.

| Estación | Promedio de la Serie (mm) |
|------------------|---------------------------|
| La Argelia | 19.42 |
| Malacatos | 13.67 |
| Zamora | 28.36 |
| La Toma-Catamayo | 11.99 |
| Vilcabamba | 23.99 |
| El Tambo | 24.12 |
| San Lucas | 17.95 |

Tabla 3.26: Promedio de precipitaciones máximas en 24 horas para las estaciones involucradas en el análisis del factor intensidad de lluvias.

- A partir de los valores de la Tabla 3.25; y 3.26, se valora el factor intensidad de lluvias (Tp) para cada una de las estaciones, como se observa en la Tabla 3.27.

| Estación | Promedio de las Precipitaciones Máximas en 24 horas | Susceptibilidad | Factor Intensidad de Lluvia (Tp) |
|-----------------|--|------------------------|---|
| ARGELIA | 19,42708333 | Baja | 1 |
| MALACATOS | 13,67097428 | Muy baja | 1 |
| ZAMORA | 28,36038463 | Baja | 2 |
| LA TOMA | 11,99374665 | Muy baja | 1 |
| VILCABAMBA | 23,99583333 | Baja | 2 |
| EL TAMBO | 24,12097224 | Baja | 2 |
| SAN LUCAS | 17,95263655 | Muy baja | 1 |

Tabla 3.27: Valoración del Factor Intensidad de Lluvias para las estaciones meteorológicas analizadas.

- Para expresar estos resultados cartográficamente, se utilizan los polígonos de Thiessen, determinando el área de influencia de cada estación y asignando con ayuda del SIG ArcView el valor del factor intensidad de lluvias correspondiente a cada polígono (estación). El mapa de Factor Intensidad de se muestra en la Figura 3.24.

Adicionalmente se ensayó un método de aproximación para la valoración de Tp, el mismo que se muestra detalladamente en el Anexo 14. Este método no se tomó en cuenta para la posterior evaluación de la amenaza debido a que presenta incertidumbre respecto a la cantidad y calidad de los datos empleados en su elaboración.

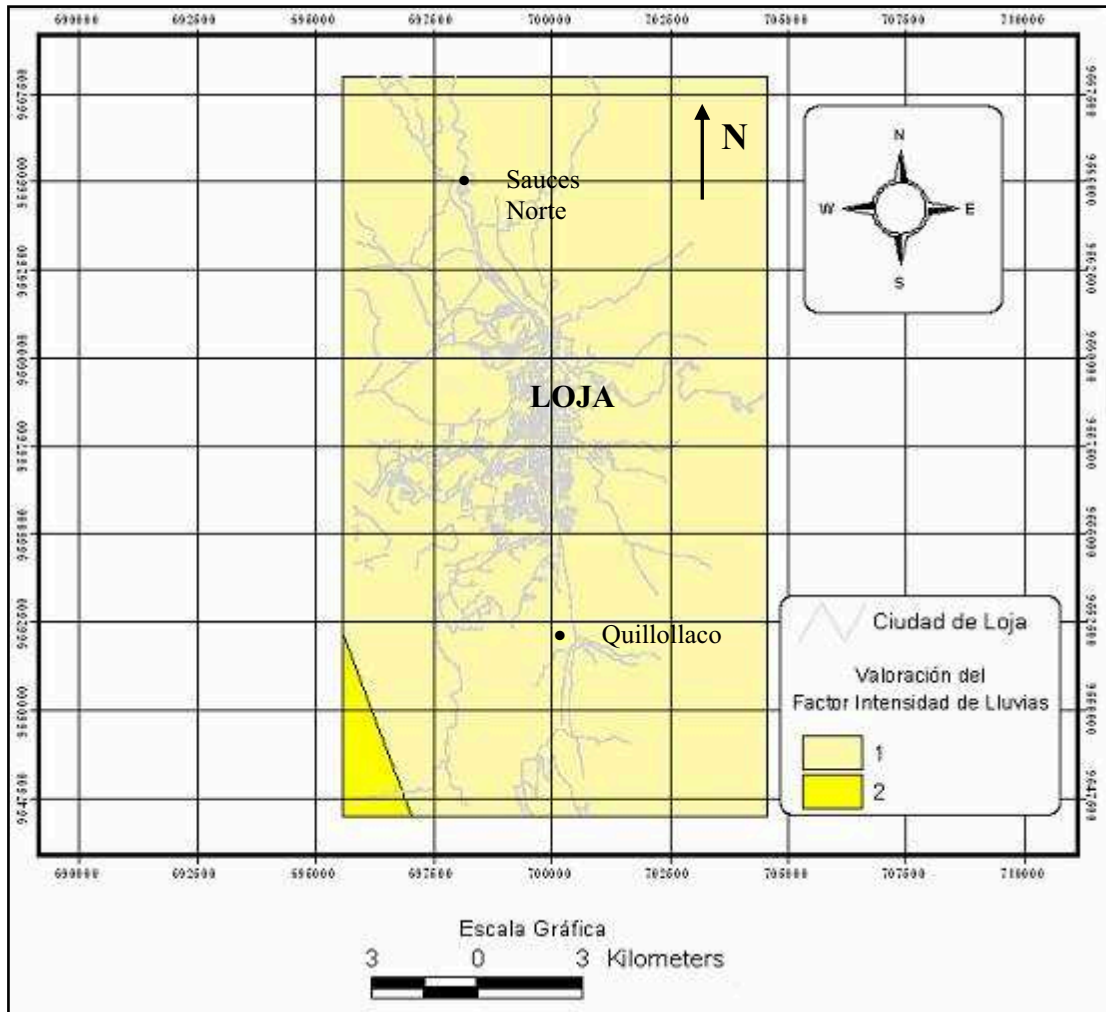


Figura 3.24: Mapa de Factor Intensidad de Lluvias (Tp).

3.2.6.- EL MAPA DE AMENAZAS (H)

Una vez obtenidos los mapas de los factores que intervienen en la zonificación, se procede a determinar el nivel de Amenaza Total (Ht) por FRM, así:

$$Ht = (Sr \times Sh \times Sl) \times (Ts + Tp) \quad (1)$$

Donde: Ht = (Mapa de Factor relieve Relativo * Mapa de Factor Humedad del Suelo * Mapa de Factor Litológico)*(Mapa de Factor sísmico + Mapa de Factor Intensidad de Lluvias)

Con ayuda de Spatial Analyst de ArcView, se calculan los valores a partir de los mapas de factores en formato "shape". Los valores de Ht, fueron posteriormente

reclasificados en intervalos utilizando el concepto de frecuencia relativa; es decir, frecuencia semejante sin importar el número de datos que tenga cada rango. Estos rangos se muestran en la Tabla 3.28.

Valor Máximo de Ht = 336

| Potencial de Amenaza (Ht) | Amenaza (Mapa 1) | Amenaza (Mapa 2) |
|---------------------------|------------------|------------------|
| 0-67.2 | Muy Baja | Baja |
| 67.2-134.4 | Baja | Moderada |
| 134.4-201.6 | Media | Moderada |
| 201.6-268.8 | Alta | Alta |
| 268.8-336 | Muy Alta | Alta |

Tabla 3.28: Rangos de Amenaza.

En base a los rangos definidos en la Tabla 3.28, se construye el Mapa de Zonificación de la Amenaza por FRM con cinco y tres rangos como lo muestra dicha tabla (Mapa 1 y Mapa 2, respectivamente). Las Figuras 3.25 y 3.26, muestran los mapas de Amenaza con cinco y tres clases, respectivamente.

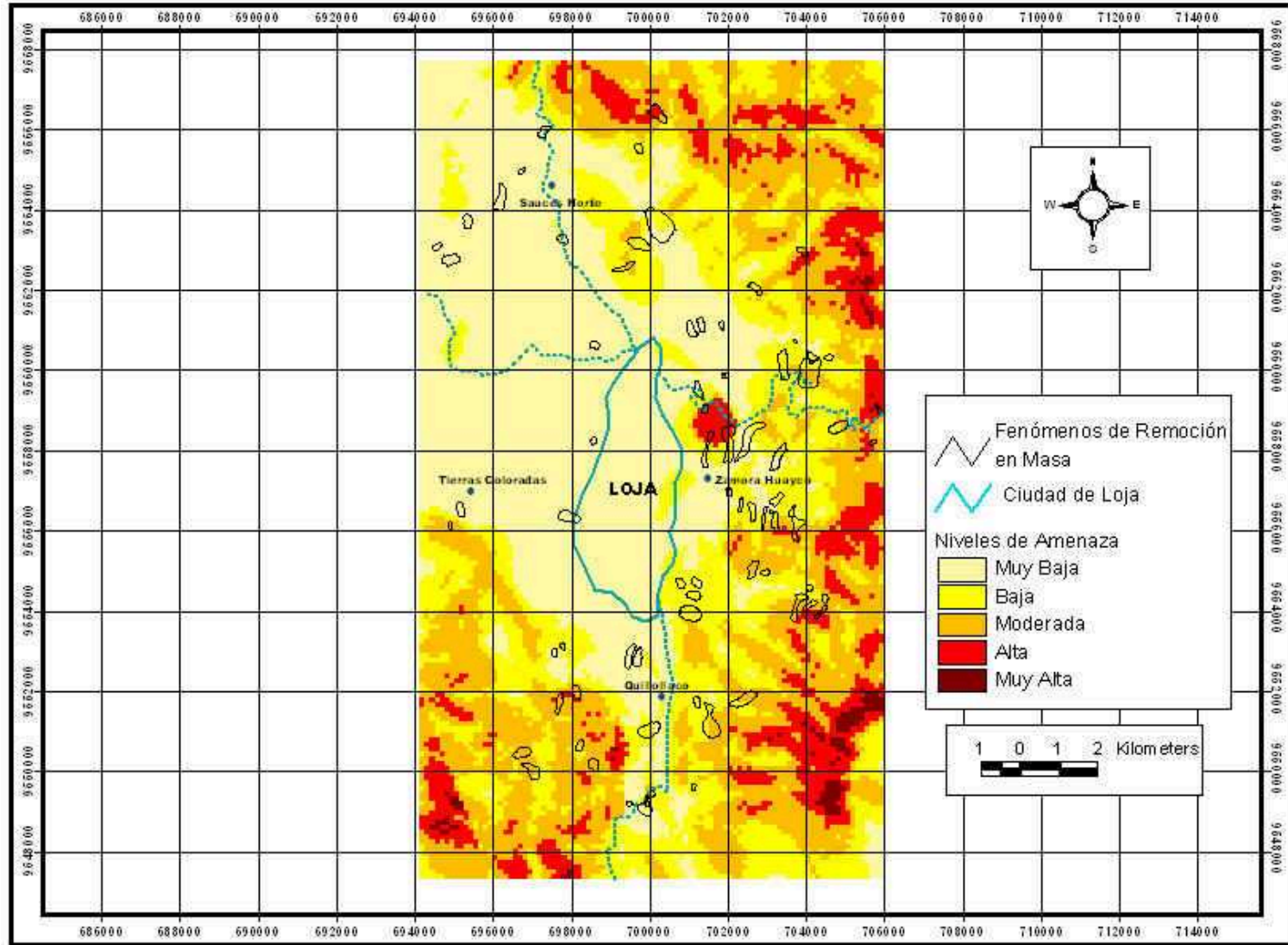


Figura 3.25: Mapa de Amenazas por FRM (Mapa 1).

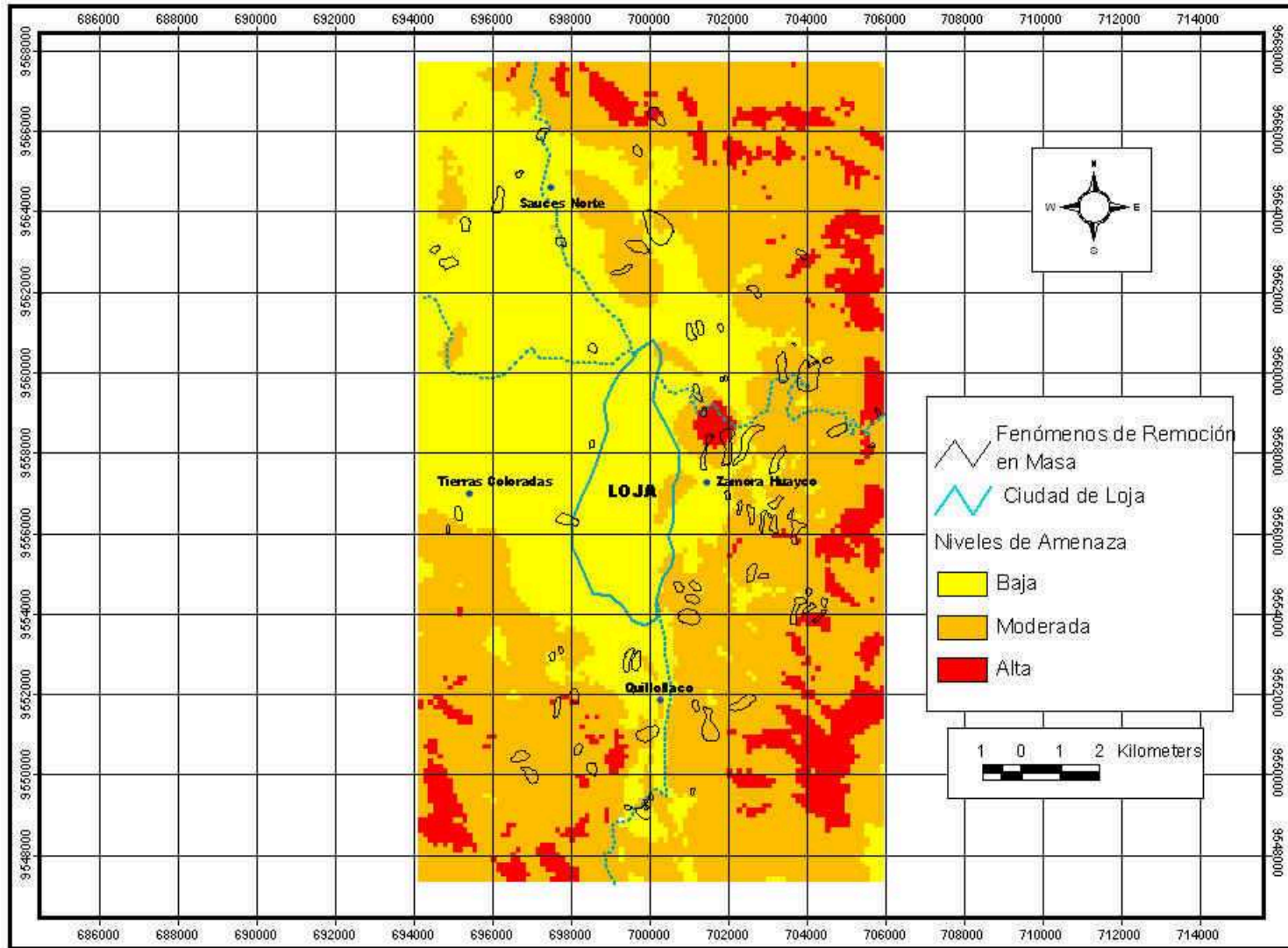
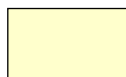


Figura 3.26: Mapa de Amenazas por FRM (Mapa 2).

La simbología descriptiva del mapa de la Figura 3.26 se resume así:



Amenaza Baja: limitada ocurrencia de movimientos en masa aún con la presencia de eventos detonantes de alta intensidad como lluvias máximas en 24h superiores a 22.33 mm o sismos de intensidad mayor a 7 en la escala de Mercalli modificada. Corresponde a la zona de menor pendiente (entre 0 y 12°), con un potencial de amenaza entre 0-67.2.



Amenaza Moderada: zonas con probabilidad leve de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. Algunos deslizamientos, especialmente traslacionales y rotacionales se generarán bajo la influencia de eventos sísmicos o de precipitación extremos. Corresponde a una zona con pendiente entre 12 y 24° y potencial de amenaza entre 67.2-201.6.



Amenaza Alta: zona con alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, especialmente disparados por sismos de intensidad I = VII y VIII, o, debido a lluvias con intensidad máxima en 24 horas igual a 22.33 mm, que tienen un período de retorno de 100 años. Se esperan tener deslizamientos rotacionales y traslacionales, pero especialmente flujos de detritos. La zona tiene pendientes superiores a 24° y grado de amenaza entre 201.6-336.

El método ofrece además la posibilidad de obtener el nivel de amenaza (Ht), en función de cada uno de los parámetros desencadenantes, a partir de la ecuación (1), así:

$$H_{ts} = (S_r * S_h * S_l) * T_s \longrightarrow \text{Grado de Amenaza por Sismos}$$

$$H_{tp} = (S_r * S_h * S_l) * T_p \longrightarrow \text{Grado de Amenaza por Lluvias}$$

De esta forma, se pueden elaborar mapas de amenaza por FRM considerando como factor detonante solamente los sismos o las lluvias. En las tablas 3.29 y

3.30, se muestran los rangos de potencial y grado de amenaza, para sismos y lluvias, respectivamente; y, cuyos resultados se reflejan en las figuras 3.27 y 3.28.

Valor Máximo de Ht = 288
0-288 $288/5=57.6$

| Potencial de Amenaza (Ht) | Amenaza |
|---------------------------|----------|
| 0-57.6 | Muy Baja |
| 57.6-115.2 | Baja |
| 115.2-172.8 | Media |
| 172.8-230.4 | Alta |
| 230.4-288 | Muy Alta |

Tabla 3.29: Clasificación del Grado de Amenaza por sismos.

Valor Máximo de Ht = 72
0-72 $72/5=14.4$

| Potencial de Amenaza (Ht) | Amenaza |
|---------------------------|----------|
| 0-14.4 | Muy Baja |
| 14.4-28.8 | Baja |
| 28.8-43.2 | Media |
| 43.2-57.6 | Alta |
| 57.6-72 | Muy Alta |

Tabla 3.30: Clasificación del Grado de Amenaza por lluvias.

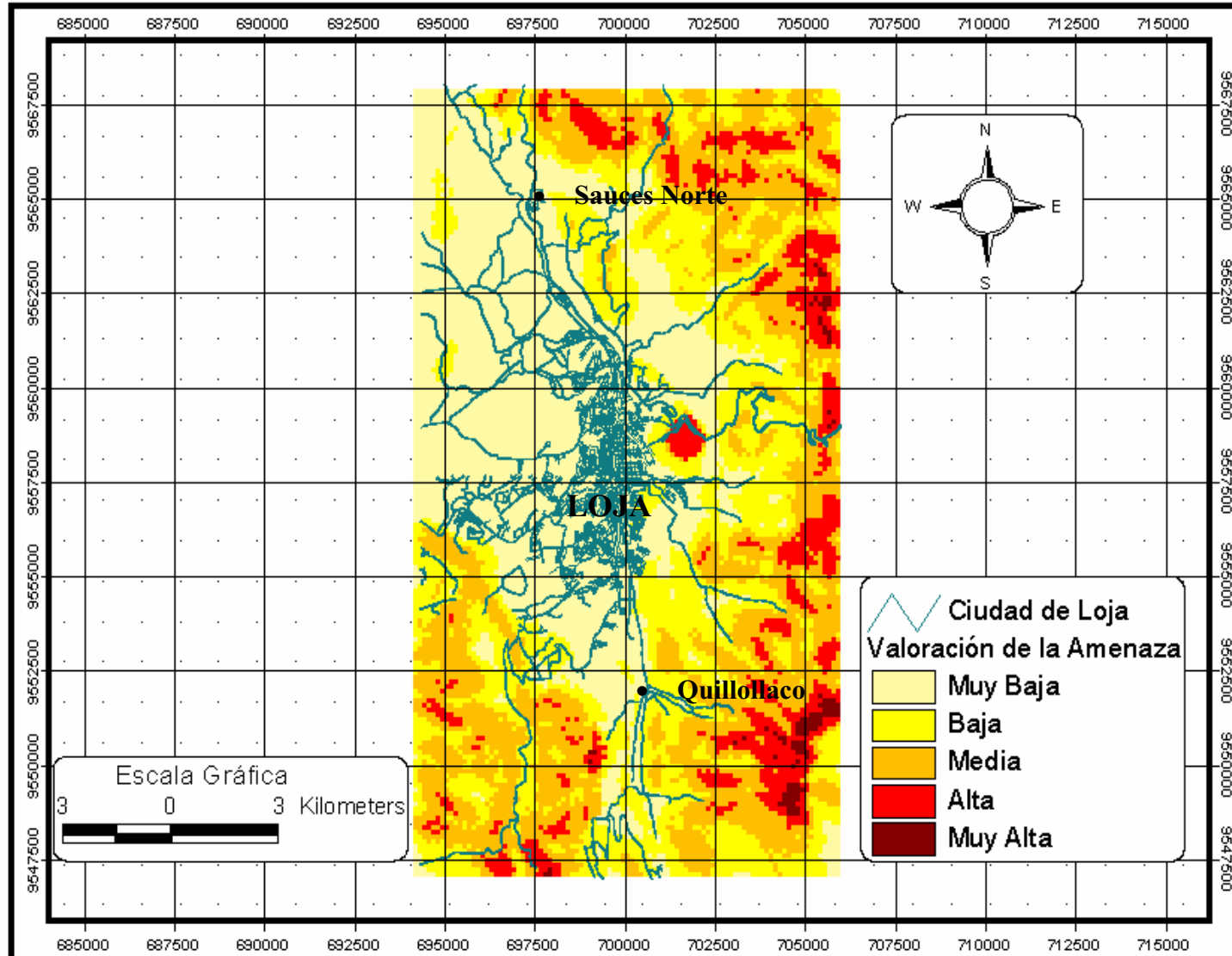


Figura 3.27: Mapa de Amenaza por sismos.

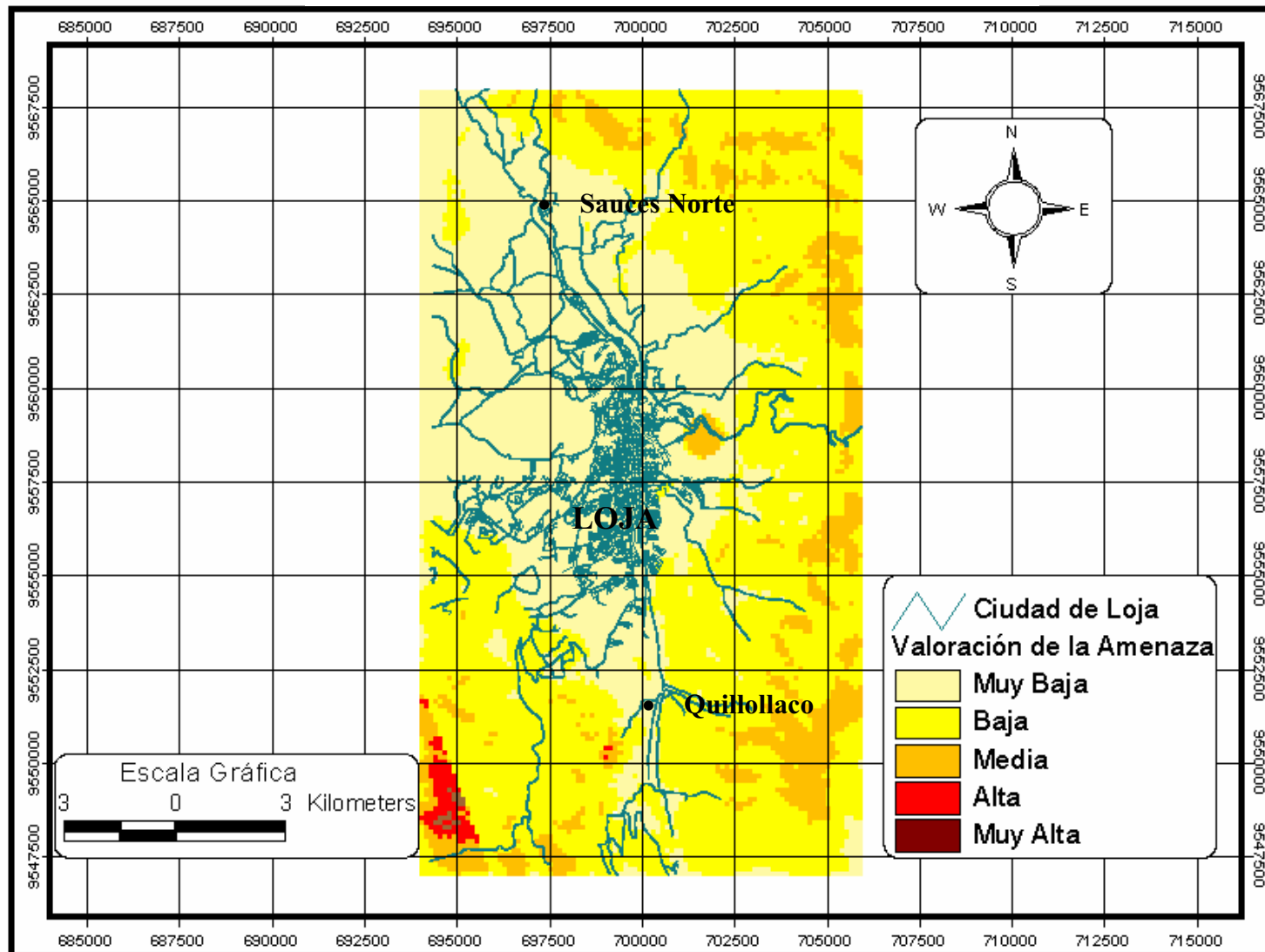


Figura 3.28: Mapa de Amenaza por Lluvias.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS

Se hace una evaluación de las metodologías ensayadas, con énfasis en los parámetros, conceptos, criterios utilizados, procedimientos y el significado de los resultados obtenidos.

4.1.- EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE BRABB

Esta metodología es de tipo explícito empírico, es decir, el grado de susceptibilidad se obtiene por combinación de mapas cualitativos de factores causales o preparatorios del terreno en la ocurrencia de FRM. No se consideran factores detonantes y por tanto el mapa indica únicamente la estabilidad relativa de las laderas pero no hace predicciones sobre la ocurrencia futura de FRM.

4.1.1.- EL MAPA INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS

Un inventario de movimientos en masa es fundamental en esta y otras metodologías para análisis de susceptibilidad. El criterio que fundamenta el uso de este mapa en cualquier método es que las zonas donde han ocurrido deslizamientos son las más propensas a volver a fallar; y por tanto, tienen especial importancia.

Para el análisis de la susceptibilidad, se consideraron únicamente los FRM activos e inactivos; y no, los relictos, zonas de erosión ni reptación; éstas últimas debido a que no se pudieron delimitar en el campo para ser considerados como áreas, a pesar que se encuentran prácticamente en todas las laderas de la zona oriental de la cuenca. Para esta metodología, las zonas de mayor susceptibilidad siempre están relacionadas con la ubicación de los FRM, debido a que el autor considera los depósitos de deslizamientos como una unidad litológica adicional y además las asigna con la mayor susceptibilidad parcial ($SP=L$).

Hay que considerar que, en esta metodología, no se toma en cuenta la tipología de los movimientos en masa, grado de actividad, velocidad del movimientos, etc; sino, únicamente las áreas que abarcan las zonas inestables. Esto tiene importante repercusión en los resultados, debido a que se está asumiendo que las unidades litológicas tienen un igual comportamiento en la generación de los diferentes FRM, lo cual es incorrecto. Se ha visto por ejemplo, que los conglomerados de la Fm Quillollaco presentan en su mayoría deslizamientos traslacionales, al igual que la Fm San Cayetano, en donde la estratificación funciona como plano de falla. Por lo tanto, se debe considerar hacer mapas de susceptibilidad para cada tipo de FRM en el futuro.

Por otra parte, el límite de las áreas inestables de cada tipo de FRM se ha establecido de diferente forma. Para las caídas de rocas, por ejemplo, se han considerado solamente las áreas que representan los depósitos; y no las trayectorias ni las zonas de arranque, debido a que estos son fenómenos en masa relictos. En cambio, en el caso de los flujos se han tomado en cuenta trayectoria, zona de arranque y depósitos, debido a que son inactivos y podrían ser reactivados.

4.1.2.- EL MAPA LITOLÓGICO

Para esta metodología, la utilidad que tiene el mapa geológico únicamente se restringe al área de cada unidad litológica; aunque en la metodología de Brabb (Varnes, 1984) el autor parece agrupar los rangos de SP (% de áreas deslizadas/áreas aflorantes) en base a características de las unidades litológicas; a pesar que esto no está explícito. En el campo se observaron zonas cubiertas con coluviales antiguos que no estaban consideradas en el mapa geológico. Estas zonas ubicadas en la parte occidental de la cuenca, no se incorporaron en el mapa debido a que actualmente están siendo removidas constantemente para propósitos de urbanización, debido al crecimiento urbano de la ciudad. Esta actividad ha incidido en la morfología y el paisaje de dicha zona, por lo que se debe considerar la inclusión de un parámetro de actividad humana en el análisis de susceptibilidad.

4.1.3.- EL MAPA DE PENDIENTES

La primera consideración al respecto es que el mapa de pendientes se derivó de la topografía de la zona a escala 1:25000; sin embargo el mapa topográfico utilizado presentaba curvas de nivel cada 40m, y no cada 20m como normalmente ocurre en los mapas a esta escala. Esto le quitó un poco de precisión a los rangos de pendientes establecidos.

A pesar que este mapa de Pendientes se asemeja mucho al mapa de factor Relieve Relativo del método de Mora-Vahrson, no se debe establecer una comparación, debido a que los dos mapas representan parámetros diferentes.

El mapa de susceptibilidad de la zona no muestra variaciones cuando se hace la reclasificación de los rangos de pendiente, con respecto al mapa elaborado con los rangos de pendientes derivado por defecto en el GIS ArcView. Por tanto, la reclasificación se debe considerar únicamente como criterio de homogenización de los rangos, conociendo que no repercutirá significativamente en los resultados.

4.1.4.- EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

En los mapas desarrollados, las áreas correspondientes a los FRM coinciden con las zonas de mayor grado de susceptibilidad, debido a que en el método original se induce indirectamente a ello (Palacios, 2006), ya que la relación entre las frecuencias (áreas o número de FRM) y la susceptibilidad parcial es lineal. Esta relación desaparece notablemente al considerar la fórmula $S=Ar*fr$ (Anexo 3), debido a que de esta forma no se consideran los depósitos de deslizamientos como una unidad litológica adicional, y además, la frecuencia relativa se calcula a partir de todos los deslizamientos, sin considerar la susceptibilidad parcial (SP). Este aspecto se puede observar en las tablas 4.1 (Método Original) y 4.2 (Propuesta $S=Ar*fr$) y en sus respectivos mapas, en las figuras 4.1 y 4.2.

| Unidades | Rangos de Pendientes | | | | | | SP |
|------------------------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | 0-5 | 5--15 | 15--30 | 30--50 | 50--70 | >70 | |
| Fm La Banda | I | I | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | I | I | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | I | I | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | I | I | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | I | II | II | III | III | I | III |
| Fm Quillollaco | I | II | V | VI | I | I | VI |
| Fm San Cayetano | III | I | V | III | I | I | VI |
| Depósitos deslizados | L | L | L | L | L | L | L |

Tabla 4.1: Susceptibilidad Total para la evaluación con el método original.

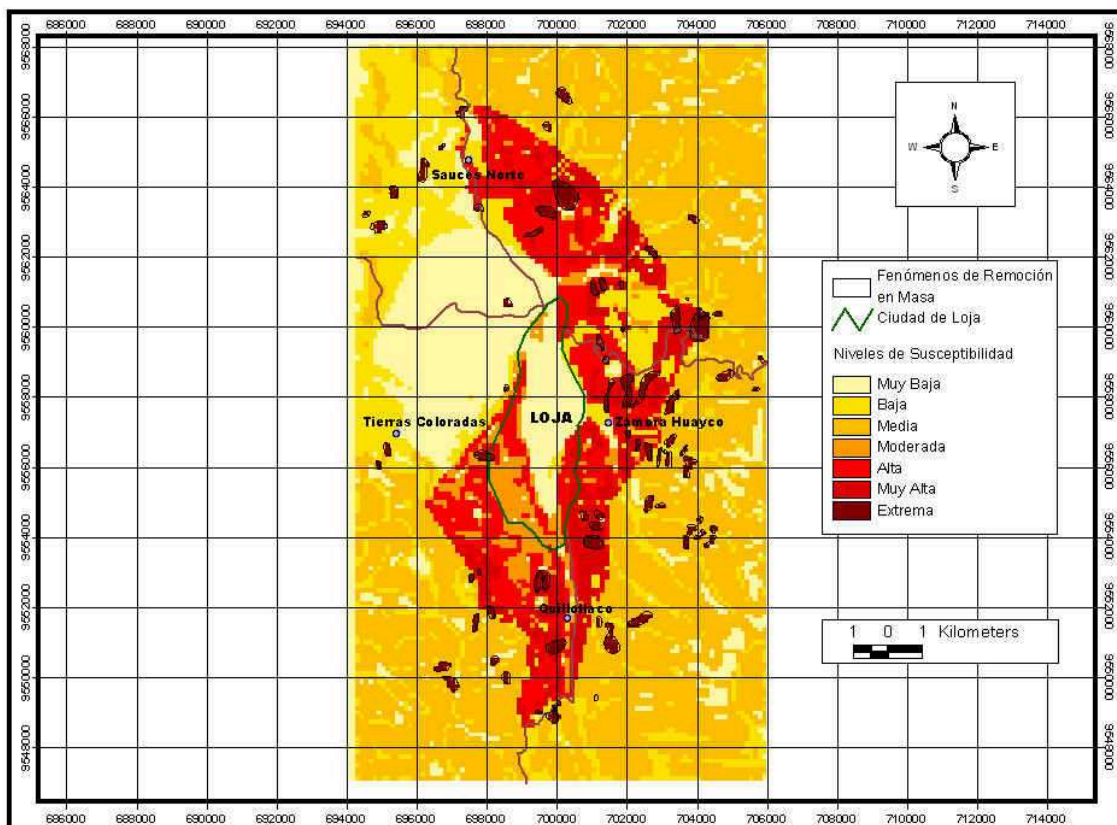


Figura 4.1: Mapa de susceptibilidad para la evaluación con el método original.

| UNIDADES LITOLÓGICAS | % TOTAL DESLIZADO POR LITOLOGIA | | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|--------|------------|-------------|------------|------------|
| | | 0-6,41 | 6,41-11,71 | 11,71-17,92 | 17,92-23,8 | 23,8-44,15 |
| Fm La Banda | 0 | I | I | I | I | I |
| Metamórficos indiferenciados | 0 | I | I | I | I | I |
| Depósitos Aluviales | 0,03 | I | I | I | I | I |
| Fm El Trigal | 0,25 | I | I | I | I | I |
| Fm El Belén | 0,36 | I | I | I | I | I |
| Depósitos Cuaternarios | 0,53 | I | I | I | I | I |
| Unidad Chiguinda | 1,71 | II | II | III | III | II |
| Fm Quillollaco | 4,37 | III | IV | V | IV | I |
| Fm San Cayetano | 4,75 | II | II | III | I | I |

Tabla 4.2: Susceptibilidad Total para el análisis $S=Ar*fr$.

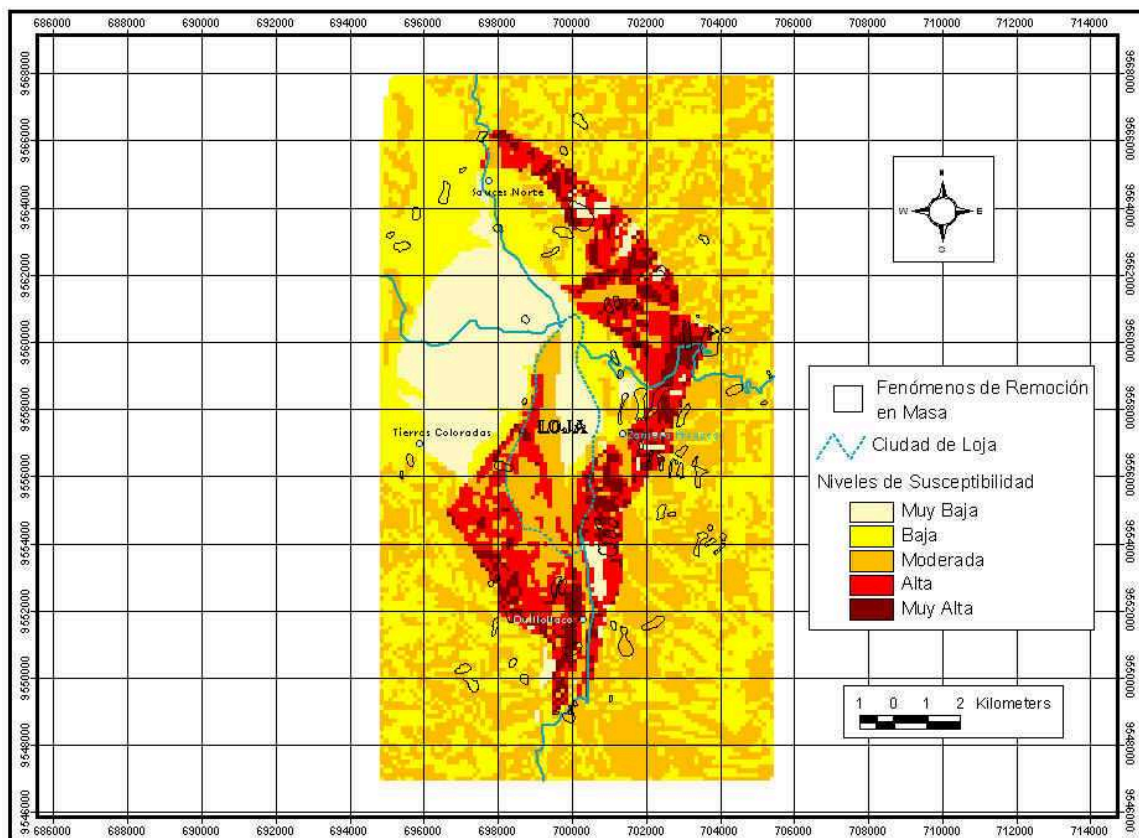


Figura 4.2: Mapa de susceptibilidad para el análisis $S=Ar*fr$.

Como se observa, las Figuras 4.1 y 4.2 en general se asemejan entre sí; sin embargo, las áreas de mayor susceptibilidad para la propuesta $S=Ar*fr$ no coinciden con los FRM, puesto que ellos no son considerados como unidad litológica. Esto contradice el concepto de que las zonas inestables son las más susceptibles a volver a fallar, asumido por el autor en el desarrollo de la metodología. Los niveles de susceptibilidad alta en estos dos mapas tienen una clara relación con la ubicación de las formaciones San Cayetano y Quillollaco. Es decir, estas formaciones tienen los mayores porcentajes de áreas deslizadas respecto a su área aflorante; sin embargo, la U. Chiguinda presenta la mayor cantidad de FRM.

Cuando se aplica el método de Brabb considerando áreas deslizadas en lugar de número de FRM por cada unidad litológica y rangos de pendientes (Variación 1), la respuesta que tiene en el mapa de Susceptibilidad no representa los criterios originales del autor, es decir, existen zonas con muchos FRM de tamaños relativamente pequeños que no representan un área significativa, pero cuya cantidad si es representativa e incide en los niveles de susceptibilidad del mapa.

En el análisis de susceptibilidad por el Método Original y por medio de la Variación 3, la consideración de los deslizamientos puntuales (Valarezo, 2002) no tiene incidencia en el resultado debido a que estos FRM únicamente están presentes en las unidades litológicas en las cuales la Susceptibilidad Parcial (SP) es igual a 1 (calculada considerando estos FRM puntuales); y por tanto, el máximo valor de Susceptibilidad Total (ST), es también 1. Esto se debe a que los FRM puntuales no representan áreas significativas y por tanto la relación respecto a las áreas aflorantes de las unidades litológicas es muy baja y entonces la SP es mínima.

El análisis de susceptibilidad considerando la frecuencia de FRM en cada unidad litológica debe realizarse únicamente cuando se realiza una macrozonificación (escalas menores a 1:50000), debido a que, para ese caso, el tamaño de los movimientos en masa identificados no tiene importancia, pero sí, la cantidad de ellos presente por litología. De esta forma, se puede considerar que la variación

al método, realizada en base a las áreas deslizadas funciona bien para escalas mayores a 1:50000, no solo es importante el tamaño de cada FRM, sino además su tipología y grado de actividad.

Considerando lo anterior, el mapa de susceptibilidad más representativo para la zona de estudio corresponde al elaborado por medio de la Variación 1 (utilizando los mismos criterios del método original pero con análisis de frecuencia por áreas deslizadas), debido a la importancia del tamaño de los FRM cartografiados.

El mapa construido en base a la relación $S=Ar*fr$, se asemeja mucho a los mapas resultado de las evaluaciones por el método original y la Variación 1, pero tiene la incertidumbre de sobredimensionar los resultados, debido a que considera dos veces los FRM en el análisis: cuando calcula el área relativa de cada unidad (%) y cuando toma en cuenta la frecuencia relativa (Nro de FRM por unidad litológica y rango de pendiente, %).

Finalmente, se ha observado en la metodología original, que la agrupación de rangos de SP no tiene una solución estadística; sino posiblemente, se deba a una agrupación de unidades litológicas con características similares. Esto es importante considerar en futuros trabajos, especialmente cuando se tenga una descripción detallada, no solo de la litología sino de las características ingenieriles de estas unidades.

4.2.- EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE MORA-VAHRSON

Este método es de tipo explícito semianalítico donde se combinan factores con sus respectivos pesos ponderados mediante una ecuación matemática. El tamaño de píxel definido para esta metodología fue 125x125m, basado en el tamaño de los FRM (usados en Brabb) y no, como se sugiere, en base a la calidad de la información topográfica. Sin embargo, para la escala utilizada (1:25000), es recomendable usar un tamaño de píxel de 25 a 50m (www.inegi.gob.mx).

La aplicación de este método está plenamente justificada debido a que, los parámetros considerados son fáciles de obtener, tiene un bajo costo y se ajusta a las condiciones del Ecuador, en donde los sismos y las precipitaciones son los principales agentes de disparo de FRM (Plaza, 2006). La incorporación de estos factores detonantes hace que el método se diferencie sustancialmente de Brabb, ya que el mapa obtenido permite predecir el grado relativo de amenaza (peligro) en una zona con deslizamientos (FEMA, 1989).

La valoración presentada por Mora-Vahrson (1993) para los cinco factores que intervienen en el método no es la más adecuada, ya que no permite hacer comparaciones equitativas entre los diferentes factores, debido a que sus escalas de valoración son diferentes y además, el nivel de amenaza calculado no tiene el carácter de probabilidad, ya que puede tomar valores entre 0-1875 (Idrovo, 2006). Para esto se propone normalizar los pesos de los factores, de tal forma que tomen valores entre 0 y 1; y, de este modo no solamente se podrá realizar comparaciones equitativas entre ellos, sino también, establecer la verdadera influencia que cada uno tiene en los procesos de inestabilidad de los terrenos (Idrovo, 2006).

4.2.1. – EL FACTOR RELIEVE RELATIVO (Sr)

Este factor, es el único en la metodología que tiene valoración de cero para uno de sus rangos; lo que provoca que el nivel de amenaza pueda ser también cero (para los casos en donde el índice de relieve relativo esté entre 0-65 m/km², Tabla 1.2). Esto es discutible, ya que en la fórmula se tiene un producto de los factores causales (relieve, humedad y litología), pero aun cuando se tengan zonas con pendientes muy bajas, no significa que no puedan presentarse FRM, y por tanto el nivel de amenaza en dichas zonas no es cero. Un caso podría ser la presencia de esparcimientos laterales, que usualmente aparecen en sedimentos glaciales y marinos, aunque no, en zonas de suelos tropicales residuales (Suárez, 1998); y, se deben a la licuefacción de suelos saturados no-cohesivos (arenas y limos) por efecto de movimientos sísmicos o cambios en la composición química en el agua contenida en los poros y constituyentes minerales del suelo (www.cyta.com.ar).

Es decir, es posible que este tipo de FRM se presente en zonas con pendientes muy bajas, y por tanto el nivel de amenaza no es cero. Por lo tanto, se propone que una valoración normalizada entre 0 y 1 para este factor, de la siguiente manera:

| Índice de Relieve Relativo (m/km²) | Calificativo | Valor del parámetro Sr |
|--|---------------------|-----------------------------------|
| Rango 1 | Muy Bajo | 0.2 |
| Rango 2 | Bajo | 0.4 |
| Rango 3 | Moderado | 0.6 |
| Rango 4 | Alto | 0.8 |
| Rango 5 | Muy Alto | 1 |

Los rangos (1 a 5) se obtienen a partir del histograma plano de los valores del Índice de Relieve Relativo de la zona en estudio, para 5 clases.

4.2.2. – EL FACTOR HUMEDAD DEL SUELO (Sh)

En el análisis de este factor se empleó el método de Thornwaite debido a que los parámetros involucrados son fáciles de obtener y es el más común de los métodos utilizados para estos casos (Dr. Remigio Galárraga, com. per.). Otros métodos, como Blaney-Criddle, por ejemplo, son aplicables a casos más específicos; y por tanto, utilizan otros parámetros como horas de sol diarias, tipos de cultivo, duración del ciclo vegetativo, temporada de siembra, etc. y tienen aplicación principalmente para sistemas de riego, almacenamiento, distribución y drenaje (Aparicio, F. J., 1994).

Para la representación cartográfica del factor, tiene mucha incidencia el número de estaciones involucradas, debido a que se aplican polígonos de Thiessen para obtener las áreas de influencia de cada estación. Por tanto, la confiabilidad de los resultados dependerá del número de estaciones (a mayor densidad de estaciones mejores resultados) y de la calidad de los datos.

La única forma de calibrar el factor para obtener las ponderaciones respectivas es, tomando en cuenta el promedio de evapotranspiración de toda la zona que se estudie; y no, de cada estación por separado. Para el cálculo del nivel de amenaza, se propone normalizar, al igual que todos los factores, los valores de ponderación, de la siguiente forma:

| Suma de los valores asignados | Calificativo | Valor de parámetro Sh |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Rango 1 | Muy Bajo | 0.2 |
| Rango 2 | Bajo | 0.4 |
| Rango 3 | Medio | 0.6 |
| Rango 4 | Alto | 0.8 |
| Rango 5 | Muy Alto | 1 |

Los rangos (1 a 5), se determinan a partir de la suma de valores asignados (VA) para cada estación, como lo muestra la Tabla 3.20, (sección 3.2.2).

4.2.3. - FACTOR LITOLÓGICO (SI)

Al igual que en el método de Brabb, el factor litológico es usado como un parámetro intrínseco en Mora-Vahrson; sin embargo, en este último método, es más relevante, debido a que toma en consideración elementos como estructuras geológicas, tales como fallas y diaclasas, análisis de suelos, grado de compactación, meteorización, profundidad del nivel freático, etc.; y no únicamente el área litológica. Sin embargo, para tomar en cuenta estos aspectos en el análisis del factor litológico, es necesario recopilar la mayor cantidad de información; y, sobretodo tener una buena descripción de las unidades geológicas de la zona.

A pesar de obtener la información litológica y algunos ensayos de suelo en la zona, hay incertidumbre en la valoración de este factor debido a la calidad y cantidad de información recopilada.

La falta de información ingenieril como grado de meteorización, profundidad del nivel freático, resistencia de la roca, grado de fracturamiento, etc, incide

significativamente en la valoración debido a que, en ausencia de ello se evalúa únicamente la litología, la misma que puede presentar un comportamiento distinto bajo las condiciones ingenieriles antes expuestas. Sin embargo, se recomienda trabajar con los datos existentes para la zona de estudio y no, levantar nueva información, debido a que eso implicaría costos y tiempo; además estos ensayos no serían justificados para un análisis de macrozonificación.

De esta forma, la valoración de este factor se debe mantener de forma cualitativa pero con la mayor cantidad de información posible. No se recomienda tampoco utilizar valoraciones de parámetros geotécnicos o de ingeniería para la ponderación del factor litológico, debido a que son muchos los que interactúan y eso complica la valoración e interpretación de los resultados. Sí se recomienda, al igual que los demás factores normalizar los 5 pesos ponderados entre 0.2 y 1, para que tengan el carácter de probabilidad.

4.2.4. - FACTOR INTENSIDAD SÍSMICA (Ts)

La primera consideración hecha para establecer la valoración de este parámetro y que difiere de la propuesta original de Mora-Vahrson, fue que la intensidad no puede ser manejada de forma estadística debido a que no es una variable continua sino discreta (no representa físicamente algo medible); y por tanto, no se pueden utilizar las distribuciones estadísticas conocidas, como por ejemplo Gumbel, ni establecer correlaciones matemáticas con otras variables (Palacios, 2006). Además sabemos que la intensidad es una variable subjetiva y por tanto el nivel de incertidumbre que genera es considerable cuando se aplica la escala de Mercalli Modificada. En el presente trabajo, el mapa de isosistas (con intensidades máximas) realizado para la zona de estudio del presente trabajo, no representa la real distribución de las intensidades en la zona, debido a la insuficiente cantidad de datos (1 valor de intensidad dentro de la zona de estudio), lo que aumenta aún más el nivel de incertidumbre en la ponderación de Ts.

Por estas razones, la Intensidad sísmica no parece el parámetro más adecuado para la valoración de Ts. Sin embargo, debido al amplio uso que tiene este

parámetro en países como el Ecuador, en donde la instrumentación sísmica es todavía limitada, es necesario proponer una valoración considerando las intensidades sísmicas (Idrovo, 2006).

Analizando la valoración propuesta por Mora-Vahrson (1993), se han encontrado tres aspectos importantes:

- Existe una relación lineal muy simple entre la Escala Mercalli y el peso asignado, lo cual no justifica un análisis matemático tan extenso y complejo de este factor.
- El máximo peso asignado a T_s corresponde a 10, que difiere significativamente del peso máximo de los otros cuatro factores, que es 5. Posiblemente esto se debe a que los autores han considerado este factor más preponderante que el resto, y más puntualmente, que el factor intensidad de lluvias, es decir, que los sismos son más importantes que las precipitaciones como disparadores de FRM (Plaza, 2006).
- A diferencia de los factores S_r , S_h y T_p , las intensidades sísmicas utilizadas para la valoración de T_s no han sido agrupadas en intervalos para asignarles el peso correspondiente (Plaza, 2006). Es decir, se ha valorado directamente el valor de intensidad con un peso ponderado de forma lineal.

Con estas consideraciones, se propone mantener los pesos asignados por Mora-Vahrson para la valoración de T_s para el Ecuador, cuando se analiza la Intensidad, tomando en cuenta además que el mínimo valor de intensidad sísmica relacionada con FRM en el Ecuador es III, en la escala Mercalli Modificada (Idrovo, 2006). La siguiente tabla muestra la valoración normalizada que se propone para el factor sísmico, la misma que tendrá sentido, siempre y cuando se normalicen los pesos de los otros cuatro factores considerados en el método (Idrovo, 2006):

| Intensidad Mercalli Modificada | Calificativo | Valor del parámetro Ts |
|---|-----------------------|-----------------------------------|
| III | Insignificante | 0.1 |
| IV | Muy Baja | 0.2 |
| V | Baja | 0.3 |
| VI | Moderada | 0.4 |
| VII | Media | 0.5 |
| VIII | Considerable | 0.6 |
| IX | Importante | 0.7 |
| X | Fuerte | 0.8 |
| XI | Muy Fuerte | 0.9 |
| XII | Extremadamente Fuerte | 1 |

Otro parámetro que puede ser considerado en la valoración de Ts es la aceleración sísmica, la cual se caracteriza por ser un parámetro cuantitativo, que considera las características sismotectónicas de una determinada región. Además, la aceleración sísmica, a diferencia de la intensidad, tiene gran aplicación en ingeniería, por ejemplo en estudios de riesgo sísmico, estabilidad sísmica de taludes, entre otros. Por tales razones, Idrovo (2006) considera la aceleración sísmica como el parámetro más adecuado para la valoración del factor sísmico, y puede ser usada en el método de Mora-Vahrson, para lo cual recomienda ampliar el uso de acelerógrafos en el Ecuador para obtener datos más precisos y confiables.

4.2.5. - FACTOR INTENSIDAD DE LLUVIAS (Tp)

El método de distribución Gumbel con valores extremos de precipitaciones máximas en 24 horas se ajusta bien a la metodología de Mora-Vahrson, debido a que permite conocer el valor mínimo de precipitaciones esperadas para un período de tiempo determinado; y a partir de él, construir los rangos para la valoración de Tp. El período de retorno de 100 años se tomó en consideración, sabiendo que en zonas de valles interandinos del país y sobretodo en la parte

austral no parece haber relación entre el Fenómeno El Niño y las precipitaciones anuales. Aun con episodios extraordinarios como el de 1982-83, las precipitaciones que se presentaron en esas áreas no tuvieron anomalías excepcionales (Rossel, 1997). Períodos de retorno de 4-7 años y 15 años, deberían ser considerados para las zonas costeras del Ecuador, especialmente en la provincias de Manabí y Esmeraldas, en donde estos ENOS (El Niño Oscilación del Sur) son considerados catastróficos, incluso con valores umbrales de 150mm anuales, sobre los cuales empiezan a presentarse desastres por “exceso de agua”, como inundaciones y deslizamientos. Esto demuestra la alta vulnerabilidad de esta región ante la variabilidad climática (DesInventar, www.cambioglobal.org).

La región sierra sur y principalmente sus estribaciones occidentales son afectadas en menor medida debido a la barrera natural de la cordillera Occidental, que detiene la influencia del enfriamiento de las aguas del Pacífico. La sierra norte y la amazonia presenta el mínimo grado de afectación. Visto así el problema de la frecuencia o la recurrencia de eventos EN ya no sería cosa de discutir si se presenta cada 2-3 o 5-7 años como reportan distintos autores, sino que los desastres por efecto del clima ocurren con regularidad prácticamente todos los años durante el período así denominado como “invernal”, con la probabilidad de que en el lapso de una o más décadas se presente un evento extraordinario (Desinventar, www.cambioglobal.org).

Con estas consideraciones, se tiene que tomar en cuenta la zona del país en la cual se aplica esta metodología de macrozonificación, para la valoración del factor intensidad de lluvias (Tp).

Al igual que en el factor humedad del suelo, la cartografía final de este parámetro depende mucho de las estaciones usadas en el análisis, por cuanto la incertidumbre respecto a los datos empleados sigue siendo muy importante en la metodología. Sin embargo, podría ensayarse en futuros trabajos el uso del método de isoyetas que considera las barreras naturales en el análisis de lluvias,

en lugar de los polígonos de Thiessen que las eliminan, para la cartografía y valoración posterior de T_p .

Los dos análisis realizados son importantes, pero el realizado a partir de la distribución Gumbel es más real; utiliza una mayor cantidad de datos y por tanto es más representativo de las condiciones reales. Por otro lado, el método de aproximación muestra incertidumbre por la cantidad y calidad de los datos así como la densidad de estaciones utilizadas en su análisis.

La valoración de T_p debe ser normalizada para los rangos 1 a 5, construidos con el valor umbral de precipitaciones a partir de Gumbel, así:

| Rangos | Susceptibilidad | Factor intensidad de lluvias (T_p) |
|---------|-----------------|--|
| Rango 1 | Muy baja | 0.2 |
| Rango 2 | Baja | 0.4 |
| Rango 3 | Media | 0.6 |
| Rango 4 | Alta | 0.8 |
| Rango 5 | Muy Alta | 1 |

Los factores de disparo sismicidad y precipitaciones, deben adicionalmente ser multiplicados por un factor que le de a la amenaza el carácter de probabilidad, es decir, tomar valores entre 0 y 1 (Palacios, 2006). Para esto, se deben estudiar los deslizamientos que han sido disparados por lluvias y aquellos disparados por sismos; de forma que:

$$\alpha_s + \alpha_p = 1$$

donde:

α_s = Relación entre los FRM disparados por sismos respecto al total de FRM

α_p = Relación entre los FRM disparados por lluvias respecto al total de FRM

En el caso extremo de no tener información sobre el origen de los deslizamientos en una zona, se tomarían valores de $\frac{1}{2}$ para α_s y α_p (Palacios, 2006).

4.2.6. – EL MAPA DE AMENAZA

El mapa de amenazas obtenido con esta metodología muestra que los factores relieve relativo (causa preparatoria) e intensidad sísmica (causa detonante) tiene más incidencia que el resto, como se observa en la Figura 3.22 (sección 3.2.6).

Cuatro de los cinco factores que intervienen en la zonificación de la amenaza en esta metodología, se determinan mediante análisis cuantitativos, y solamente uno (factor litológico) es netamente cualitativo. Sin embargo, es necesario normalizar los puntajes ponderados de todos los factores para darle a la amenaza el carácter de probabilidad.

Los valores dados por los autores a los factores relieve relativo e intensidad sísmica (0-5 y 1-10, respectivamente), nos son equivalentes con el resto (1-5). En el caso de la sismicidad puede interpretarse que los autores consideran este parámetro mucho más importante que las lluvias como disparador de FRM y por tanto le dan una mayor valoración.

La relación $H = (S_r \times S_h \times S_l) \times (T_s + T_p)$, está bien establecida, debido a que los parámetros causales relieve relativo, humedad del suelo y litología interactúan simultáneamente en mayor o menor medida en la ocurrencia de movimientos de terreno; mientras tanto que, como detonantes, pueden actuar la intensidad sísmica y las lluvias, independientemente.

Es importante además considerar la intervención antrópica en el método de Mora-Vahrson como un factor adicional en la generación de FRM. Para propósitos de macrozonificación de la amenaza, este factor interviene como preparatorio y no como detonante. Sin embargo, tampoco puede considerarse que interactúa simultáneamente al relieve, humedad del suelo o litología, debido a que no siempre está presente porque no es un parámetro intrínseco del terreno.

Lo ideal para introducir el factor antrópico en la fórmula de Mora-Vahrson sería no considerarlo como una variable adicional, sino incluirlo en los factores relieve relativo, humedad del suelo y litología, como factor de multiplicación mediante el

estudio de la relación que tiene la actividad del hombre en la modificación de cada uno de estos factores (Palacios, 2006), así:

$$H = (\alpha_a^r \mathbf{Sr} \times \alpha_a^h \mathbf{Sh} \times \alpha_a^l \mathbf{Sl}) \times (\alpha_s \mathbf{Ts} + \alpha_p \mathbf{Tp}) \quad (1)$$

donde:

α_a^r = grado de afectación de la actividad humana en el relieve

α_a^h = grado de afectación de la actividad humana en la humedad del suelo

α_a^l = grado de afectación de la actividad humana en la litología

Para aplicar la relación (1), se debe realizar un análisis estadístico y probabilístico, considerando el nivel de afectación que tiene la actividad antrópica en la modificación del relieve, humedad del suelo y litología, de forma que pueda cuantificarse (Palacios, 2006) y se cumpla que:

$$\alpha_a^r + \alpha_a^h + \alpha_a^l = 1$$

Sin embargo, esta consideración requiere levantar mucha información de campo y realizar un estudio estadístico-probabilístico a detalle con todas las variables antrópicas que puedan existir en la zona de estudio correspondiente. Por este motivo, se propone la siguiente relación para el cálculo de la amenaza por FRM:

$$H = [(\mathbf{Sr} \times \mathbf{Sh} \times \mathbf{Sl}) + \mathbf{Sa}] \times (\alpha_s \mathbf{Ts} + \alpha_p \mathbf{Tp}) \quad (2)$$

donde:

Sa = Factor antrópico

H = Nivel de amenaza por FRM de la zona

Para que H tenga carácter de probabilidad al incorporar Sa, se tiene:

$$H = \frac{1}{2} [(\mathbf{Sr} \times \mathbf{Sh} \times \mathbf{Sl}) + \mathbf{Sa}] \times (\alpha_s \mathbf{Ts} + \alpha_p \mathbf{Tp}) = 1$$

La relación (2), es más sencilla que (1) y se explica debido a que la actividad del hombre incide como un factor preparatorio del terreno; y aunque a veces es un

detonante, por lo general esto ocurre a escalas muy grandes y a corto y mediano plazo.

Por lo tanto se propone en este trabajo introducir el factor humano como lo muestra la relación (2) y tomando en cuenta la propuesta de INGEOMINAS (2001) en donde se valora Sa a partir de un mapa de conflictos de uso del suelo. Este mapa indica las zonas en donde hay algún grado de incompatibilidad entre la vocación de uso que tiene el suelo o uso potencial, en comparación con el uso actual que se le está dando. Las características de uso actual, cobertura vegetal y uso potencial del suelo se comparan en una tabla (Tabla 4.3), mediante la cual se califica el grado de conflicto o de influencia que ejercen las labores del hombre sobre los suelos. Esta valoración es cualitativa, pero toma en cuenta varios criterios básicos para la cartografía de conflictos de uso, tales como la información de índole agroecológica, climas, fisiografía, taxonomía de los suelos, uso y manejos, cubierta vegetal, degradación, entre otros (INGEOMINAS, 2001).

| USO POTENCIAL | USO ACTUAL Y GRADO DE CONFLICTO | | | |
|---------------|---------------------------------|-------|------|----------------|
| | ALTO | MEDIO | BAJO | SIN |
| RN | RA-AD-BL | | | BP-PP-AN-MR |
| B3 | AD-PA-RA-BL-CP-CT | | | BA-BP |
| B2 | PA-RA-BL-CP-CT-AD | | | BA |
| B1 | CT | | CP | BA-PA-RA-BL |
| PA | BL-AD-UI-CT | CP | | BA-PA-RA |
| RA | BL-CT | PA-CP | | BA-RA |
| CP | CT | BL-AD | | BA-PA-RA-CP |
| CT | | | BL | BA-PA-RA-CP-CT |
| AT | UI-CP-CT | | | BA-PA-RA-AD |
| UI | | | CP | UI |

Tabla 4.3: Esquema explicativo del tipo y grado de conflicto de uso del suelo

(Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Uso Actual:

BP: Bosque Natural de subpáramo a páramo alto. **BA:** Bosque Natural tropical a andino. **RA:** Rastrojos y matorrales. **CP:** Cultivos permanentes, semipermanentes y frutales. **AN:** Cuerpos naturales de agua. **MR:** Misceláneo rocoso. **PP:** Praderas naturales de subpáramo a páramo alto. **PA:** Praderas tropicales andinas. **CT:** Cultivos temporales y limpios. **AD:** Áreas erosionadas. **UI:** Zonas urbanas e infraestructura.

Uso Potencial:

RN: Zona de reserva natural de páramo. **B2:** Bosque protector-productor. **PA:** Praderas tropicales a andinas. **CP:** Cultivos permanentes, semipermanentes y frutales. **AT:** Áreas para tratamiento. **B3:** Bosque protector. **B1:** Bosque productor, rastrojos y matorrales. **CT:** Cultivos temporales y limpios. **UI:** Zonas urbanas e infraestructura.

Tomando en consideración los cuatro rangos originales de esta valoración, se propone la siguiente ponderación normalizada para el factor antrópico Sa:

| GRADO DE CONFLICTO | VALORACIÓN | VALORACIÓN NORMALIZADA |
|--------------------|------------|------------------------|
| ALTO | 4 | 1 |
| MEDIO | 3 | 0.75 |
| BAJO | 2 | 0.5 |
| SIN | 1 | 0.25 |

Sin embargo, para efectos de comparación y homogenización, es conveniente tener cinco rangos de ponderación de Sa, al igual que el resto de factores. Para esto, se propone la siguiente reclasificación de los niveles de conflicto, a partir de la Tabla 4.3:

| USO POTENCIAL | USO ACTUAL Y GRADO DE CONFLICTO | | | | |
|---------------|---------------------------------|----------|----------|------|----------|
| | MUY ALTO | ALTO | MODERADO | BAJO | SIN |
| RN | RA-AD | BL | | MR | BP-PP-AN |
| B3 | AD-PA-RA | BL-CP-CT | | | BA-BP |
| B2 | AD-CP-CT | PA-RA | BL | | BA |
| B1 | UI-CP | CT | | BL | BA-PA-RA |
| PA | AD-UI | CT-BL | CP | RA | BA-PÁ |

| | | | | | |
|----|----------|----|----|----|-------------|
| RA | UI-BL | CT | CP | PA | BA-RA |
| CP | UI | AD | | BL | BA-PA-RA-CP |
| CT | UI | AD | BL | CP | BA-PA-RA-CT |
| AT | UI-CP-CT | | | AD | BA-PA-RA |
| UI | | | | CP | UI |

Tabla 4.4 : Grado de conflicto del suelo para cinco rangos (*Modificado de INGEOMINAS, 2001*).

Con la reclasificación de la Tabla 4.4, se propone la valoración definitiva del factor antrópico S_a , de la siguiente forma:

| GRADO DE CONFLICTO | VALORACIÓN NORMALIZADA |
|---------------------------|-------------------------------|
| MUY ALTO | 1 |
| ALTO | 0.8 |
| MODERADO | 0.6 |
| BAJO | 0.4 |
| SIN | 0.2 |

4.3. - COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS

A continuación se establecen algunas comparaciones entre las dos metodologías, partiendo desde las más elementales y tomando en consideración conceptos y criterios utilizados en la zonificación de la susceptibilidad y de la amenaza por movimientos en masa:

- Las dos metodologías de Brabb (MB) y de Mora-Vahrson (MMV) son utilizadas para análisis de macrozonificación y evaluación regional de la susceptibilidad y la amenaza a FRM, respectivamente.
- Los dos métodos tienen la ventaja de utilizar parámetros que son fáciles de obtener y que por lo general existen; y sino, requieren poco tiempo para ser elaborados.

- Otra similitud y ventaja de estos dos métodos es que ambos pueden desarrollarse y expresarse en forma cartográfica mediante el uso de un SIG.
- El alcance de estos dos métodos es diferente. Mientras el MB tiene por objetivo zonificar un área respecto a la susceptibilidad que ésta presente a generar FRM, el MMV en cambio tiene un carácter probabilista de ocurrencia espacial y temporal de movimientos en masa. Por esta razón, es difícil establecer una comparación objetiva entre los resultados de los dos métodos. Para poder compararlas, es necesario considerar en el MMV únicamente los parámetros de susceptibilidad como relieve relativo, humedad del suelo y litología; es decir, la expresión $S_r x S_h x S_l$ representada cartográficamente.
- Para establecer la comparación antes mencionada es necesario considerar aspectos importantes como utilizar la misma escala y tamaño de celdas, de tal forma que los resultados tengan las mismas bases de evaluación.
- Los dos métodos no pueden compararse en su totalidad, es decir, considerando en el MMV los factores de disparo, porque en ese caso se estarían comparando condiciones actuales con condiciones futuras, lo cual no tiene sentido.
- En cuanto al análisis de las metodologías, se observa que son métodos completamente diferentes en su evaluación. Mientras Brabb utiliza mapas cualitativos y los combina usando matrices, Mora-Vahrson da una ponderación a cada factor involucrado y los combina mediante una expresión matemática, dándole al método el carácter cuantitativo y de probabilidad que por definición le corresponde.
- Una vez realizada la homogenización de las valoraciones de los factores del MMV y su normalización para que H tome valores entre 0 y 1, se puede realizar una evaluación entre ellos para determinar el grado de sensibilidad del método a cada uno, y establecer cual tiene mayor incidencia en el resultado. Esto no puede realizarse en el MB, debido a la forma de análisis; sin embargo se observa que el mapa inventario tiene mayor incidencia que las pendientes y la litología.

- La representación cartográfica de MB se realiza de una única forma, mediante un mapa Raster con tamaño de píxeles previamente establecido; en tanto que MMV tiene como variante previa de representación cartográfica para los factores humedad del suelo e intensidad de lluvias, el uso de polígonos de Thiessen. De esto se deriva que la utilización del SIG en las metodologías puede variar sustancialmente, siendo más amplia en el MMV.
- En el método de Brabb, la litología se toma en consideración únicamente como un valor de área aflorante, ya sea que se evalúe la frecuencia de FRM o el área deslizada por unidad litológica, sin considerar características geológicas o ingenieriles como estructuras, grado de consolidación, nivel freático, meteorización, etc. Esto equivale a una generalización de las unidades litológicas existentes. En cambio, para la calibración de este factor en el MMV, se toman en cuenta las características ingenieriles más relevantes; aunque, el análisis de este factor sea cualitativo; y por tanto, subjetivo a la experiencia del evaluador y los datos geológicos existentes.
- Las zonas más susceptibles en el MB original corresponden a lugares en los cuales la densidad de FRM es alta, lo que refleja la relación directa que tiene la ubicación de los FRM con la susceptibilidad; así como la importancia de considerarlos como una unidad litológica adicional. Por otra parte, para el MMV, las zonas de mayor amenaza están localizadas hacia los lugares con pendientes mayores y no necesariamente coinciden con la ubicación de los movimientos en masa.
- Además de los FRM, la litología tiene mucha importancia en el MB como se observa en los mapas de zonificación, en donde los mayores niveles de susceptibilidad coinciden muy cercanamente a la ubicación de las formaciones Quillollaco y San Cayetano tanto cuando se analizan áreas deslizadas por unidad litológica y pendientes, como cuando se analizan número de FRM por unidad litológica y pendientes.
- En el sentido estricto del procedimiento, el MMV presenta algunas ventajas como el poder hacer variantes al método sobre cualquier factor independientemente. Esto permite evaluar varios escenarios de forma rápida con ayuda de un SIG; lo que es más complicado de elaborar en el

MB, debido a que los factores interactúan desde el principio hasta el final del procedimiento.

- En términos de tiempo y considerando los objetivos del trabajo, el MB tiene la desventaja de partir de un mapa inventario de FRM, el mismo que debe ser elaborado mediante un trabajo de campo e interpretación de fotos aéreas que puede llevar mucho tiempo, dependiendo del evaluador. Por otra parte, el MMV tiene la desventaja de que el resultado está sujeto a la incertidumbre en la cantidad y calidad de los datos usados en el análisis de los distintos parámetros; sobretodo humedad del suelo, intensidad de lluvias e intensidad sísmica.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. - CONCLUSIONES

Un mapa inventario de FRM expresa una idea de la susceptibilidad de una zona a movimientos en masa y define áreas en donde deben llevarse a cabo estudios más a detalle; sin embargo, su uso es limitado ya que la información contenida en él corresponde únicamente a un período de tiempo determinado; y, no dice nada respecto a las condiciones futuras de inestabilidad.

En el presente trabajo se ha encontrado que los movimientos en masa más comunes son: deslizamientos rotacionales, traslacionales y flujos. Los deslizamientos rotacionales se presentan mayormente en la Fm Quillollaco y San Cayetano; los traslacionales en la Fm San Cayetano, U Chiguinda y Fm Quillollaco y los flujos casi en su totalidad en los grandes drenajes que presenta la Unidad Chiguinda.

Para un análisis de susceptibilidad; y mas aún, para efectos de comparación con otras metodologías como el MMV, el mapa inventario de FRM en el MB, no se deben considerar los movimientos en masa relictos, debido a que las condiciones climáticas, morfológicas, etc. en las que ellos se originaron ya no están presentes.

La principal conclusión respecto al método de Brabb (1972) es que por su concepción, debe ser utilizado únicamente en trabajos de evaluación y zonificación a escalas pequeñas (<1:50000), para los cuales, los FRM cartografiados pueden representarse como puntos, pero conociendo sus dimensiones reales de tal forma que se pueda calcular la SP.

El método de Brabb presenta dificultades cuando se aplica a escalas 1:25000 o mayores, en donde el tamaño de los FRM respecto a la escala del mapa es considerable. En estos casos es erróneo aplicar un análisis de frecuencias.

Para la elaboración de los rangos de susceptibilidad parcial o relativa en el MB, no solamente se debe optar por una solución estadística, sino además, estudiar a detalle las unidades litológicas que tengan similitudes y puedan ser agrupadas en base a sus características más relevantes en la generación de FRM como grado de meteorización, profundidad del nivel freático, presencia de discontinuidades, etc.

En el presente trabajo, las litologías más susceptibles según el MB corresponde en orden de importancia a la Unidad Chiguinda, Fm Quillollaco y Fm San Cayetano, según el análisis de frecuencias de FRM; y, a la Fm Quillollaco, Fm San Cayetano y Unidad Chiguinda, según el análisis de áreas deslizadas.

El método de Brabb es sensible a la cantidad de rangos de SP que se tomen en consideración en el análisis, como lo demuestran los mapas realizados con la metodología original (7 rangos) y la Variación 3 (4 rangos). Esto se debe principalmente a la relación entre la frecuencia de FRM en cada rango de pendientes.

Además este método es también sensible a la cantidad de rangos de pendiente y a la forma de calcularlos. Para el método original se toman en cuenta 6 rangos calculados en porcentajes; mientras que, para la Variación 3, se utilizan 5 rangos calculados en grados.

Debido a que el método original utiliza la frecuencia de FRM, es importante la calidad del Mapa Inventario, ya que de su localización y cartografía (delimitación) dependerá también el mapa de susceptibilidad. Es decir, el método de Brabb muestra mucha sensibilidad respecto a sus tres parámetros utilizados, como se ha visto en el desarrollo del mismo.

Es importante en la elaboración del Mapa Inventario de FRM, la consideración de la zona de arranque u origen del movimiento como el lugar en el cual se ubique el FRM de manera puntual (utilizando el método original) debido a que la trayectoria que tome la masa deslizada luego, puede depender de otros factores como la

tipología del movimiento o la pendiente; y esto debe mas bien ser evaluado en un análisis de amenazas.

Debido a que el MB no se desarrolló con el fin de ser utilizado mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), la aplicación de cualquiera de estos, como ArcView en el presente trabajo, ha mostrado algunas falencias y dejado dudas en el procedimiento; como consideraciones en el cálculo de las áreas deslizadas la cuantificación de los FRM en los distintos rangos de pendientes; así como la determinación del tamaño de celda o píxel ideal para la escala usada.

Hay que considerar que la topografía que se debe utilizar para derivar el mapa de pendientes tiene que ser anterior a la ocurrencia de los FRM (en lo posible), con el ánimo de evaluar las condiciones originales del terreno, que es lo que representa un mapa de susceptibilidad.

El método de Mora-Vahrson al igual que Brabb es muy sencillo en su aplicación, rápido y relativamente poco costoso. Puede usarse para la macrozonificación de la amenaza a escalas menores o iguales a 1:50000, siempre y cuando la cantidad y calidad de los datos sea la mejor posible.

La propuesta de normalización y homogenización de los factores garantiza que éstos puedan ser evaluados para conocer cuales tienen mayor incidencia en la generación de FRM.

Debido a que los factores causales preparatorios como relieve, humedad del suelo y litología interactúan entre sí y siempre intervienen en mayor o menor grado, ninguno de ellos debería tener una valoración de cero, debido a que su "ausencia" no garantiza la total ausencia de FRM en una determinada zona.

Para la valoración del factor intensidad sísmica (Ts), es importante considerar la misma escala originalmente presentada por Mora-Vahrson tomando en cuenta que el mínimo valor de Intensidad Sísmica relacionado con FRM es III.

Dado que en el Ecuador existen muchas zonas con perspectivas de crecimiento urbano, industrial y comercial, es correcto la incorporación de un factor antrópico (Sa) en la metodología de Mora-Vahrson, el mismo que puede expresarse en términos de conflictos en el uso del suelo.

La valoración presentada por Mora-Vahrson (1993) para los cinco factores que intervienen en el método no es la más adecuada, ya que no permite hacer comparaciones equitativas entre los diferentes factores para conocer su real incidencia en la generación de FRM, debido a que sus escalas de valoración son diferentes.

En el presente trabajo, las áreas de mayor amenaza corresponden a zonas con fuertes pendientes (22-45°) y a las litologías Unidad Chiguinda y Fm Quillollaco. Las zonas con niveles de amenaza bajos corresponden a las formaciones El Belén, La Banda y aluviales del río Malacatos.

No es posible establecer una comparación de las dos metodologías MB y MMV, debido a que la primera representa el estado actual de las condiciones del terreno, mientras que la segunda tiene un carácter predictivo.

La escala de trabajo es fundamental para un análisis de susceptibilidad y/o amenazas debido a que a partir de ella se deriva el tamaño de FRM a considerar, el tamaño de píxeles o celdas; y, debe determinarse sobre la base de los objetivos y el tamaño del área de estudio.

En el MB se pueden realizar más variantes a la metodología original, es decir, el mapa de susceptibilidad puede ser representado más fácilmente con varios escenarios, por ejemplo, considerar la densidad (# de FRM por litología o la relación $S=Arxfr$) en lugar del porcentaje de área deslizada por litología. Sin embargo, desde el punto de vista operacional esto es más complicado que en el MMV.

No existe una metodología específica para que sea adaptable a un área determinada para el análisis de susceptibilidad o amenaza. Por tanto, el criterio, conocimiento y experiencia del evaluador son importantes para decidir que parámetros o variables de predicción deben considerarse en dicho análisis.

Los movimientos en masa representados en el mapa inventario y que no tienen relación con las áreas de amenaza media o alta en la evaluación por en MMV, pueden corresponder a condiciones muy locales del terreno como construcción de vías u otras obras de infraestructura, infiltración de agua por falta de alcantarillado, etc.

5.2. - RECOMENDACIONES

El método de Brabb y el método de Mora-Vahrson deben usarse únicamente para zonificación a escalas 1:50000 o menores. Pueden usarse en casos en que se requiera valorar la susceptibilidad o amenaza de manera fácil, rápida y con bajos costos.

Para escalas mayores a 1:50000 en donde por se requiera hacer una rápida evaluación de la susceptibilidad mediante el método de Brabb, es importante considerar el tamaño de los FRM, es decir, realizar un análisis de áreas deslizadas por unidades litológicas y rangos de pendiente.

Para utilizar el MB se recomienda elaborar un mapa inventario lo más detalladamente posible, incluyendo fotointerpretación y trabajo de campo. Los deslizamientos deben ser considerados como puntos solo en el caso en que sus tamaños no puedan representarse a la escala del mapa, de lo contrario es mejor realizar un análisis de las áreas deslizadas por unidad litológica.

Los fenómenos de remoción en masa relictos no deben considerarse en el análisis de susceptibilidad dado que las condiciones climáticas y morfológicas en las que se originaron no existen mas.

Se recomienda para futuros trabajos de zonificación de la susceptibilidad por el MB realizar la evaluación para cada tipo de FRM, debido a que su comportamiento, forma y zonas en las que se presentan, además de su grado de amenaza, son diferentes.

Se recomienda realizar una reclasificación de los rangos en el mapa de pendientes del MB, en base a los valores más altos de pendientes encontrados para los FRM cartografiados, por medio de un análisis estadístico. Esto permite conocer los valores de pendientes (rangos) que mejor se ajustan a las condiciones de la zona en base a datos reales de deslizamientos.

El método Mora-Vahrson debe usarse con las variaciones presentadas en el presente trabajo respecto a la homogenización de las valoraciones y normalización de los factores y a la incorporación del factor humano en la determinación del grado de amenaza.

Se recomienda utilizar la siguiente relación (www.inegi.gob.mx) para establecer el tamaño de celda o píxel en la evaluación de la susceptibilidad o amenaza:

| | | |
|------------------|---|----------|
| Escala: 1:100000 | → | 100x100m |
| 1:50000 | → | 50x50m |
| 1:25000 | → | 25x25m |

Es importante para futuros trabajos en Ecuador considerar la ubicación de la zona de estudio para elegir el período de retorno de lluvias intensas en la calibración del factor intensidad de lluvias, dado que depende en gran medida del fenómeno de El Niño, que afecta mayormente a la Costa y Sierra Centro-Norte. Es importante además hacer cálculos del valor umbral de precipitaciones para distintos períodos de retorno (10, 25, 50 años), de tal forma que puedan representarse y analizarse varios escenarios.

Se recomienda calibrar el factor humano S_a para el MMV para el Ecuador, en base a las características propias del suelo mediante el estudio de los mapas de

uso actual y potencial. Igualmente se recomienda considerar este factor en la zonificación de la amenaza mediante cualquier otra metodología.

Para el caso de los factores humedad del suelo y precipitación de lluvias, que utilizan datos meteorológicos de estaciones pluviométricas, se recomienda a futuro ensayar variantes como mapas de isoyetas en lugar de polígonos de Thiessen para la calibración y representación de los resultados. Esto es debido a la incertidumbre respecto a las distancias entre estaciones cuando se representan los mapas a través de los polígonos de Thiessen.

Si fuera necesario utilizar la intensidad sísmica (I) por ser la única variable disponible en determinada zona de estudio, se recomienda no utilizar el criterio de distribución Gumbel para su análisis, debido a que no es una variable continua y no representa algo físicamente medible. Como alternativa se recomienda emplear los datos de intensidades máximas cuyos sismos hayan generado FRM en la zona que se estudie.

No es recomendable utilizar los mapas de susceptibilidad y amenaza realizados en el presente trabajo para propósitos de ordenamiento territorial, debido a la incertidumbre que presentan. Sin embargo pueden servir como punto de partida para estudios más detallados de geología, geotecnia y amenazas, mediante análisis determinísticos.

BILIOGRAFIA

ABAD, F. (2004), Aplicación Metodológica para el Estudio de Susceptibilidad por Deslizamientos, Provincia de Imbabura, Proyectos Geológicos, Carrera de Ingeniería Geológica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 31pp. Informe inédito.

APARICIO, F. J. (1994), Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial LIMUSA S.A., Tercera Reimpresión, México DF.

BOJORQUE, J. (2001), Zonificación de Riesgos de Deslizamientos utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), Programa para el Manejo del Agua y Suelo, 10pp.

BONNARD, C. (1994), Microzonificación en función de los Riesgos Geodinámicos, Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza, 10pp.

BRABB, E. (1984), Innovative Approaches to Landslides Hazard and Risk Mapping, USGS, IV International Symposium on Landslides, Toronto, Vol. I, pp. 307-324.

BRUNSDEN, D. & PRIOR, D. (1984), Slope Instability. Editorial John Willey and Sons, Estados Unidos de América.

COBURN, A. W.; SPENCE, R. J.; POMONIS, A. (1991), Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo, Programa de entrenamiento para el Manejo de Desastres (PENUD), Cambridge Architectural Research Limited, The Oast House, Maling Lane, Cambridge, U.K.

CORREA, C.; HINOJOSA, D.; TAPE, M. (2003), Sismicidad Histórica del Ecuador, Cálculo de Aceleraciones Máximas, Energía Sísmica Liberada y estimación del Peligro Sísmico, Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional, Quito.

EGRED, J. (1999), Catálogo Sísmico del Ecuador, Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional, Quito.

FEMA (1989), Landslide Loss Reduction, a Guide for State and Local Government Planning.

GONZALEZ DE VALLEJO, L. (2002), Ingeniería Geológica, Cáp. 11: Prevención de Riesgos Geológicos, pp. 607-620 y Cáp. 14.6: Prevención de riesgos por movimientos de terreno, pp. 656-664. Pearson Educación. Madrid, España.

HUNGERBUHLER, D., et al. (2002), Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador, Editorial Elsevier, 50pp.

INGEOMINAS (2001), Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica, Primera Edición, Bogotá.

IZQUIERDO, O. F. (1991), Estudio Geodinámico de la Cuenca Intramontañosa Cenozoica de Loja (Sur del Ecuador). Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Geología, Minas y Petróleos. Quito-Ecuador.

IDROVO, A.; PLAZA, G. (2004), Zonificación de la Amenaza por Deslizamientos por el Método de Mora-Vahrson en Pimampiro, Provincia de Imbabura, Proyectos Geológicos, Carrera de Ingeniería Geológica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 72pp. Informe inédito.

IDROVO, A. (2006), Comunicación Personal, Estudiante de la Carrera de Ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.

KENNERLEY, J.B. (1973), Geology of the Loja Province, Southern Ecuador. Inst. Geol. Scr.London. Report 23, 34pp.

LAVENU, A. (1994), La Neotectónica, Ejemplos en el Ecuador, Estudios de Geografía, Vol. 6, Corporación Editora Nacional-Colegio de Geógrafos del Ecuador, 24pp.

LITHERLAND M.; ASPDEN J.; JEMIELITA R. (1994), The Metamorphic Belts of Ecuador, British Geological Survey, Overseas Memoir 11, England.

MONSALVE SUÁREZ, G. (1999), Hidrología en la Ingeniería, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá-Colombia.

PALACIOS, P. (2006), Comunicación Personal, Área de Sismología del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.

PAZOS, V.; VINUEZA, W. (1990), Contribución al estudio sobre deslizamientos en el Ecuador. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Geología, Minas y Petróleos. Quito-Ecuador.

PLAZA, G. (1996), La Amenaza y Vulnerabilidad por Deslizamientos en la Región Andina del Ecuador. 7mo Congreso Ecuatoriano de Geología, Minas, Petróleos y Medio Ambiente, Tomo II, 21-24 de Octubre, Quito-Ecuador.

PLAZA, G. (1998), Deslizamientos, zonas expuestas en el Litoral, causas y efectos. Memorias del Seminario-Taller: Los Desastres Naturales y la Estrategia de Desarrollo a largo plazo, 28-30 Enero, Guayaquil-Ecuador.

PLAZA, G. (2000), Zonificación de Peligros Sismogeotécnicos por Deslizamientos y Fenómenos Hidrometeorológicos en la ciudad de Bahía de Caráquez. Escuela Politécnica Nacional, Dirección Nacional de Defensa Civil, Quito.

PLAZA, G. (2001), Experiencias de Evaluación y Cartografía del Peligro por Deslizamientos en las regiones Costera y Andina del Ecuador. Simposio Internacional de Movimientos en Masa, Cuenca-Ecuador.

PLAZA, G. (2006), Comunicación Personal, Departamento de Geología y Riesgos Geológicos de la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO, PMA:GCA (2005), Movimientos en Masa en la Región Andina, una Guía para la Evaluación de Amenazas. Documento Borrador, Colombia.

PUGLLA, S. I. (2001), Evolución Tectono-Sedimentaria de la Cuenca de Loja. Tesis de Grado, Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Geología y Minas. Loja-Ecuador.

SÁNCHEZ, R. et al (2002), Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real, Simposio Latinoamericano de Control de Erosión.

SÁNCHEZ, R. (2005), Modelo de pronóstico de deslizamientos de tierra para alertas tempranas, Semana de Geomática, Bogotá-Colombia.

SCHUSTER, R.L.; KRIZEK, R.J. (1978), Landslides, Analysis and Control. National Academy of Sciences, Washington D.C.

STEINMANN, M., et al. (1999), Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach, Tectonophysics, 21pp.

SUAREZ, J. (1998), Deslizamientos y Estabilidad de taludes en zonas tropicales, Cáp. 11: Zonificación de Amenaza y Riesgo, pp. 355-384. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

VALAREZO, J. R. (2002), Estabilidad de Taludes en la ciudad de Loja. Tesis de Grado, Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Geología y Minas. Loja-Ecuador.

VARNES, D. (1984), Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice. UNESCO.

WEGMANN, K. W. (2005), Digital Landslide Inventory for the Cowlitz County Urban Corridor, Cowlitz County, Washington Division of Geology and Earth Resources, Report of Investigation, January.

WINCKELL, A. (1997), Los Paisajes Naturales del Ecuador, las Regiones y Paisajes del Ecuador, Tomo IV, Vol. 2, CEDIG-IGM, Quito-Ecuador.

YUGSI, F; PLAZA G. (1999), Relación Lluvia-deslizamientos durante el Fenómeno del Niño de 1997-1998 en la Costa Ecuatoriana, IV Jornadas en Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología de la Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.

ZORUBA, Q.; MEND, V. (1969), Landslides and their Control. ELSEVIER. Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague.

PORTALES WEB VISITADOS:

<http://www.itc.nl/default.asp>

<http://www.macre.gov.my.html>

<http://www.usal.es/javisan/hidro>

<http://www.poseidon.unalmed.edu.com>

<http://inegi.gob.mx/geo/default/asp.html>

<http://www.desenredando.org/public/libros.html>

<http://pubs.usgs.gov/of/1994/ofr-94-0615/tvstudy.html>

<http://www.eos.ubc.ca/public/resources/landslides.html>

<http://www.ineter.gob.ni/geofisica/desliza/5-RIESGOS.html>

<http://www.oas.org/osde/publications/Unit/oea66e/ch10.htm>

http://www.cyta.com.ar/suplementos/gecon/articulos/articulos_archivos/v4n3_geon2a5.htm

http://www.inec.gov.ec/interna.asp?inc=cs_tablas_graf&tipo=p&idCiudad=226&idProvincia=11.htm