

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**DETERMINACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN
MASA EN EL ECUADOR, A ESCALA 1:1'000.000, UTILIZANDO EL
MÉTODO DE PONDERACIÓN DE PARÁMETROS**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA

MERCY LORENA ERAS GALARZA
lukas.eras@hotmail.com

DIRECTOR: ING. GALO PLAZA
galo.plaza@epn.edu.ec

Quito, junio 2014

DECLARACIÓN

Yo Mercy Lorena Eras Galarza, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Mercy Eras Galarza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Mercy Eras Galarza, bajo mi supervisión.

Ing. Galo Plaza Nieto
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	3
1.3 MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO	4
1.3.1 MARCO CONCEPTUAL	4
1.3.2 MARCO METODOLÓGICO	9
1.4 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	15

CAPÍTULO 2

EL MAPA INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA (MIMM)	20
2. 1 METODOLOGÍA DEL INVENTARIO.....	20
2.1.1 INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA CARTOGRÁFICO (IMMC) ...	21
2.1.1.1 RESULTADOS.....	24
2.1.2 INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA DESCRIPTIVO (IMMD).....	29

2.1.2.1 RESULTADOS.....	31
-------------------------	----

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE PONDERACIÓN DE PARÁMETROS 39

3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	39
3.2 FACTORES DE ANÁLISIS	39
3.2.1 EL FACTOR PENDIENTE.....	41
3.2.1.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PENDIENTE	41
3.2.2 FACTOR LITOLÓGICO.....	43
3.2.2.1 ANÁLISIS DEL FACTOR LITOLÓGICO.....	44
3.2.3 FACTOR RELIEVE	45
3.2.3.1 ANÁLISIS DEL FACTOR RELIEVE	46
3.2.4 FACTOR USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	48
3.2.4.1 ANÁLISIS DEL FACTOR USO Y COBERTURA VEGETAL	48
3.2.5 FACTOR HIDROGEOLÓGICO	50
3.2.5.1 ANÁLISIS DEL FACTOR HIDROGEOLÓGICO	50
3.2.6 FACTOR PRECIPITACIÓN.....	52
3.2.6.1 ISOYETAS MEDIA ANUAL	52
3.2.6.1.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PRECIPITACIÓN: ISOYETAS MEDIA ANUAL.. ..	52
3.2.6.2 INTENSIDAD DE LLUVIAS DIARIAS.....	54
3.2.6.2.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PRECIPITACIÓN: INTENSIDAD DE LLUVIAS DIARIAS.....	54
3.2.7 FACTOR SISMICIDAD.....	55
3.2.6.1 ANÁLISIS DEL FACTOR SISMICIDAD.....	56

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA..... 58

4.1 EVALUACIÓN CON CUATRO FACTORES.....	59
-----------------------------------------	----

4.1.1 Ensayo A1	59
4.1.2 Ensayo A2	61
4.1.3 Ensayo A3	63
4.2 EVALUACIÓN CON CINCO FACTORES	65
4.2.1 Ensayo B1	65
4.2.2 Ensayo B2	67
4.2.3 Ensayo B3	69
4.3 EVALUACIÓN CON SEIS FACTORES	71
4.3.1 Ensayo C1	71
4.3.2 Ensayo C2	73
CAPÍTULO 5	
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS	76
5.1 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON CUATRO FACTORES.....	77
5.2 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON CINCO FACTORES	78
5.3 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON SEIS FACTORES	79
5.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	80
5.5 VALIDACIÓN DEL MSMME CON EL IMM DEL PROYECTO PRECUPA	81
5.6 CARACTERÍSTICAS DE LAS CLASES DE SUSCEPTIBILIDAD DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL ECUADOR (MSMME).....	82
5.7 DETERMINACIÓN DE ZONAS CON SUSCEPTIBILIDAD A MM.....	84
CAPÍTULO 6	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
6.1 CONCLUSIONES	88
6.2 RECOMENDACIONES	91
CAPÍTULO 7	
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Procedimiento para realizar la jerarquización analítica (Sánchez, 2003)	13
Figura N2. Matriz para la comparación de factores (Sánchez, 2003).....	14
Figura N°3. Matriz normalizada para la comparación de factores (Sánchez, 2003)..	14
Figura N°4. Matriz de pesos ponderados (Sánchez, 2003).....	14
Figura N°5. Marco geodinámico del Ecuador. Abreviaciones: CP: Falla Cauca; CT: Zona de Falla Chimbo-Toachi; GG: Golfo de Guayaquil; LS: Falla La Sofía; MB: Cuenca de Manabí; NF: Falla Nangaritzza; PB: Cuenca Progreso; PaF; Falla Palanda; PeF: Falla Peltetec; PiF: Falla Pallatanga; R: Falla Romeral; SAF: Falla Subandina. (Spikings et al., 2001).....	17
Figura N°6. Mapa Inventario de Movimientos en Masa del Ecuador.....	25
Figura N°7. Distribución de MM (%) a nivel provincial (IMMC).....	26
Figura N°8. Tipos de movimientos en masa (%) (IMMC)	27
Figura N°9. Relación: Porcentaje de MM vs Área (IMMC)	27
Figura N°10. Estado de actividad de MM (%) (IMMC).....	28
Figura N°11 Distribución anual de movimientos en masa (1900-1969) (IMMD).....	31
Figura N°12 Distribución anual de movimientos en masa (1970-2013) (IMMD).....	32
Figura N°13. Relación: Número Anual de MM vs Precipitación Media Anual (1970-2011) (IMMD)	33
Figura N°14. Relación: Número Mensual de MM vs Precipitación Media Mensual: a) 1983, b) 1998, c) 2008 (IMMD)	34
Figura N°15. Distribución mensual de movimientos en masa (1990-2013) (IMMD) ..	35
Figura N°16. Distribución mensual de movimientos en masa (1970-2011) (IMMD) ..	36
Figura N°17. Relación: Número Mensual de MM vs Precipitación Media Anual (1970-2011) (IMMD)	36
Figura N°18. Distribución de MM (%) a nivel provincial (IMMD).....	37
Figura N°19. Tipos de movimientos en masa (%) (IMMD)	37
Figura N°20. Mapa valorado de pendientes reclasificado	42
Figura N°21. Mapa valorado de unidades litológicas	45

Figura N°22. Mapa valorado de unidades de grandes relieves (INIGEMM, 2013)	47
Figura N°23. Mapa valorado de uso y cobertura de uso de suelo	49
Figura N°24. Mapa valorado de unidades hidrogeológicas	51
Figura N°25. Mapa valorado de precipitación media anual	53
Figura N°26. Mapa valorado de intensidades de precipitación diarias, para períodos de retorno de 100 años (INIGEMM, 2013)	55
Figura N°27. Mapa valorado de zonas sísmicas	57
Figura N°28. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A1	60
Figura N°29. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A1	61
Figura N°30. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A2	62
Figura N° 31. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A2 ...	63
Figura N°32. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A3	64
Figura N°33. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A3	65
Figura N°34. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B1	66
Figura N°35. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B1	67
Figura N°36. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B2	68
Figura N°37. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B2	69
Figura N°38. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B3	70
Figura N°39. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B3	71
Figura N°40. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: C1	72
Figura N°41. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: C1	73
Figura N°42. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: C2	74
Figura N°43. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: C2	75

Figura N°44. Relación: Porcentaje de MM vs Clase de Susceptibilidad (4 Factores)	77
Figura N°45. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (4 Factores)	77
Figura N°46. Relación: Porcentaje de MM vs Clase de Susceptibilidad (5 Factores)	78
Figura N°47. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (5 Factores)	78
Figura N°48. Relación: Porcentaje de MM vs Clase de Susceptibilidad (6 Factores)	79
Figura N°49. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (6 Factores)	79
Figura N°50. Porcentaje de MM vs Clase de Susceptibilidad (Ensayos: 4C, 5B, 6A)	80
Figura N°51. Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (Ensayos: 4C, 5B, 6A)	80
Figura N°52. MSMM vs IMM- Proyecto PRECUPA.....	81
Figura N°53. Relación: Porcentaje de MM - Proyecto PRECUPA vs Clase de Susceptibilidad MSMME	82
Figura N°54. Cantones con zonas de susceptibilidad alta y muy alta.	85

ÍNDICE DE TABLAS (ANEXO 1)

Tabla N°1. Tipos, niveles y escalas de zonificación recomendados en relación al objetivo (JTC-1, 2008)

Tabla N°2. Niveles de actividad para los diferentes niveles de zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo (JTC-1, 2008)

Tabla N°3. Escalas para la cartografía de zonificación de MM y sus aplicaciones (JTC-1, 2008)

Tabla N°4. Tipos de movimientos en masa (Cruden y Varnes, 1996)

Tabla N°5. Escala de velocidades (Cruden y Varnes, 1996)

Tabla N°6. Clasificación de la profundidad de la masa movida (ICL: International Programme on Landslide en INIGEMM (2013))

Tabla N°7. Clasificación del volumen del movimiento en masa (ICL: International Programme on Landslide en INIGEMM (2013))

Tabla N°8. Cuadro resumen de técnicas de análisis de mapas de susceptibilidad, modificado de Soeters y VanWesten, 1996 (PMA: GCA, 2007)

Tabla N°9. Criterios usados para la calificación de factores en el MJA (Roa, 2006)

Tabla N°10. Valores de CA con respecto al tamaño de la matriz (Sánchez, 2003)

Tabla N°11. Rangos para el factor pendiente (Van Zuidan, 1986)

Tabla N°12. Rangos de pendientes valoradas (Mora, 2004)

Tabla N°13. Valoración de las unidades litológicas

Tabla N°14. Valoración de las unidades de grandes relieves (INIGEMM, 2013)

Tabla N°15. Valoración de las unidades de uso y cobertura de uso de suelo

Tabla N°16. Valoración del factor hidrogeológico (INAMHI-DGGM, 1983)

Tabla N°17. Valoración de los rangos de precipitación media anual (INAMHI, 2013)

Tabla N°18. Intensidades máximas en 24h00 para un período de retorno de 100 años (INAMHI, 1999)

Tabla N°19. Valoración de los rangos de precipitación media anual (INIGEMM, 2013)

Tabla N°20. Valoración de las zonas sísmicas (Modificado de NEC, 2011 en INIGEMM, 2013)

Tabla N°21. Determinación de los pesos de los factores de análisis (4F: A1)
(INIGEMM, 2013)

Tabla N°22. Determinación de los pesos de los factores de análisis (4F: A2)

Tabla N°23. Determinación de los pesos de los factores de análisis (4F: A3)

Tabla N°24. Determinación de los pesos de los factores de análisis (5F: B1)
(INIGEMM, 2013)

Tabla N°25. Determinación de los pesos de los factores de análisis (5F: B2)

Tabla N°26. Determinación de los pesos de los factores de análisis (5F: B3)

Tabla N°27. Determinación de los pesos de los factores de análisis (INIGEMM, 2013)
(6F: C1)

Tabla N°28. Determinación de los pesos de los factores de análisis (6F: C2)

Tabla N°29. Porcentaje de movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad
(4 Factores)

Tabla N°30. Porcentaje del área de clase de susceptibilidad respecto al área total
(4 Factores)

Tabla N°31. Porcentaje de movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad
(5 Factores)

Tabla N°32. Porcentaje del área de clase de susceptibilidad respecto al área total
(5 Factores)

Tabla N°33. Porcentaje de movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad
(6 Factores)

Tabla N°34. Porcentaje del área de clase de susceptibilidad respecto al área total
(6 Factores)

Tabla N°35. Porcentaje de movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad
(4, 5 y 6 Factores)

Tabla N°36. Porcentaje del área de clase de susceptibilidad respecto al área total
(4, 5 y 6 Factores)

ABREVIATURAS

BGS	British Geological Survey
CA	Consistencia Aleatoria
CIGMA	Centro Investigación Geológico Minero Ambiental
CLIRSEN	Centro de Levantamientos Integrales de Recursos Naturales por Sensores Remotos
CODIGEM	Corporación de Desarrollo Geológico Minero
CONADE	Corporación Técnica de Desarrollo
CSS	Cuerpo Suizo de Socorro
DEM	Modelo Digital de Elevación
DesInventar	Sistema de Inventario de Desastres
DGGM	Dirección General de Geología y Minas
DHA/UNDRO	Department of Humanitarian Affairs, United Nations Disaster Relief Office
DINAGE	Dirección Nacional de Geología del Ecuador
DIPLASE-MTOP	Dirección de Planeamiento de la Seguridad para el Desarrollo Nacional – Ministerio de Transporte y Obras Públicas
DNDC	Dirección Nacional de Defensa Civil
DYA	Proyectos Cía. Ltda.
EMAP	Empresa Metropolitana de Agua Potable
EMC	Evaluación Multicriterio
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
EPN	Escuela Politécnica Nacional
FRM	Fenómeno de Remoción en Masa
IC	Índice de Consistencia
IG-EPN	Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional
IMM	Inventario de Movimientos en Masa
IMMC	Inventario de Movimientos en Masa Cartográfico
IMMD	Inventario de Movimientos en Masa Descriptivo
INAMHI	Instituto Nacional Meteorología e Hidrología
INECEL	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
INEMIN	Instituto Ecuatoriano de Minería
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico de Perú
INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
IRD	L’Institut de Recherche pour le Développement
JCT	Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slope.
JPDC	Juntas Parroquiales de la Defensa Civil

MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Apicultura y Pesca
MJA	Método de Jerarquización Analítica
MM	Movimientos en Masa
NAB	Northern Andean Block
NEC	Norma Ecuatoriana de Construcción
ODA	Overseas Development Administration
ODEPLAN	Oficina de Planificación
Orstom	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
PIB	Producto Interno Bruto
PMA-CGA	Proyecto Multinacional Andino. Geociencias para las Comunidades Andinas
RI	Razón de Inconsistencia
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIMMA	Sistema de Información de Movimientos en Masa
SNGM	Servicio Nacional de Geología y Minería
SNGR	Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos
UCE	Universidad Católica del Ecuador
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
BAT	Bloque Amotape-Tahuín

RESUMEN

En Ecuador, a nivel nacional, se han desarrollado pocos estudios de análisis de susceptibilidad por movimientos en masa a esta escala, por ello, este trabajo trata de contribuir al análisis y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el Ecuador, a escala 1:1'000.000.

Para el análisis, se emplea el Método de Ponderación de Parámetros o Combinación de Factores Ponderados. El método combina factores valorados y ponderados generalmente por expertos en el tema, de acuerdo al nivel de influencia de cada uno de ellos en la generación de movimientos en masa bajo ciertas condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas. Este análisis se lo realiza mediante un algoritmo diseñado que puede desarrollarse en un sistema de información geográfico de manera fácil y rápida.

De acuerdo a la metodología aplicada, se realizaron varios ensayos con cuatro, cinco y seis factores de análisis, que son: pendiente, litología, grandes unidades de relieve, uso y cobertura vegetal, hidrogeología, lluvia y sismicidad. Cada ensayo fue evaluado con un indicador, en este caso, el Inventario de Movimientos en Masa Cartográfico y se determinó que el ensayo que utiliza los cuatro primeros factores antes mencionados, se aproxima mejor a las condiciones del indicador y representa bien la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador.

Además, se determinan zonas susceptibles a movimientos en masa a nivel cantonal, que permiten recomendar estudios a escalas mayores o de detalle, para una mejor planificación territorial.

ABSTRACT

In Ecuador, at a national level, few studies have been developed for analysis of landslide susceptibility at this scale, therefore, this paper aims to contribute to the evaluation and analysis of susceptibility by this type of natural processes in Ecuador in a scale 1:1'000.000.

For the analysis, the Method of Balancing of Parameters or Combination of Balanced Factors is used. The method combines valued rates factors and generally weighted by experts in the field, according to the level of influence of each of factors in generating of mass movements under certain geological, geomorphological and climatic conditions. This analysis is applied through a designed algorithm that can be developed into a geographic information system easily and quickly.

According to the methodology, several tests were performed with four, five and six factor analysis. These factors are: slope, lithology, major relief units, use and vegetation cover, hydrology, rainfall and seismicity. Each trial was assessed with an indicator, in this case, with the Cartographic Inventory of Mass Movements. According to this analysis, was determined that the assay using the first four aforementioned factors is close to the best indicator conditions and represents good zoning of landslide susceptibility of Ecuador.

In addition, were identified susceptible areas to mass movements at the cantonal level, allowing recommending studies at larger scales or detail for a correct territorial planning.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los movimientos en masa son parte de los procesos geodinámicos externos naturales que se desarrollan en la superficie terrestre, influenciados cada vez más por las actividades antrópicas. En el Ecuador debido a sus características geológica, geográfica y climática relacionadas con la morfología, el tipo de material, la sismicidad, la presencia del Fenómeno de El Niño y la ocupación de zonas montañosas, los movimientos en masa han estado siempre presentes, como lo menciona en la segunda mitad del siglo pasado la Revista Línea, N° 40 (s/f).

Estos fenómenos han causado pérdidas de vidas humanas y grandes pérdidas económicas y sociales. Solamente en el decenio de 1980 a 1990, el promedio anual de víctimas mortales por movimientos en masa en la región andina fue alrededor de cincuenta y más de cien viviendas sufrieron daño parcial o total (Pazos y Vinuesa, 1990). Los movimientos en masa generados por el terremoto de 1987 en la zona del volcán El Reventador, causaron daños en las redes viales entre Quito y Lago Agrio y Baeza – Lago Agrio, aislando cerca de 75000 habitantes, además de la rotura de la tubería del Oleoducto Trans-Ecuatoriano, resultando una pérdida total de ingresos para el país estimada en cerca de 800 millones de dólares (Hall, 2000) que provocó una recesión económica para el país los siguientes 5 años.

El macrodeslizamiento de La Josefina y el posterior represamiento del Río Paute ocurrido en la Región Austral en 1993, provocó la muerte de alrededor de cien habitantes; 5.631 personas fueron directamente afectadas por la pérdida de vivienda, tierra o empleo; así mismo 741 viviendas se destruyeron, 76% de manera total; 2.473 hectáreas de tierra y 105 km de carretera fueron afectadas, generando pérdidas totales calculadas en 147 millones de dólares, equivalente al 1% del PIB (Zevallos et al., 1996). Durante el período del Fenómeno El Niño de 1997-1998, los

deslizamientos fueron el segundo fenómeno después de las inundaciones que más evacuados y afectados provocaron, con un número de 20.252 afectados y 7.675 evacuados, así mismo las pérdidas económicas en dólares superaron los 500 millones en la provincia de Manabí, 400 millones en Guayas y más de 200 millones en Los Ríos y El Oro (Zevallos, 1999).

En el Ecuador los movimientos en masa (MM) o fenómenos de remoción en masa (FRM) son conocidos con varios términos populares como: derrumbes, deslaves, deslizamientos, caídas de rocas, avalanchas, aluviones, hundimientos, etc. (Pazos y Vinueza, 1990) y, constituyen una de las amenazas continuas y de gran impacto en los últimos años, aunque generalmente de carácter puntual y menos espectacular que las otras amenazas geológicas en su manifestación (Plaza, 1996).

A pesar de la reconocida importancia por sus impactos, en el país no se tiene todavía un conocimiento y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa a nivel nacional, así como de su distribución espacial y temporal ni de sus causas. Los estudios realizados a escala regional y local, utilizando diferentes metodologías y escalas, que han mostrado de forma puntual algunas características de la susceptibilidad y amenaza son pocos todavía y corresponden a ensayos metodológicos realizados en las universidades (Pazos y Vinueza, 1990; Jiménez, 1999; Yugsi, 2004; Abad, 2006; Idrovo, 2006; Correa, 2007; Ramírez, 2007; Aillón y Armijos, 2010; Bravo y González, 2009; Tambo y Vicuña, 2009).

Otras evaluaciones de la amenaza realizadas en proyectos específicos, en el marco de colaboración de instituciones nacionales o con organismos internacionales son CODIGEM-DHA/UNDRO (1990); Almeida et al, (1996); EMAP, IRD e INAMHI (2000); EPN-DNDC (2000); ODEPLAN (2002); EPN-PLANTEL (2005); DNDC (2007). Solo a partir de los últimos años el estado ecuatoriano ha ensayado elaborar la cartografía temática de susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos realizados por instituciones estatales como la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgo (SNGR) que cuenta con 33 mapas preliminares de 17 provincias del país sobre Zonas Propensas a Erosión y Movimientos en Masa, a escala 1:25.000, y el Instituto Nacional de

Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM) que desarrolló el proyecto de Zonificación de Susceptibilidad y Peligros/Amenazas por Procesos de Remoción en Masa, a escala 1:50.000 del Territorio Ecuatoriano, Fase I que comprendía las provincias de Chimborazo y El Oro.

Por esta razón, se ha considerado oportuno y necesario evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa, a nivel nacional, para identificar las zonas susceptibles, con el objetivo de contribuir al conocimiento de las amenazas geológicas e incentivar el estudio a mayor detalle y profundidad en las zonas de alta susceptibilidad.

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto Zonificación de Susceptibilidad y Peligros/Amenazas por Procesos de Remoción en Masa, a escala 1:50.000 del Territorio Ecuatoriano, Fase I, desarrollado por el INIGEMM, donde la autora de este proyecto de titulación tuvo la oportunidad de colaborar, y por lo tanto, con el consentimiento de esta institución, se utilizan algunos datos del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, a escala 1:1'000.000 (INIGEMM, 2013).

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al análisis y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el Ecuador a escala 1:1'000.000.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Identificar y caracterizar los factores de análisis y elaborar los mapas temáticos correspondientes.
- 2 Actualizar el inventario cartográfico de movimientos en masa y desarrollar una base de datos.
- 3 Analizar y evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa mediante el método de Ponderación de Parámetros y elaborar un mapa a escala 1:1'000.000.

1.3 MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO

1.3.1 MARCO CONCEPTUAL

Lo que se describe a continuación hace referencia a los documentos del Joint Technical Committee on Natural Slopes and Landslides (JTC-1, 2008) y de PMA: GCA (2007).

La susceptibilidad a movimientos en masa es la evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los movimientos en masa que existen o potencialmente pueden ocurrir en un área. También puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos potenciales o existentes. Aunque se espera que los movimientos en masa se originen frecuentemente en zonas más sensibles, en el análisis de la susceptibilidad, no se considera la frecuencia o período de retorno con el que ocurren. La susceptibilidad incluye los movimientos en masa que tienen su origen en la zona de estudio o fuera de ella, pero pueden transportarse al interior de la zona o tener un comportamiento regresivo.

La zonificación corresponde a la división de un territorio en áreas o dominios homogéneos de acuerdo a los niveles de susceptibilidad, amenaza o riesgo a MM.

La zonificación de la susceptibilidad incluye la clasificación, área o volumen (magnitud), distribución espacial, descripción de la distancia de recorrido, la velocidad o la intensidad de los MM existentes o potenciales del área de estudio. La zonificación de la susceptibilidad generalmente incluye el desarrollo de un inventario de los movimientos en masa (IMM) pasados conjuntamente con una valoración de las áreas con potencial para experimentar susceptibilidad en el futuro, pero no una evaluación de la frecuencia (probabilidad anual) de la ocurrencia de los MM. En algunas situaciones la zonificación de la susceptibilidad necesita ser extendida fuera del área de estudio para cubrir áreas que comienzan a ser zonificadas con respecto a la amenaza y el riesgo, pues los MM pueden transportarse al interior de la zona de estudio de la susceptibilidad.

La zonificación de MM es comúnmente más requerida a nivel de gobiernos locales para la planificación del desarrollo urbano, pero puede ser requerida a nivel del estado o gobiernos provinciales para la planificación territorial regional o planificación de la gestión de desastres. Además, puede ser necesitada por constructores o inmobiliarias, aquellos que elaboran grandes infraestructuras como carreteras y líneas ferroviarias, o por personas que desarrollan áreas recreacionales.

El tipo y nivel de detalle de la zonificación y la escala de los mapas depende del propósito para el cual se desarrolla y de su aplicación. Aunque el objetivo debería determinar el tipo y nivel de la zonificación y la escala de los mapas, los recursos económicos pueden ser un gran impedimento. Por ello, la zonificación de la susceptibilidad es menos solicitada que la zonificación de la amenaza, y esta última es mucho menos que la zonificación del riesgo.

La tabla N°1 (Anexo N1), indica unas recomendaciones sobre el tipo y nivel de la zonificación y las escalas de los mapas en función del propósito de la zonificación. La tabla es aplicable a la planificación del uso del suelo en el desarrollo urbano, gestión de la amenaza y riesgo para carreteras y líneas ferroviarias nuevas o existentes.

La tabla N°2 (Anexo N1), define los niveles del IMM y de la zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo, en función de la técnica y otros datos de entrada para el análisis. Es importante relacionar, el nivel de zonificación para el uso requerido, la escala de mapeo, con el nivel de los datos o información de entrada. La continua práctica muestra que debido a la escasez de datos disponibles y las restricciones del costo, los métodos de nivel básico e intermedio con sus datos de entrada, son los mayormente utilizados.

La tabla N°3 (Anexo N1), resume las escalas de los mapas aplicadas al IMM, a la cartografía de susceptibilidad, amenaza y riesgo. El mapa de zonificación de susceptibilidad a MM debe ser preparado a una escala apropiada para la visualización de la información. Sin embargo, la escala debería ser escogida de acuerdo a los objetivos del mapa, pero, la escala de los mapas topográficos disponibles es la que controla generalmente la escala de trabajo.

La elaboración de un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa está basada generalmente en dos principios:

- El pasado es una guía para el futuro, lo cual significa que las áreas donde han ocurrido deslizamientos en el pasado, son susceptibles de experimentar deslizamientos en el futuro.
- Pueden ocurrir deslizamientos en el futuro en áreas con similar topografía, geología y geomorfología, a las áreas, donde se originaron deslizamientos en el pasado.

Los primeros mapas de susceptibilidad a movimientos de terreno fueron elaborados por Brabb en San Mateo Country (California) para el United States Geological Survey (USGS) en 1978; estos consistían en superponer “capas” o factores (litología y pendiente) que influían en la generación de MM. A partir de 1988, se empezó a usar Sistemas de Información Geográfica para la preparación de estos mapas facilitando su elaboración. El mapa de susceptibilidad debería incluir:

- Un mapa IMM, con la localización y área del MM.
- Mapas a la misma escala que muestren las condiciones que pueden generar inestabilidad del terreno. Por ejemplo: la topografía, la geología, las formaciones superficiales, la cobertura vegetal, el uso del suelo, etc.
- Para áreas con potencial a la ocurrencia de deslizamientos superficiales y flujos de escombros, se debe preparar mapas de las formaciones superficiales (coluviales, aluviales, suelos residuales, etc.), sin embargo, estas formaciones tienen una extensión limitada, de modo que se pueden preparar solo en trabajos a escala grandes (1:25.000-1:5000) y de detalle (>1:5000).
- El mapa debe mostrar la topografía y la información catastral así como las clasificaciones de la zonificación susceptibilidad para el área de estudio.

Los mapas de susceptibilidad a escalas más grandes de 1:100.000 requieren un nivel de estudio básico, en el cual la preparación de un inventario de movimientos en masa es una parte esencial y debe contener como atributos la localización, clasificación, volumen, distancia de recorrido, estado de actividad y fecha de ocurrencia según la

disponibilidad de la información, para luego ser entregado a los responsables políticos y público en general.

El IMM es un registro ordenado de la localización y las características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área dada. Este es el segundo elemento más importante en la cartografía de la susceptibilidad. Sin embargo, las características a registrar dependen del interés para el cual este se realice, y en general, pueden representarse en el mapa por polígonos aquellos sitios con movimientos en masa que sean mayores a 5 mm en la escala del mapa o en caso contrario, por puntos.

Para la elaboración del inventario a una escala regional, según el JTC-1 (2008) se debe realizar las siguientes actividades:

- Utilizar fotos aéreas y/o imágenes satelitales, mapeo y un registro histórico. El inventario incluye la localización, la clasificación, volumen (o área) y la fecha de ocurrencia.
- Identificar la relación entre la topografía, geología y geomorfología.
- Representar la información del inventario, sobre una base topográfica que incluya: curvas de nivel, límites de propiedades y poblaciones, cuadrícula cartográfica, vías y otros características importantes como cursos de agua.

Entre las ventajas y desventajas de un IMM se puede mencionar las siguientes (Guzzetti, 2005; Suárez, 1998):

- Ventajas:
 - Puede ser utilizado como elemento para la zonificación de la amenaza.
 - Puede servir como herramienta para la validar zonificaciones de amenaza por otros métodos.
 - Puede ser utilizado en el análisis de frecuencia de deslizamientos.
 - Puede servir para encontrar correlaciones entre lluvias-movimientos en masa, o sismos-movimientos en masa.

- Puede servir para ubicar las zonas con mayor número de movimientos en masa y realizar un análisis de las causas específicas que los generan.
- Desventajas:
 - Los inventarios son intrínsecamente subjetivos.
 - Es muy difícil determinar si el inventario es confiable o si es completo.
 - Los deslizamientos generalmente son aislados y algo pequeños según la escala de estudio.
 - La elaboración de las bases de datos de los inventarios, es un proceso tedioso.
 - Comúnmente no existe una entidad responsable de mantener la base de datos.
 - Frecuentemente la información se debe recolectar en periódicos o por interpretación de fotografías.
 - Un inventario incompleto o poco confiable puede dar como resultado una evaluación errónea de la susceptibilidad, la amenaza o el riesgo. La confiabilidad depende principalmente de la calidad y la abundancia de la información.

El término movimientos en masa (MM) incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

Existen muchas clasificaciones de movimientos en masa (MM), de acuerdo a la necesidad o interés del autor, condiciones geotécnicas, tipo de material o mecanismos de deformación, siendo las clasificaciones de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) actualmente las más reconocidas en el mundo de habla inglesa e hispana (PMA: GCA, 2007).

Varnes (1958 y 1978) emplea como principales criterios de clasificación, el tipo de movimientos y el tipo de material. Por esta razón, los divide en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos y, divide al tipo de material en dos clases: rocas y suelos, subdividiendo a los suelos en detritos y tierra (PMA: GCA, 2007). Adiciona, un tipo denominado “complejo”, que identifica aquellos movimientos que se componen de dos o más tipos de los principales antes mencionados (Varnes, 1978 en Schuster y Krizer, Ed. (1978)).

En este trabajo se considera la clasificación de Varnes (1978) expuesta en la tabla N°4 (Anexo N1) y las definiciones del PMA: GCA (2007) para los movimientos en masa identificados. Otros parámetros que caracterizan los movimientos en masa son: el estado de actividad, la velocidad del movimiento (Tabla N°5, Anexo N1), la profundidad (Tabla N°6, Anexo N1), el volumen (Tabla N°7, Anexo1) y el espesor de la masa movida. La actividad de movimiento es identificada de acuerdo a la clasificación de Cruden y Varnes (1996) en: activo, reactivado, suspendido, inactivo, latente, estabilizado y relictos.

Además de los MM de la clasificación de Varnes (1978), en el país se identifican dos tipos de MM: derrumbes y reptaciones que se incluyen en este trabajo. El término derrumbe corresponde a deslizamientos o caídas de roca (Pazos y Vinueza, 1990) y el término reptación a aquellos movimientos de terreno lentos en donde no se diferencia una superficie de falla (PMA: GCA, 2007). Hungr et al. (2001) hace una revisión en la clasificación del tipo flujo de Varnes (1978) y adiciona el término avalancha, que es un flujo no canalizado de detritos o rocas saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápidos.

La validación de los resultados es un aspecto importante en la cartografía de la susceptibilidad a movimientos en masa, siendo necesario separar el mapa de inventarios del de calibración. La validación se puede utilizar también para elegir sistemáticamente el mejor algoritmo de susceptibilidad. Cada mapa se valida mediante la comparación con un inventario y se acepta aquella combinación que resulta más adecuada (PMA: GCA, 2007).

1.3.2 MARCO METODOLÓGICO

Existe una variedad de metodologías para la evaluación de la susceptibilidad, pero en general la mayoría de ellas se relaciona en la determinación de los factores que influyen en la generación de MM. Estos métodos pueden variar según los siguientes tres factores (JCT-1, 2008):

- El propósito de la zonificación (información, planificación, pre-diseño, diseño).
- El nivel de zonificación (básico, intermedio y a detalle).
- La escala de zonificación.

En la tabla N°8 (Anexo N1), Soeters y VanWesten (1996) en PMA: GCA (2007) presentan una revisión de las técnicas de análisis dentro de los mapas de susceptibilidad y amenaza de acuerdo a su escala; a continuación se realiza una corta descripción de los mismos:

a) Método de Inventario de Movimientos en Masa.- Este método requiere la elaboración de mapas de ocurrencia de movimientos en masa, los cuales deben realizarse por separado para cada tipo de movimiento (caídas de rocas, deslizamientos, flujos de detritos, etc.). Los mapas de inventario se usan frecuentemente como mapas de amenazas, pues muestran la distribución y magnitud de eventos recientes; aunque su uso es limitado, ya que contiene información de un determinado período de tiempo. Este método analiza la distribución, actividad y densidad (porcentaje por área total o número de deslizamientos por área total).

b) Métodos Heurísticos.- Los métodos heurísticos se basan en el estudio conceptual de los procesos de ocurrencia de los MM y requiere del análisis por parte de profesionales con conocimiento y experiencia (Suárez, 1998).

b1) Método Geomorfológico.- Siendo un método heurístico, se basa en la interpretación subjetiva del mapa por un geocientífico experimentado. Se deben identificar los tipos de unidades del terreno que son proclives a desarrollar movimientos en masa. La escala de susceptibilidad siempre es subjetiva. La clave de este método es la experiencia del geomorfólogo.

b2) Método de Ponderación de Parámetros.- También es un método heurístico en el cual se identifican algunos parámetros relevantes para la generación de movimientos en masa en la zona de estudio, se les asignan valores en forma subjetiva de acuerdo a su importancia y se combinan utilizando un algoritmo

diseñado. Este método igualmente requiere un experto familiarizado con el área de estudio quien escoge los parámetros a ponderar y les asigna un peso.

c) Método Estadístico.- Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicando los modelos estadísticos bivariantes y multivariantes. Generalmente se refiere al cálculo de la densidad en los deslizamientos, combinando factores que generaron MM en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística; así, hace predicciones cuantitativas para áreas sin MM pero con condiciones geológicas y climáticas similares.

c1) Método Estadístico Bivariado.- Es el método más común para obtener una estimación cuantitativa y objetiva de la susceptibilidad, se basa en asignar valores por parte de un especialista, a las distintas variables de predicción y combinarlos en una clasificación de susceptibilidad, para esto se obtienen las densidades reales de cada clase de movimientos en masa a partir de cada mapa de inventario. El mapa de susceptibilidad resultante puede utilizarse para estimar la ocurrencia de futuros movimientos en masa.

c2) Método Estadístico Multivariado.- Este método establece una correlación entre un grupo de variables de predicción y la densidad de movimientos en masa de las unidades de terreno.

d) Método Determinístico.- Se basa en la aplicación del método de equilibrio límite (ecuación de Talud Infinito) para determinar el equilibrio de una sección superficial de ladera o talud asumiendo propiedades uniformes. En este método se determina el factor de seguridad, que es el cociente entre las fuerzas de resistencia y las fuerzas de empuje.

El método usado en este trabajo fue el método Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados (Carrara et al., 1995 en INGEMMET (2010)) o Ponderación de Parámetros (PMA: GCA, 2007), descrito por INGEOMINAS (2001) como un método explícito empírico. Este método permite la regionalización o *estudio a escala regional*, es adecuado para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos

(Carrara et al., 1995 en SGC, 2012), implica un bajo presupuesto económico y permite un conocimiento general de la susceptibilidad por movimientos en masa. El limitante de este método es que introduce un grado de subjetividad, dependiendo de la experiencia del experto y es difícil comparar documentos elaborados por varios autores.

El método Heurístico de Ponderación de Parámetros consiste en la combinación de factores de análisis valorados en función de su influencia relativa en la inestabilidad, expresados cuantitativamente con el peso de ponderación para cada uno de ellos en el potencial de generar MM (SGC, 2012), mediante un algoritmo lineal que se puede desarrollar en un sistema de información geográfico (ArcGis). Estos puntajes varían según el caso, y depende mucho de la experiencia del especialista para asignar el valor a cada factor.

Para determinar la ponderación del factor, se utiliza la Evaluación Multicriterio (EMC), basada en el Método de Jerarquización Analítica (MJA) desarrollada por Thomas L. Saaty durante los años setentas (Figura N°1); con ello, Saaty buscaba elaborar una manera formal de evaluar y seleccionar las alternativas, que tuviera las características de ser sólido en sus fundamentos matemáticos, útil en la toma de decisiones y sencillo en su aplicación (Sánchez, 2003)

El MJA, consiste en realizar una comparación por pares de los factores que favorecen la generación de los MM, siendo necesario que un especialista de un valor considerando la importancia de un factor respecto a otro, tomando en cuenta los criterios de la tabla N°9 (Anexo N1).

Una vez que se tiene las ponderaciones, estos pueden ser tratados en un sistema de información geográfica con sus herramientas Spatial Analyst y 3D Analyst para el análisis de la susceptibilidad a través del algoritmo de la ecuación (1):

$$SMM = W_1 (F_1) + W_2 (F_2) + W_3 (F_3) + W_4 (F_4) + \dots + E_n (F_{in}) / n \quad (1)$$

Donde:

SMM: Susceptibilidad a los Movimientos en Masa.

Fi: Factor de análisis.

Wi: Ponderación del factor.

n: Número de factores.

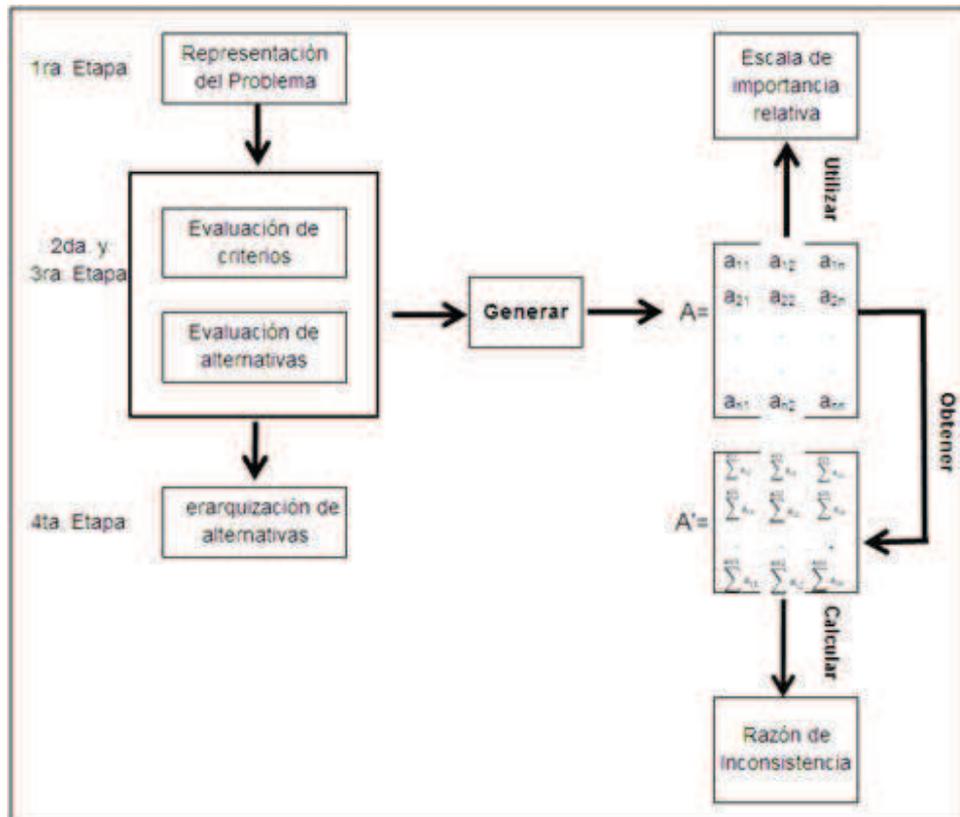


Figura N°1. Procedimiento para realizar la jerarquización analítica (Sánchez, 2003)

Para la EMC de los factores, se considera el procedimiento descrito en Sánchez (2003). Se construye una matriz A (Figura N°2), que transforma la evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineares. A cada elemento de la matriz se le asigna un valor que representa la importancia relativa del factor de su fila con respecto al de su columna en cuanto a posible inestabilidad.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Figura N°2. Matriz para la comparación de factores (Sánchez, 2003)

Se debe considerar que las calificaciones en la diagonal principal de la matriz siempre será 1, porque, al compararse un elemento por si mismo mantiene igual importancia.

Una vez llena la matriz A con los respectivos valores, se debe estimar los pesos ponderados de los factores (W). Primero, se normaliza la matriz A; obteniéndose \mathbf{A}' (por columna, cada calificación de la matriz A se divide entre el total de su respectiva columna)

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \end{pmatrix}$$

Figura N°3. Matriz normalizada para la comparación de factores (Sánchez, 2003)

Después, se calcula el promedio de cada renglón de la matriz \mathbf{A}' , obteniendo la matriz \mathbf{W} de los pesos ponderados.

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n a_{i1}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n a_{i2}}{n} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^n a_{in}}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n a_{i1}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n a_{i2}}{n} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^n a_{in}}{n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\sum_{i=1}^n a_{i1}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n a_{i2}}{n} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^n a_{in}}{n} \end{pmatrix}$$

Figura N°4. Matriz de pesos ponderados (Sánchez, 2003)

Al determinar la importancia relativa entre los factores, el grado de inconsistencia en el que se incurre al asignar las calificaciones es la razón de inconsistencia \mathbf{RI} , que indica el grado de incoherencia que se comete al calificar la importancia relativa de los criterios y alternativas de un problema. La RI se calcula mediante la ecuación (2):

$$RI = \frac{IC}{CA} \quad (2)$$

Donde **IC** es el índice de consistencia y **CA** es la consistencia aleatoria. El cálculo de IC se obtiene mediante la ecuación (3):

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$\lambda_{\text{máx}}$: es el valor característico promedio

n: es el tamaño de la matriz

Para calcular $\lambda_{\text{máx}}$ se multiplica AW , obteniendo una estimación de $\lambda_{\text{máx}}W$, es decir, $AW = \lambda_{\text{máx}}W$. A continuación se divide cada componente de $\lambda_{\text{máx}}W$ por la componente correspondiente de W , obteniendo $\lambda_{\text{máx}}$. Después se promedian las estimaciones de $\lambda_{\text{máx}}$ para encontrar una estimación promedio total de $\lambda_{\text{máx}}$. y con esta estimación se calcula el IC.

Saaty (1990) recomienda los valores de CA expuestos en la tabla N°10 (Anexo N1), de acuerdo al tamaño n de la matriz, que son el número de factores o alternativas analizadas.

Finalmente, se calcula la razón de inconsistencia RI dividiendo el índice de consistencia IC para la consistencia aleatoria CA. Si la razón es considerablemente mayor a un 10%, se debe revisar las calificaciones asignadas.

1.4 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Ecuador está ubicado en la parte noroeste de América del Sur, tiene una extensión de 283.561 km² incluidas las Islas Galápagos las cuales están ubicadas a 1000 kilómetros de distancia de las costas ecuatorianas en el Océano Pacífico. El Ecuador limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú, y al oeste con el Océano Pacífico. Según datos del INEC (2014), el Ecuador tiene 16'020.700 habitantes, siendo el país más densamente poblado en Sudamérica, con 54.49 hab/km².

El país está atravesado de norte a sur por la Cordillera de los Andes que lo divide en tres unidades fisiográficas, con formas de relieve y geología diferentes. La Región Costa al oeste está conformada de cordilleras costaneras que ocupan el lado occidental, con alturas menores a los 800 m.s.n.m. y de una llanura costanera menor a los 300 m.s.n.m. La Región Andina está conformada por las Cordilleras Occidental y Real y entre ellas el Valle Interandino, posee una topografía irregular con alturas máximas de 6310 m. que corresponde al Nevado Chimborazo. La Región Amazónica está conformada de una Zona Subandina con pendientes irregulares que se extiende de norte a sur al pie del lado oriental de la Cordillera Real. Las Cordilleras de Cutucú y del Cóndor son las más altas de esta región, en la parte sur, con alturas máximas de 1000m.; hacia el oeste se hallan tierras bajas con una altitud menor a los 300 m.s.n.m. formando extensas llanuras aluviales. El territorio ecuatoriano incluye las Islas Galápagos, pero en este estudio únicamente se considera la parte continental.

El país cuenta con un clima tropical y húmedo, tanto en la Región Costa como en la Región Oriente, la temperatura oscila entre los 20°C y 33°C; en la Región Sierra oscila entre los 3°C y 26°C debido a la variabilidad de altura de la región. La estación húmeda se extiende entre diciembre y mayo en la Costa, entre noviembre y abril en la Sierra y de enero a septiembre en la Amazonía.

La geología de Ecuador está controlada por una geodinámica bastante compleja (Figura N°5). La convergencia oblicua E-W entre las placas Nazca y Sudamericana a una velocidad estimada de 70mm/a - 57mm/a (Ego et al., 1996; Kellogg & Vega, 1995; Trenkamp, 2002), favorece el desprendimiento de una microplaca denominada Bloque Norandino (NAB) en el noroccidente de la placa Sudamericana, a una velocidad aproximada de 8mm/año (Nocquet et al., 2010) con dirección N55°E y N45°E (Kellogg & Bonini, 1985). El despegue del NAB genera unos segmentos de fallas activas originando una estructura mayor llamada Chingual – Cosanga – Pallatanga - Puná (CCPP) (Alvarado, 2012) que atraviesa todo el país y se extiende hacia la Cordillera Oriental de Colombia.

La cordillera asísmica de Carnegie ubicada sobre la placa Nazca, es otro factor influyente en la geodinámica del país. Su origen en el Hot Spot Galápagos (Lonsdale, 1978) permite un movimiento en dirección E-W hasta colisionar con la placa Sudamericana, generando la acumulación de mucha energía en la zona de contacto que influye en la actividad sísmica, volcánica y tectónica en los Andes.

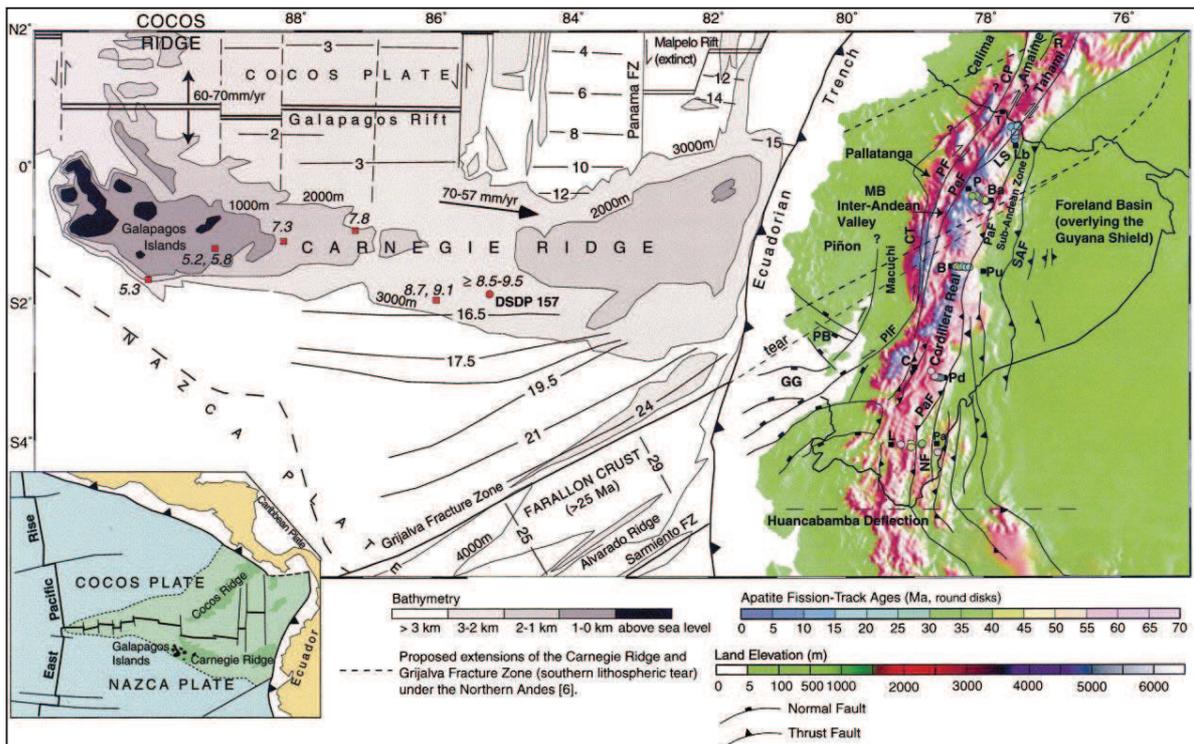


Figura N°5. Marco geodinámico del Ecuador. Abreviaciones: CP: Falla Cauca; CT: Zona de Falla Chimbo-Toachi; GG: Golfo de Guayaquil; LS: Falla La Sofía; MB: Cuenca de Manabí; NF: Falla Nangaritzá; PB: Cuenca Progreso; PaF: Falla Palanda; PeF: Falla Peltetec; PiF: Falla Pallatanga; R: Falla Romeral; SAF: Falla Subandina. (Spikings et al., 2001)

La convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana genera una continua liberación de energía sísmica en el territorio continental y costero fuera del margen costero ecuatoriano. Los sistemas de fallas activos, Pallatanga, Cosanga, Chingual, Quito, Saquisilí-Poaló-Yambo, El Ángel, etc., originan sismos en el país que causan movimientos en masa con pérdidas económicas y humanas (Riobamba-Ambato-Latacunga, 1698; Riobamba, 1797; Imbabura, 1868; Manabí, 1942, Pelileo, 1949; El Reventador, 1987; Cotopaxi, 1996; etc.) entre otros ejemplos.

El estudio de Idrovo (2006), sobre la relación entre los movimientos en masa y la sismicidad, identificó 70 sismos generadores de algún tipo de estos movimientos. En su análisis determina que los deslizamientos y/o caídas son el grupo más común en el Ecuador, seguidos de las Grietas, los Flujos y finalmente los Esparcimientos Laterales, abarcando el 51%, 31%, 14% y 4% respectivamente, y que las mínimas magnitudes (Ms) que han originado estos cuatro tipos de movimientos son 3.9; 3.9; 5.0 y 5.7 respectivamente.

Algunos sitios de la Región Costa presentaron inestabilidad de terrenos desencadenados por sismos en el pasado. El terremoto de Portoviejo el 3 de mayo de 1896 ocasionó derrumbes en el Cerro de Hojas y deslizamientos en las riberas del río Portoviejo; el terremoto del 13 de mayo de 1942 en Manabí, causó derrumbes en las cuencas de los ríos Mosquito y Grande, un gran deslizamiento en el Cerro del Cautivo que represó el río Chone y produjo deslaves en la vía Chone-Calcuta (Archivos de Sismicidad Histórica, José Egred, IG-EPN en Plaza, 1998); el terremoto de 04/08/1998 en Bahía de Caráquez, causó deslizamientos y grietas principalmente en las laderas que bordean la ciudad de Bahía, en la carretera San Vicente – Canoa y la reactivación del deslizamiento en el Cerro Montecristi (Segovia, 2001).

En las regiones Sierra y Oriente, la sismicidad también ha desencadenado importantes movimientos en masa. El terremoto del 4 de febrero de 1797 en Riobamba, causó deslizamiento de tierra en laderas, taludes de caminos y ríos, fueron tantos que prácticamente cambiaron la topografía del terreno (Egred, 2004 en Alvarado et al., 2004). El terremoto del 16 de agosto de 1868 en la provincia de Imbabura, destruyó varios pueblos, especialmente en Cotacachi, Ibarra, Otavalo y otras comunidades; así mismo, varios movimientos en masa de mediana y pequeña magnitud y algunos voluminosos junto a grietas profundas y extensas se originaron (Egred, s/f). En el terremoto del 5 de marzo de 1987 en el sector volcán El Reventador, los movimientos de tierra junto a las inundaciones fueron los responsables de la mayoría de muertes y destrucción generadas. Las pérdidas totales fueron estimadas en cerca de 800 millones de dólares (Hall, 2000).

El Ecuador por su ubicación geográfica también se ve influenciado por fuertes precipitaciones, especialmente durante el fenómeno de El Niño (ENSO: Oscilación del Sur El Niño), que genera anomalías globales o regionales en el clima, tales como lluvias o sequías, y consecuentes tipos de eventos (Zevallos, 1999). Uno de los efectos de este fenómeno son los movimientos en masa, que significaron un gran problema durante El Niño de 1982-1983 y 1997-1998, en las provincias de la Costa y algunas de la región Sierra. En general, durante la época invernal en años Niño, este fenómeno induce el incremento de las precipitaciones provocando la saturación de las masas de rocas muy fracturadas, de estructura porosa, permeables o meteorizadas.

Kojan (1983) menciona que fueron varios los deslizamientos ocurridos en las ciudades y vías relacionados al Niño (1982-1983), por ejemplo se registraron MM en las ciudades de Guayaquil, Mapasingue, Durán, Quito, y en las carreteras Bucay-Pallatanga, Huigra-Chunchi, Occidental en Quito; que causaron grandes daños en la infraestructura.

En El Niño (1997-1998), las ciudades más afectadas fueron, Esmeraldas, Santa Elena y Bahía de Caráquez. Durante este fenómeno, ocurrieron 389 desastres relacionados al clima, más de tres y media veces el número de desastres promedio en año No-Niño. De estos, 103 deslizamientos fueron inducidos por las lluvias y las provincias más afectadas fueron: Manabí con 103 muertes ocasionadas por este fenómeno, seguidas de Los Ríos (51); Loja (26); Esmeraldas (24), y Guayas (23). Las pérdidas económicas totales producidas por El Niño 97-98, superan los mil millones en dólares (Zevallos, 1999).

CAPÍTULO 2

EL MAPA INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA (MIMM)

En el Ecuador no existe un registro ordenado y sistemático de la localización y caracterización de los movimientos en masa ocurridos. Sin embargo, algunos ensayos con características y objetivos diferentes se han realizado, (Pazos y Vinueza, 1990; Idrovo, 2006; INIGEMM, 2013).

Singer et al. (1983) en el *Inventario Nacional de Riesgos Geológicos* de Venezuela, utiliza como atributos de su base inventario: la localización, la naturaleza del fenómeno y los efectos. Chang y Alva (1991) en el documento *DESLIZAMIENTOS Y ALUVIONES EN EL PERÚ*, utilizan como atributos el nombre del artículo o reporte técnico, nombre del autor o autores, la ubicación por coordenadas geográficas, la altitud del fenómeno y la fuente bibliográfica. En el Inventario del portal web del Servicio Geológico Colombiano, en lo que respecta al Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), se encuentra una base de datos con la división política y el tipo de movimiento como atributos.

2.1 METODOLOGÍA DEL INVENTARIO

El inventario realizado en este trabajo, comprende dos categorías:

1. Inventario de Movimientos en Masa Cartográfico (IMMC).
2. Inventario de Movimientos en Masa Descriptivo (IMMD).

La información utilizada en el inventario cartográfico procede de inventarios preliminares, mapas de movimientos en masa, informes expeditivos y tesis de grado. La información del inventario descriptivo procede del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar), del inventario hemerográfico de Pazos y Vinueza (1990), el documento de Peltre (1999), del estudio de EPN-PLANTEL (2005), y del registro mensual de eventos adversos en el sector del transporte entre los años 2011-2013 de DIPLASE-MTOP. Esta información se compila en dos bases de datos individuales.

Los atributos de las dos bases de datos fueron escogidos considerando los campos comunes identificados en las fuentes de información original. Los atributos comunes en ambas fuentes son: ID, código, tipología, causa, localidad, provincia y fuente.

En el IMMC los atributos adicionales son: coordenadas UTM, área y estado de actividad; y en el IMMD los atributos adicionales son; fecha de ocurrencia o compilación, y daños.

ID.- Corresponde a un número de identificación de cada evento.

CÓDIGO.- Corresponde a la notación, según la persona que haya levantado la información del evento.

UTM-X, UTM-Y.- Corresponde a las coordenadas UTM donde ocurrió el MM.

TIPOLOGÍA.- Corresponde al tipo de MM de acuerdo a la clasificación de Varnes (1978).

ÁREA (km²).- Superficie afectada por los MM.

ESTADO DE ACTIVIDAD.- Describe lo que se conoce con relación al desplazamiento en el tiempo del MM.

CAUSA.- Lo que se consideró por la fuente original como el motivo u origen en el proceso de generación de un MM.

FECHA.- Corresponde a la fecha en que fue registrado el evento en el caso de los datos que provienen de DesInventar y en la que se generó para las demás fuentes.

DAÑOS.- Corresponde a los efectos, perjuicios o pérdidas materiales y humanas que el MM provocó, según la fuente original.

LOCALIDAD.- Corresponde al nombre del lugar donde ocurrió el MM.

PROVINCIA.- Corresponde al nombre de la provincia donde ocurrió el MM.

FUENTE.- Corresponde al nombre del documento del cual proviene la información.

2.1.1 INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA CARTOGRÁFICO (IMMC)

El atributo principal de este inventario es la ubicación geográfica de los MM. Las fuentes fueron contrastadas entre sí, evitando repeticiones y depurando la información. La base de datos obtenida denominada IMMC, se encuentra en el Anexo Digital N2, en formato Excel. En base a esta información y utilizando el sistema de

información geográfico ArcGis, se elabora el Mapa Inventario de Movimientos en Masa del Ecuador, representado en la figura N°6.

A continuación se describe las características principales de cada una de las fuentes de información:

- **Hojas Geológicas.**- Incluye las hojas geológicas elaboradas por las siguientes instituciones: el Servicio Nacional de Geología y Minería (S.N.G.M.), la Dirección General de Geología y Minas (D.G.G.M.), el Instituto Ecuatoriano de Minería (INEMIN) y la Corporación de Desarrollo Geológico Minero (CODIGEM) para el período 1966 a 1998 y la Dirección Nacional de Geología (DINAGE) durante el período 2000 – 2010. Estas hojas geológicas se encuentran a escala 1:100.000 y 1:50.000 y cubren cerca del 54% del territorio nacional.

Los MM encontrados en esta fuente fueron digitalizados con ayuda del programa ArcGis 9.3. El punto centroide del polígono es la coordenada utm_x y utm_y, De esta base se identificaron 399 MM denominados derrumbes.

- **Catálogo Cartográfico de Pazos y Vinuesa, (1990).**-Esta base identificó y localizó 1772 movimientos de terreno en el Callejón Interandino, de los cuales 1294 permiten una localización aceptablemente precisa (ubicación geográfica) y en los restantes la localización es solamente aproximada (ubicación descriptiva) (Pazos y Vinuesa, 1990). La primera parte de este catálogo recopila la información cartográfica de varios estudios realizados por diferentes instituciones y organismos nacionales (INECEL, INEMIN, EPN, UCE).

De esta fuente se han seleccionado 895 eventos una vez descartados los que se encuentran repetidos en las Hojas Geológicas. Después se depuraron 67 MM repetitivos quedando finalmente seleccionados para el actual trabajo 828 MM.

- **Proyecto de Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Río Paute – PRECUPA (Almeida et al, 1996).**- Estudio de cooperación realizado entre varias instituciones ecuatorianas y el Cuerpo Suizo de Socorro (CSS) que cubrió un área de 3700 km², localizada en la zona austral del país (específicamente en los cantones de Biblián, Déleg, Azogues, Paute, Gualaceo, Cuenca y Sinincay). En

este proyecto se elaboraron 7 Mapas de Fenómenos por Inestabilidad del Terreno y sus correspondientes Mapas de Peligrosidad por Fenómenos de Inestabilidad del Terreno, a escala 1:25.000 (Almeida et al 1996).

De esta fuente se incluyen en el inventario 138 MM denominados deslizamientos activos y latentes que fueron digitalizados en ArcGis 9.3, y cuya coordenada UTM es el centroide del polígono. Además se inventariaron 367 derrumbes puntuales que en los documentos constan como un punto.

- **Registro de movimientos en masa de Idrovo, (2006).**- Esta fuente contiene información de MM generados por sismos ocurridos durante el período 1541 a 2004. El estudio identifica 70 sismos que han disparado uno o varios tipos de movimientos en masa en uno o varios eventos en el territorio continental ecuatoriano, registrando la localización en coordenadas UTM y el tipo del movimiento en masa (Idrovo, 2006).

En esta fuente se han identificado 358 datos cartográficos, de los cuales 132 pertenecen a grietas que no son consideradas en este trabajo. De los restantes 226 datos, se identificaron 58 movimientos complejos, 12 flujos (f), 144 movimientos identificados como deslizamientos y/o caídas (D/C) denominados derrumbes por Pazos y Vinuesa (1990) y finalmente 12 esparcimientos laterales (EI).

- **INGEMMET.**- El Instituto Geológico Minero Metalúrgico del Perú en su interés por desarrollar investigaciones en el área ambiental y de riesgos geológicos realizó estudios sobre movimientos en masa en el año 2008 en cooperación con el DINAGE, actual INIGEMM en la cuenca de Catamayo - Chira y la zona de Puyango – Tumbes en las provincias de El Oro y Loja (Com. Pers. Ing. Guillermo Aguilera).

De esta base se han identificado y utilizado 543 MM ubicados en el Ecuador.

- **INIGEMM (CIGMA).**- Varias informes técnicos y reconocimientos expeditivos realizados por CODIGEM, DINAGE y el actual INIGEMM como parte de sus actividades institucionales, han sido incluidos en este inventario. El CIGMA es el

Centro de Información Geológico, Minero y Ambiental del INIGEMM que recopila estos documentos. Aquí se revisó la información de 103 informes elaborados entre los años 1985 y 2013, para determinar la localización y el tipo de MM.

De esta fuente se incluye en el inventario 913 MM a nivel nacional.

- **Tesis de Grado.**- Se revisaron 17 proyectos de titulación de las universidades (EPN, UCE y UNL), de los cuales se recopilaron 533 MM.

2.1.1.1 RESULTADOS

La base de datos elaborada está compuesta de 3947 MM. En la figura N°6 se visualiza que la mayoría de los MM se ubican en la Región Sierra (Cordillera Occidental y Real), siendo escasos en la Región Costa y Oriente. La ausencia de MM en estas regiones refleja el interés de las fuentes consultadas (Pazos y Vinueza, 1990; Almeida et al, 1996 e Idrovo, 2006) tal como fue señalado en INIGEMM (2013).

Como se muestra en varios estudios (Pazos y Vinueza, 1990; D'Ercole y Trujillo, 2003; INIGEMM, 2011), la región Sierra presenta condiciones de relieve, pendiente, sismicidad, uso del suelo y actividades antrópicas favorables para una mayor susceptibilidad por movimientos en masa. Así, varios de los movimientos en masa importantes por su tamaño e impacto han ocurrido en esta región del país (INIGEMM, 2013).

En lo que respecta a la *distribución espacial* (Figura N°7), en la Región Sierra, la provincia con el mayor porcentaje de movimientos en masa registrados es la de Loja con el 24%, seguida de las provincias ubicadas al centro-sur (Chimborazo, Cañar y Azuay) con el 37% y de las provincias del centro-norte (Bolívar, Tungurahua, Cotopaxi, Pichincha, Imbabura y Carchi) con el 20%. En general, únicamente en esta región se concentra el 80% del total de los movimientos inventariados. La Región Costa y Oriente conjuntamente poseen el 20% de MM.

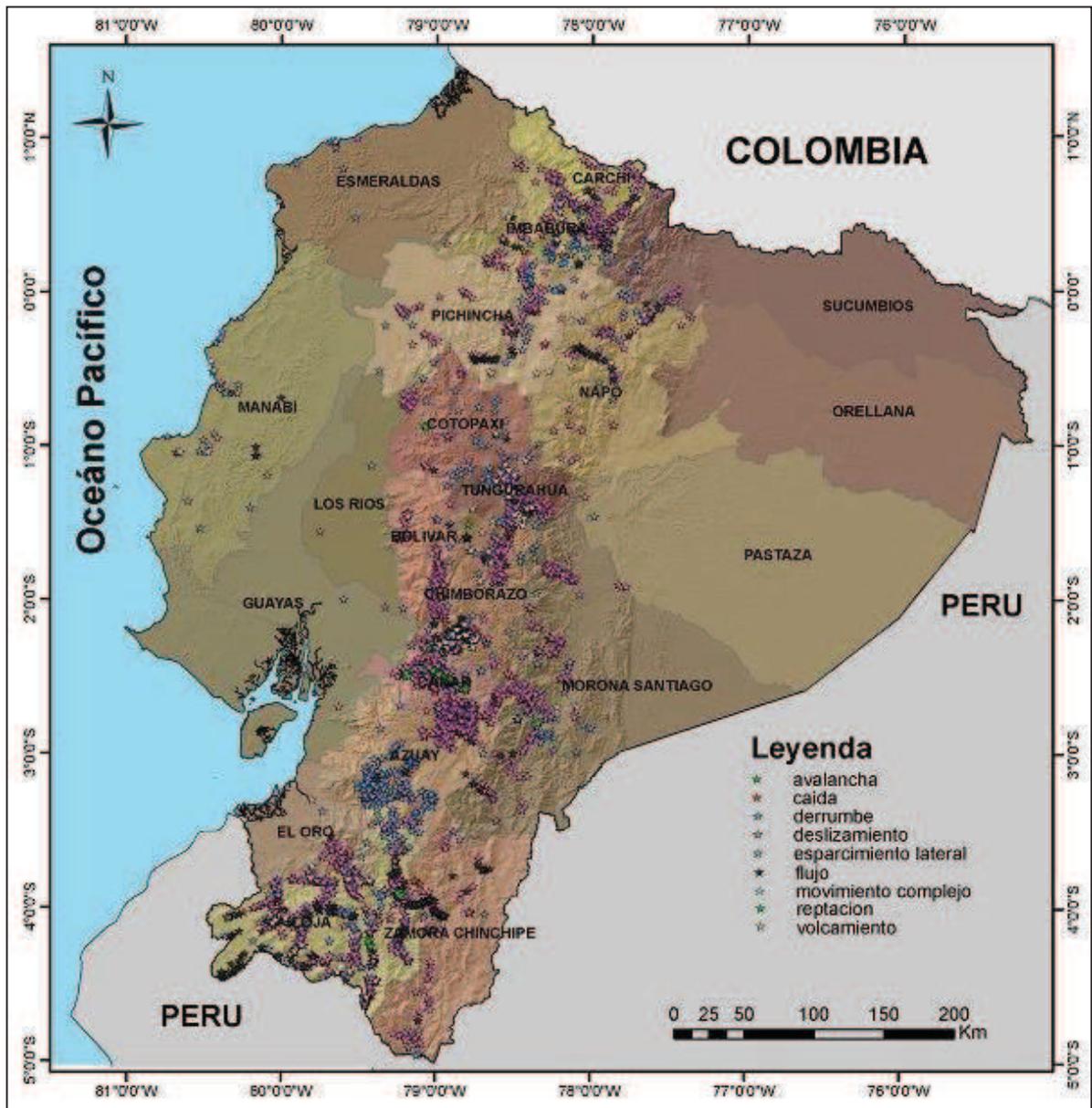


Figura N°6. Mapa Inventario de Movimientos en Masa del Ecuador.

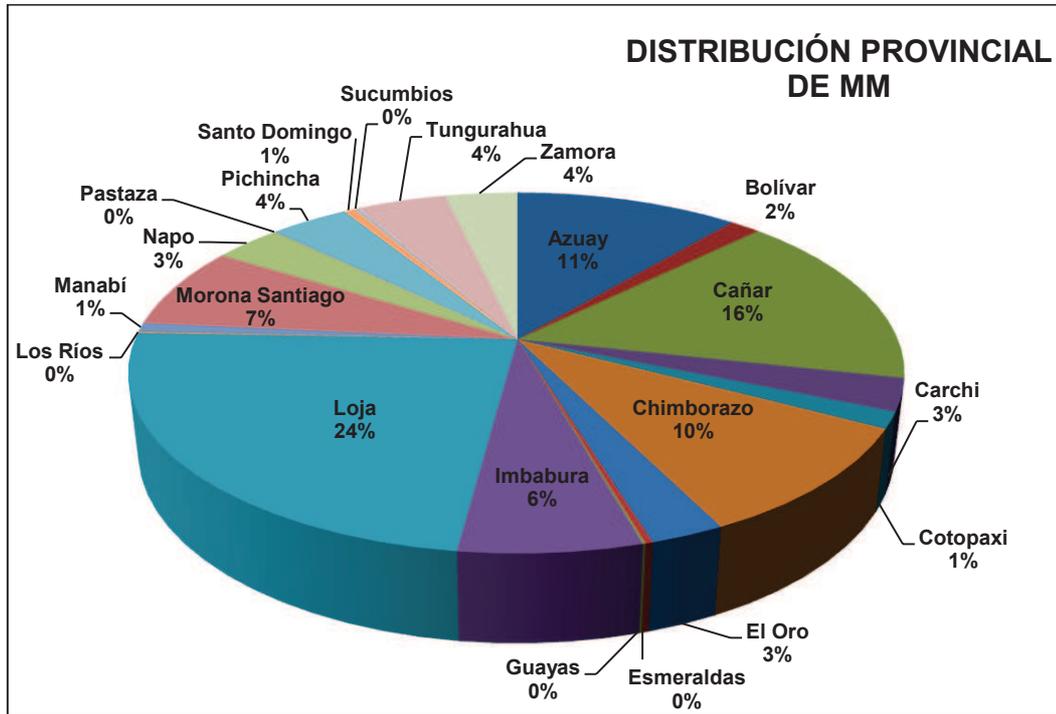


Figura N°7. Distribución de MM (%) a nivel provincial (IMMC)

El IMMC, permite observar que el tipo más común de MM (Figura N°8), son los deslizamientos que representan el 57% de los MM inventariados, (ejemplo de estos son los Movimientos en Masa del Reventador, 1987; el Deslizamiento del Río Pisque, 1990; el Deslizamiento de La Josefina, 1993; el Deslizamiento de Nambija, 1993; el Deslizamiento de Guasuntos, 2000, entre otros); seguidos por los derrumbes (28%), los flujos (8%), las caídas (3%), los movimientos complejos (2%) y los vuelcos, propagaciones laterales y reptaciones que en conjunto suman 3%.

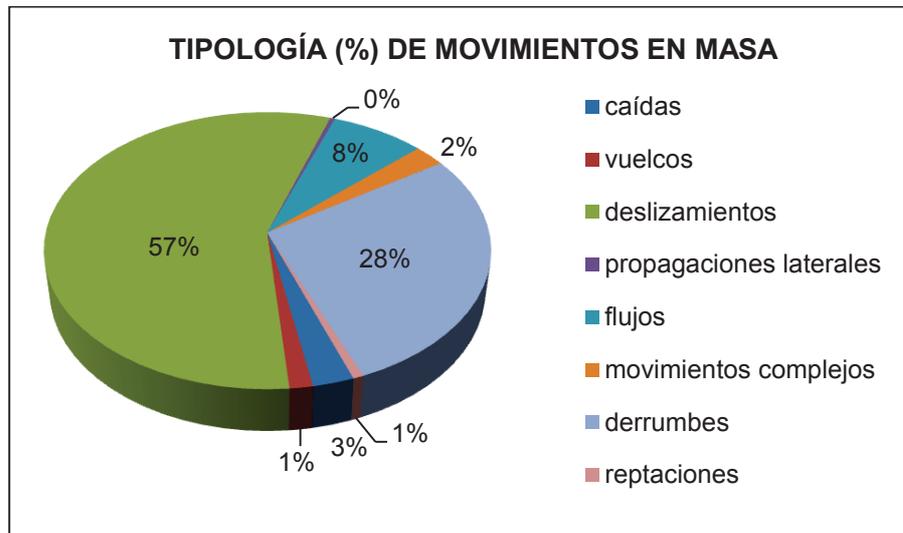


Figura N°8. Tipos de movimientos en masa (%) (IMMC)

Con respecto al *área inestable* (Figura N°9), se han obtenido 1959 datos de movimientos con esta información, de ellos casi el 25% tienen áreas menores a 0.1 km²; el 18.65% representan áreas entre 0.1 km² y 1 km² (Deslizamiento del Río Pisque, 1990; La Josefina, 1993); el 6% tienen áreas entre 1 y 10 km² (Deslizamiento de Cacha-Chimborazo, 1797; Deslizamiento del Tambo, s/f) y, el 0.3% representa áreas mayores a 10km² (Movimientos en Masa del Reventador, 1987); sin embargo el 50.37% de MM no posee esta información, lo que no permite evaluar de forma optima esta característica de los MM.

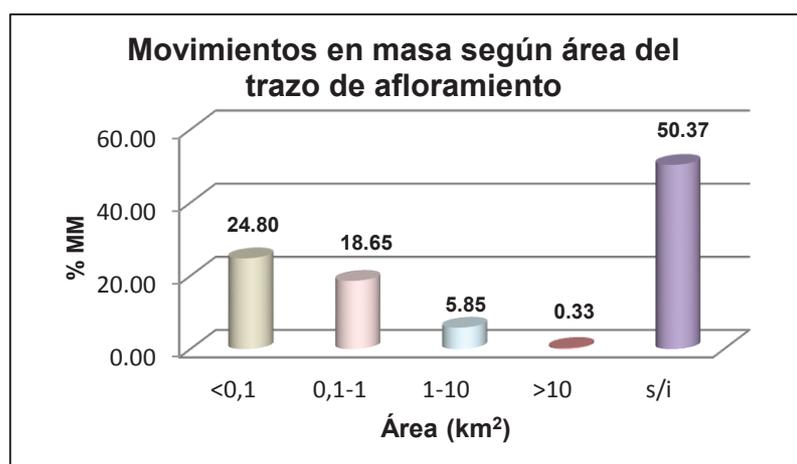


Figura N°9. Relación: Porcentaje de MM vs Área (IMMC)

Respecto al *estado de actividad*, se recopilaron 1596 MM con esta información, lo que representa el 40% del inventario (Figura N°10); 929 MM son activos, 338 MM son latentes y 166 MM son relictos, siendo los tres estados de actividad predominantes y únicamente 44 MM se encuentran inactivos según Cruden y Varnes (1996).

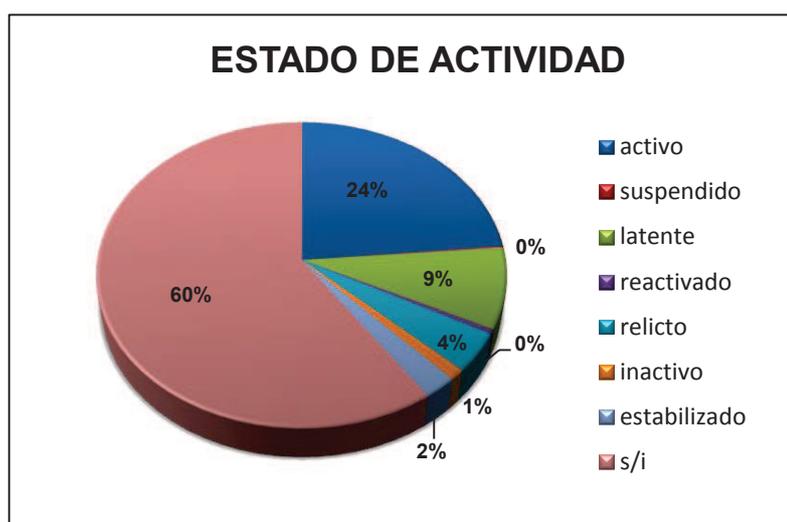


Figura N°10. Estado de actividad de MM (%) (IMMC)

Las *causas* más comunes para la generación de MM corresponden a los siguientes grupos:

- ✓ *Lluvias* (precipitación, agua infiltrada, saturación de agua)
- ✓ *Sismos*
- ✓ *Naturaleza del material* (calidad, discontinuidades, fracturación, litología, meteorización)
- ✓ *Actividad Antrópica* (construcción de vías, uso inadecuado del suelo, minería)

Cada uno de estos grupos representan el 15.02%, 5.73%, 3.52% y 1.47% respectivamente; concluyendo de acuerdo a estos valores que las lluvias y sismos son los mayores generadores de movimientos en masa en el país tal como lo mencionó Marín L. et al. (1997) y Egred (inédito) en Plaza (1998). Sin embargo, el 74.26% de los MM no tienen registro de esta información.

En general, los resultados sobre ubicación, tipología y área, de esta base de datos cartográficos concuerdan con los obtenidos por INIGEMM (2013); mientras que con el

estudio de Pazos y Vinueza (1990), no se puede realizar una comparación debido a la diferencia de período de tiempo y área analizados.

2.1.2 INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA DESCRIPTIVO (IMMD)

La principal característica de este inventario es la fecha de ocurrencia o de registro de los MM. Este tipo de inventario no puede ser utilizado para la validación de estudios de susceptibilidad, siendo elaborado únicamente con el propósito de realizar un análisis temporal para el período 1900-2013. Esta base de datos se encuentra en formato Excel, en el Anexo Digital N3.

A continuación se presenta una descripción de las características principales de las fuentes:

- **DesInventar.-** Sistema de información que permite la adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres de pequeños, medianos y grandes impactos, con base en datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones en nueve países de América Latina entre ellos Ecuador. Esta base está a cargo de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgo y contiene información de los eventos ocurridos en el país desde el año 1970 hasta el día de hoy. Las fuentes hemerográficas de este inventario son los periódicos: El COMERCIO y HOY de Quito, El Universo y Expreso de Guayaquil y las fuentes oficiales de los reportes de las Juntas Provinciales de la Defensa Civil.

De esta fuente se incluyen 2606 datos de MM, catalogados como deslizamientos, refiriéndose así, a todos aquellos eventos reportados como derrumbes, asentamientos, corrimientos, movimientos en masas, reptaciones, desplazamientos, hundimientos, colapsos, caídas de roca, desprendimientos (lento o rápido) sobre vertientes o laderas, de masas de suelo o de rocas, erosión, etc. (Zevallos, 1999).

- **Accidentes Morfoclimáticos en Peltre.-** El estudio sobre QUEBRADAS Y RIESGOS NATURALES EN QUITO, PERIODO 1900-1988, elaborado por Peltre (1989), tiene una base de 517 datos de accidentes morfoclimáticos registrados en

Quito, es decir, inundaciones, aluviones, hundimientos y derrumbes, con características generales como fecha de ocurrencia, tipología, lugar donde se originó el evento y los daños causados.

De esta fuente se incluyen 76 MM denominados derrumbes.

- **Catálogo Hemerográfico de Pazos y Vinueza (1990).**- Los principales documentos de esta fuente son: los informes técnicos o de visitas de observación consultados en los archivos del MOP durante los años 1974 a 1988, las noticias publicadas en el periódico EL COMERCIO para el período 1979-1989 y algunos estudios sobre movimientos de terreno procedentes de INECCEL (Pazos y Vinueza, 1990).

En esta fuente se identificaron 478 movimientos en masa, de los cuales se usaron 208 datos, después de ser depurada con la información de las dos anteriores fuentes.

- **EPN - PLANTEL, 2005.**- El proyecto desarrollado por estas dos instituciones denominado INTEGRACIÓN DEL COMPONENTE RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: FASE 1, es un estudio sobre la situación de la amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa (FRM) o MM en dos zonas piloto, Manabí y la Sierra Centro que incluye las provincias de Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, dando como resultado una base de datos de los FRM con sus características y mapas de distribución de los MM en cada sector de estudio. La base de datos fue realizada según dos modalidades, una espacial y otra temporal. La primera fue elaborada en base a la información de los MM cartografiados en Pazos y Vinueza (1990), y la segunda de la información hemerográfica del estudio elaborado por Pazos y Vinueza (1990), y de los datos presentados por Plaza (2001), ODEPLAN-DYA (2002), DesInventar y las Juntas Parroquiales de la Defensa Civil (JPDC) a nivel nacional.

De esta fuente, se identificaron 150 MM después de ser comparados con la base de DesInventar.

- **DIPLASEDE-MTOP.-** La Dirección de Planeamiento de la Seguridad para el Desarrollo Nacional del Ministerio de Transporte y Obras Públicas lleva un registro mensual de eventos adversos en el sector del transporte ocurridos en las provincias del país desde el año 2011 (Com. Pers. Dra. Nelly Jaramillo); este documento contiene una breve descripción de las emergencias en la Red Vial Estatal, tales como movimientos en masa, accidentes y suspensión del tránsito vehicular.

De esta fuente se recopilaron 245 MM y se utilizaron 190, después de la comparación de información con la base de DesInventar.

2.1.2.1 RESULTADOS

La base de datos depurada contiene 3232 MM para el período 1900-2013 e incluye 5 movimientos en masa de fechas históricas (1660, 1689, 1691, 1699, 1797).

El número de MM anual del IMMD, indica que hasta el año 1969 (Figura N°11) se registraron 74 eventos: 66 derrumbes y 8 deslizamientos; el mayor número de MM fue en los años 1950-1952 con 21 MM y 1925 con 10 MM, años que coinciden con la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

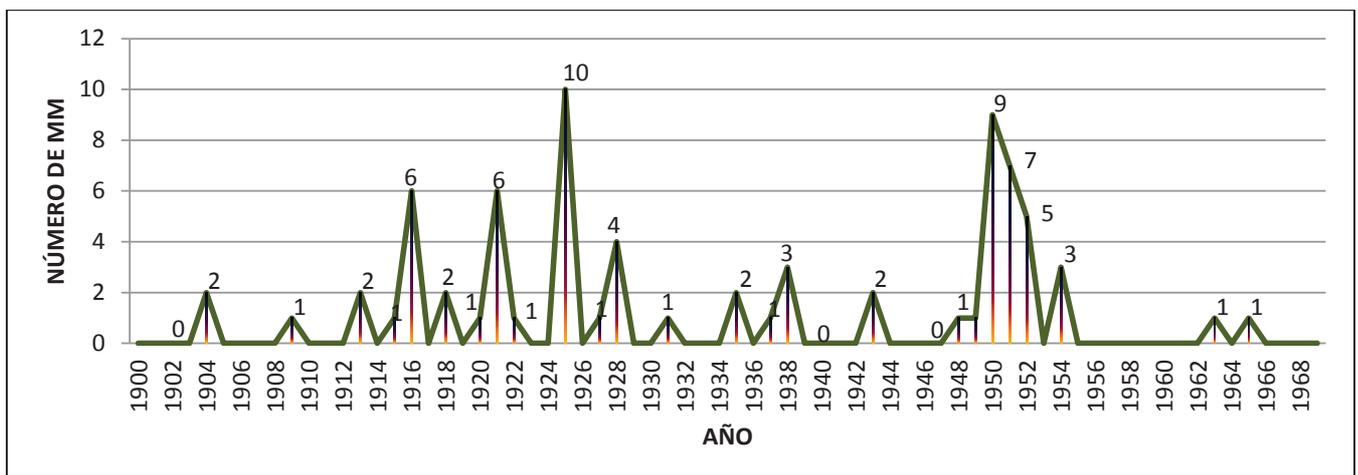


Figura N°11 Distribución anual de movimientos en masa (1900-1969) (IMMD)

El fenómeno de El Niño (ENSO) se clasifica según su intensidad y duración en cinco categorías: débil, moderado, fuerte, muy fuerte y extraordinariamente fuerte. Así, al

ENSO del año 1925-1926 se lo catalogó como muy fuerte y al fenómeno de 1951-1952 como débil (Suarez, 1998).

A partir del año 1970 hasta 2013, se han registrado 3113 MM (Figura N°12); existen 4 años pico durante los últimos 43 años (1983, 1998, 2008 y 2012).

Los dos primeros años picos de MM concuerdan con los fenómenos de El Niño extremadamente fuertes registrados en el país (1982-1983 y 1997-1998). Sin embargo, no se ha reconocido un nuevo ENSO después del fenómeno de los años 97-98 que permita mencionar una relación entre las lluvias durante este fenómeno y la generación de MM en los años picos 2008 y 2012. Entonces, se presume que la posible causa del incremento de los MM que se observa desde el año 2007 se debe a una mejor recopilación y registro de la información de los MM generados.

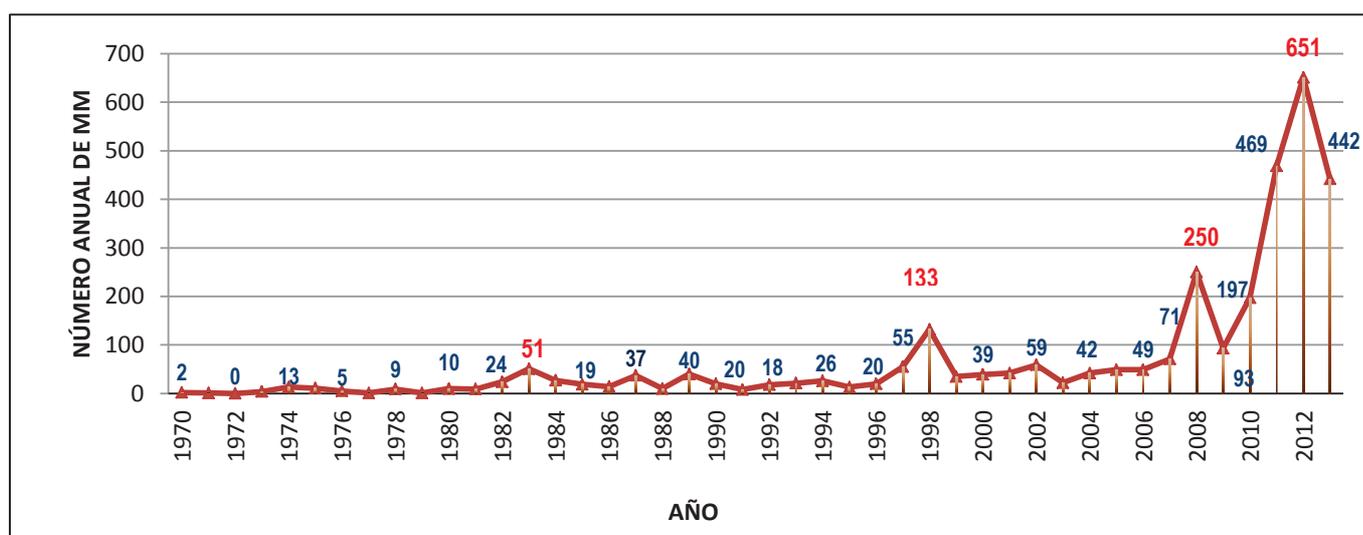


Figura N°12. Distribución anual de movimientos en masa (1970-2013) (IMMD)

La comparación entre la precipitación media anual (<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/>) y el número de MM para el período 1970-2011 (2020 MM) en la figura N°13, indica una similitud entre estas dos variables; los MM aumentan con una mayor cantidad de lluvias. Sin embargo, este crecimiento no es uniforme, en los primeros tres años pico antes mencionados, se observa una diferencia entre la precipitación media anual y el número de MM registrados.

El promedio de precipitación media anual durante este período de tiempo es de 1362.39mm, en el año Niño 1983 la precipitación supera un 69.5% este valor y registra únicamente 51 MM; en el año Niño 1998 la precipitación supera un 28.6% el promedio y registra 133 MM, y en el año no Niño 2008 la precipitación supera un 32.5% el promedio y registra 250 MM; esta diferencia nuevamente puede evidenciar el interés en la recopilación de la información de los MM en los últimos 15 años.

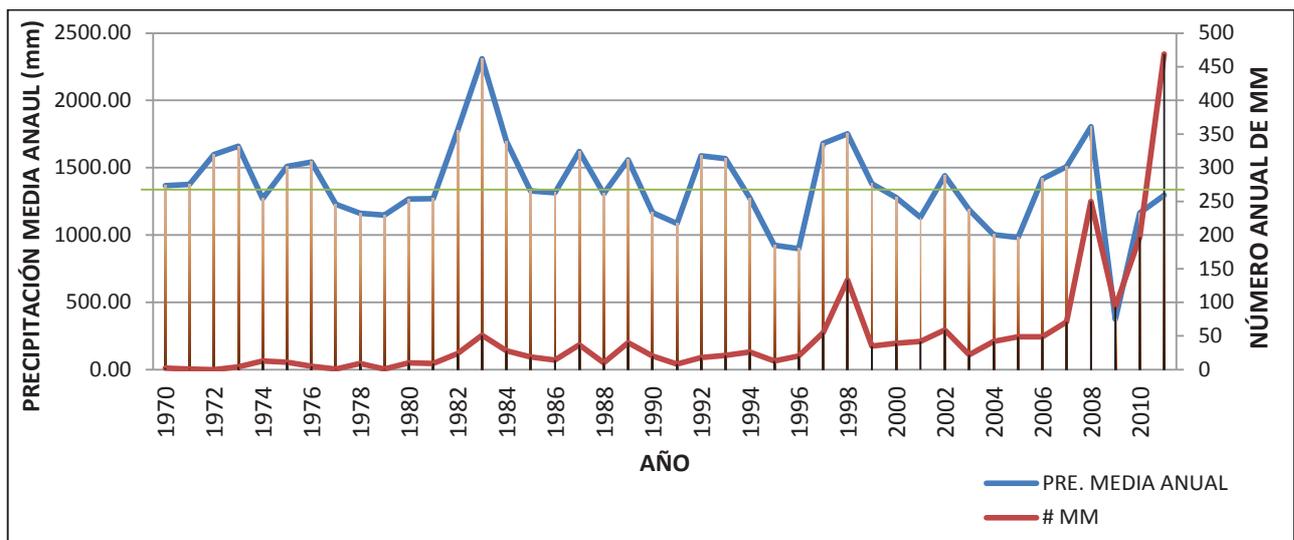


Figura N°13. Relación: Número Anual de MM vs Precipitación Media Anual (1970-2011) (IMMD)

La relación entre la precipitación media mensual y el número de movimientos en masa mensual en los años pico 1983, 1998 y 2008 se muestra en la figura N°14. En el literal a, no existe una similitud entre las curvas que indique una relación lluvias-MM, por ello, se sospecha que esta anomalía se deba a un error en el registro de datos de las variables.

En los literales b y c, se observa una tendencia similar de aumento del valor de la precipitación y los MM desde el mes de diciembre hasta abril y una posterior baja desde el mes de mayo, esto concuerda con la estación invernal que atraviesa el país en esos meses, donde se origina el mayor número de MM.

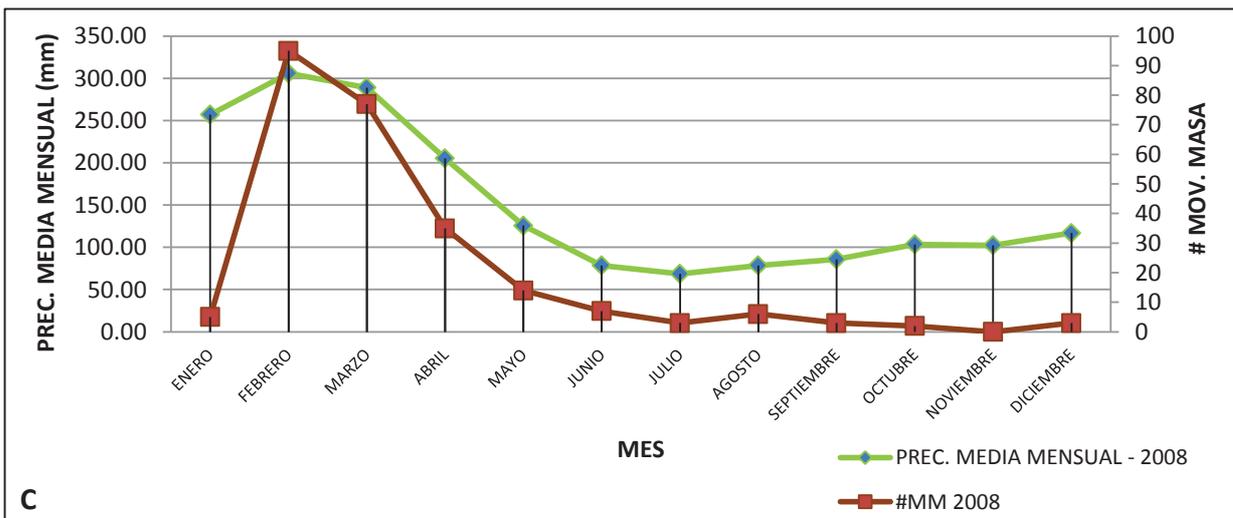
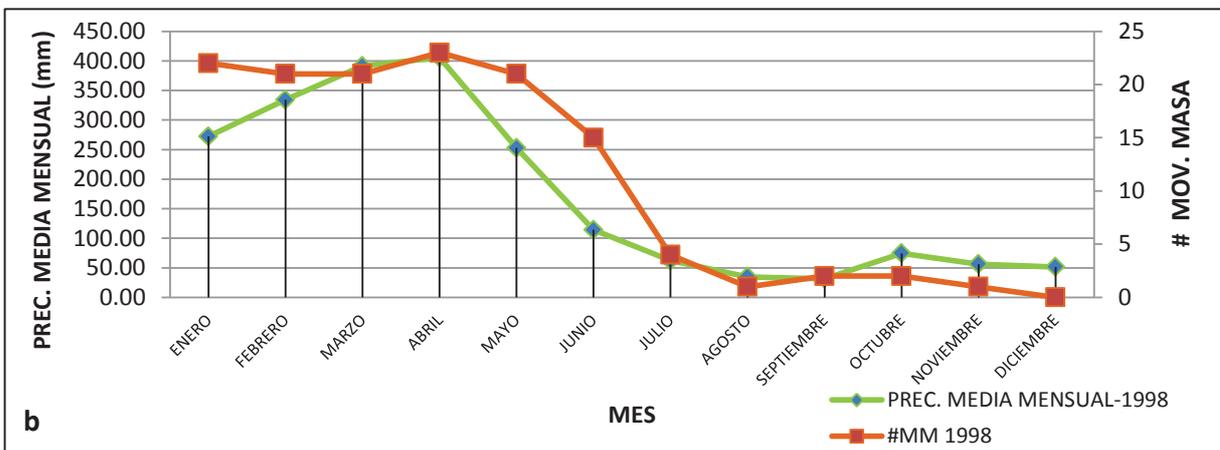
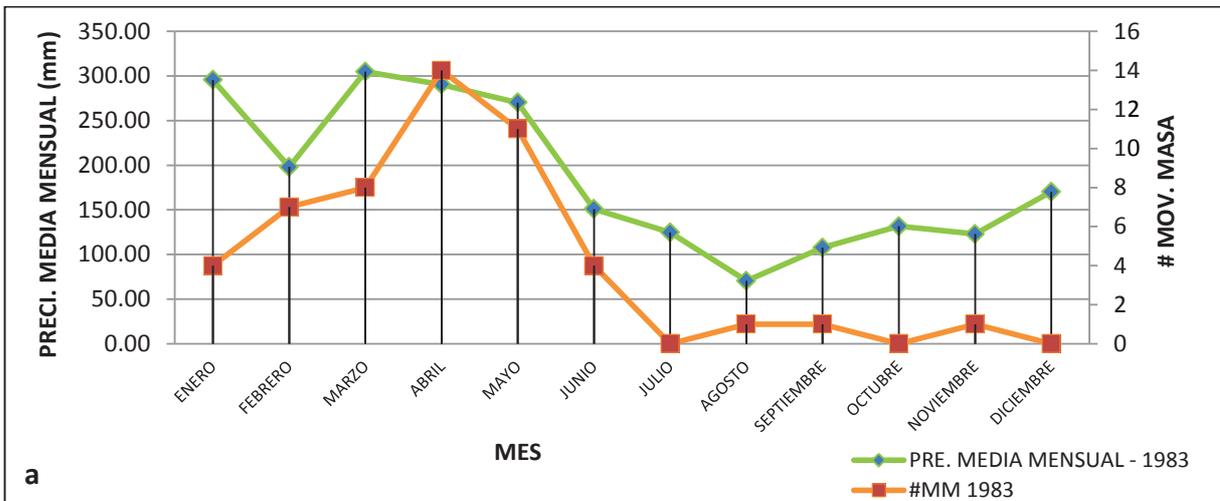


Figura N°14. Relación: Número Mensual de MM vs Precipitación Media Mensual: a) 1983, b) 1998, c) 2008. (IMMD)

Desde el año 2009, la precipitación media anual muestra un ligero incremento comparado al número de MM registrados (666 MM); pudiendo decir de manera general que las lluvias no han sido el factor más influyente durante este lapso de tiempo y que se debería utilizar otros parámetros como sismicidad o actividades antrópicas para el análisis de las causas que generan los MM.

De la base de datos del IMMD, 3187 MM tienen información sobre el mes de ocurrencia (Figura N°15), la mayoría de ellos se ubica en el primer cuatrimestre del año, corroboran la idea de que las lluvias son un factor desencadenante de estos fenómenos y que ocurren en mayor número en los meses de invierno, como Pazos y Vinueza (1990); Plaza (1996); EPN-PLANTEL (2005) ya lo mencionaron.

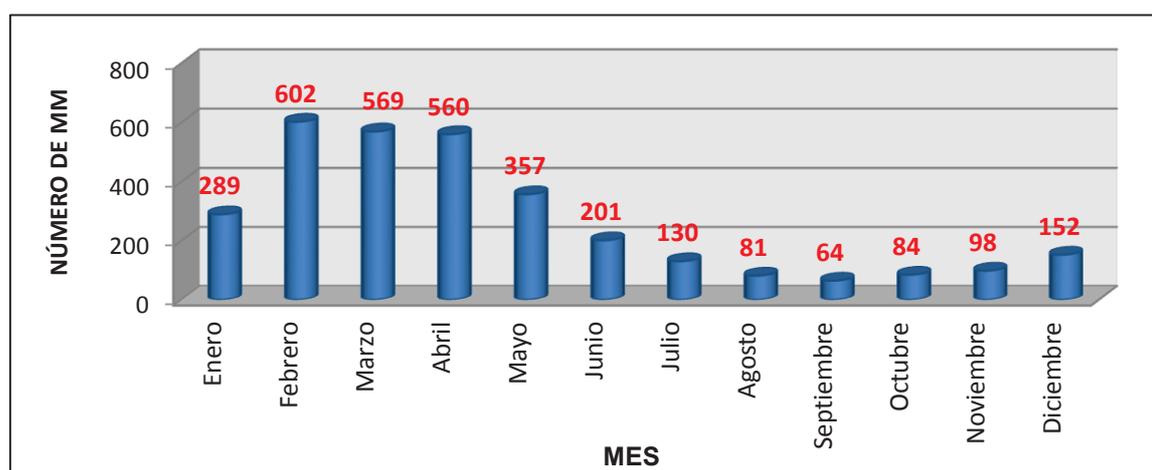


Figura N°15. Distribución mensual de movimientos en masa (1990-2013) (IMMD)

En la figura N°16, para el período 1970-2011 se registraron 2021 MM (63.41%). La relación entre el número de MM mensuales y la precipitación media mensual de la figura N°17, indica una correlación entre las variables analizadas; a mayor cantidad de lluvias mayor número de movimientos en masa.

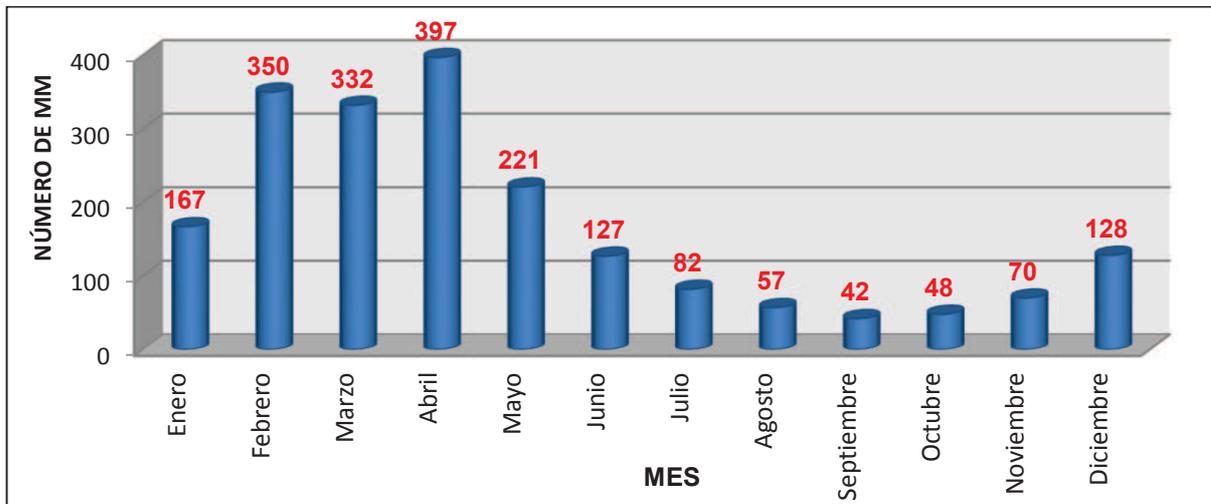


Figura N°16. Distribución mensual acumulada de movimientos en masa (1970-2011) (IMMD)

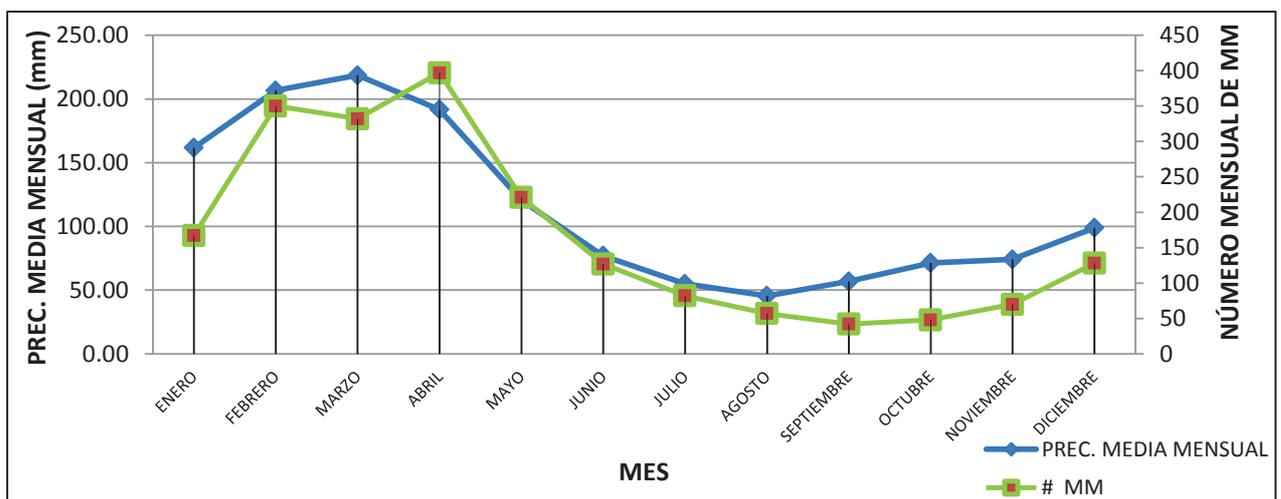


Figura N°17. Relación: Número Mensual Acumulado de MM vs Precipitación Media Mensual (1970-2011) (IMMD)

Según la *ubicación geográfica*, en la figura N°18 las provincias con el mayor registro de incidencia de movimientos en masa son: Manabí (6.78%) en la Región Costa; Loja (12.78%) y Pichincha (12.23%) en la Región Sierra; y Zamora Chinchipe (4.43%) en la Región Oriental.

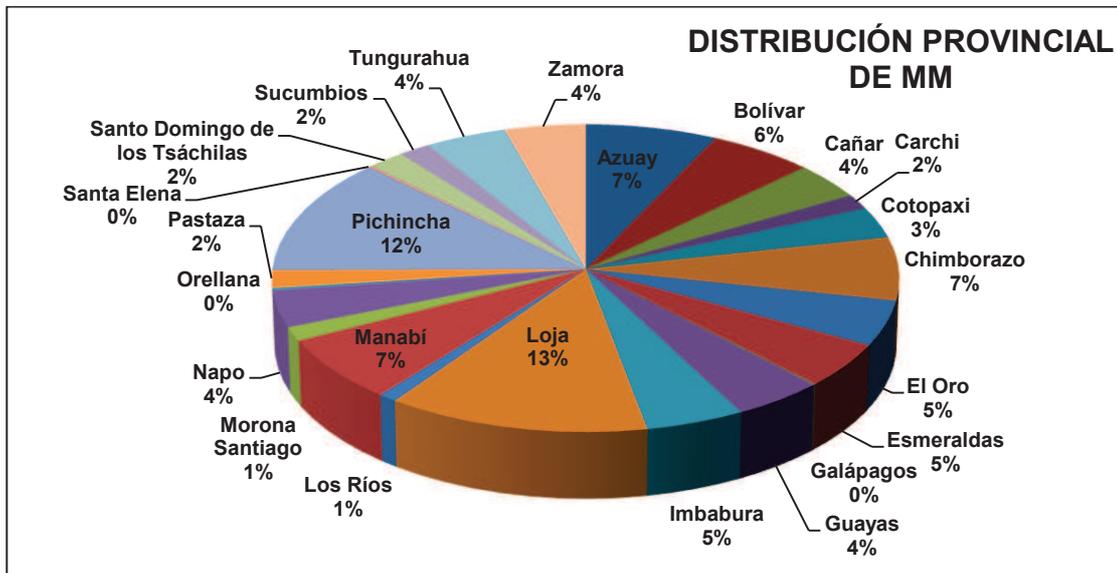


Figura N°18. Distribución de MM (%) a nivel provincial (IMMD)

La figura N°19, muestra que la tipología predominante son los deslizamientos (86,1%), seguida por los derrumbes (9.41%) y movimientos complejos (1.67%). Esto refleja la influencia que la documentación de DesInventar tiene en esta base, puesto que, en ella no se hace una especificación del tipo de MM que se genera, sino, se generaliza bajo el término deslizamiento.

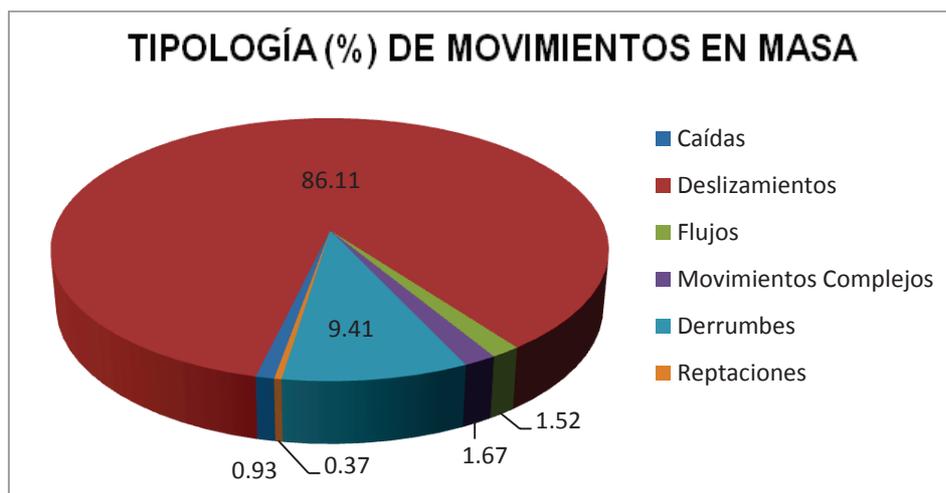


Figura N°19. Tipos de movimientos en masa (%) (IMMD)

Las principales causas en la generación de MM del total de los datos del IMMD, son las lluvias, las condiciones litológicas y las actividades antrópicas. Solo las lluvias

representan el 55.36% del total y las principales provincias en sufrir sus estragos son Pichincha, Loja, Azuay y Manabí. Sin embargo, el 41.16% de los datos carece de esta información.

Se debe recordar que los inventarios de movimientos en masa de este trabajo, fueron elaborados con la información disponible a la fecha, siendo incompletos, en especial en la época histórica antigua.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE PONDERACIÓN DE PARÁMETROS

3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para el análisis y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa se utiliza el método heurístico de Ponderación de Factores (PMA: GCA, 2007). Este método emplea varios factores que son escogidos y ponderados de acuerdo a la experiencia del evaluador y por lo tanto tiene un grado de subjetividad. Sin embargo, es generalmente utilizado a escala nacional y regional.

Para la ejecución de este método; se valora cada factor (F_i) tomando en cuenta sus propiedades para originar MM. En este trabajo se considera un rango de valoración de 0 a 5, donde el valor 0 representa la unidad del factor con ninguna posibilidad de originar MM, y el valor 5 cuya posibilidad es muy alta. Estos factores así valorados se combinan mediante un algoritmo lineal con un peso ponderado.

Esta metodología ha sido usada en estudios a nivel nacional en países como Colombia (INGEOMINAS, 2001 en PMA: GCA, 2007; SGC, 2012) y Perú (INGEMMET, 2010). También a escala regional en Colombia (INGEOMINAS, 2002), Perú (PREDES, 2009), Venezuela (Roa, 2006) y Ecuador (INIGEMM, 2013).

3.2 FACTORES DE ANÁLISIS

Los factores de análisis deben caracterizar los parámetros, propiedades y agentes que contribuyen al proceso de generación de movimientos en masa. Estos son escogidos por un experto familiarizado con el área de estudio, considerando el objetivo final del trabajo, los alcances y la disponibilidad de la información con la que se cuenta (Roa, 2006).

Plaza (1996), menciona que en el Ecuador los factores detonantes más importantes que causan movimientos en masa suelen ser: lluvias, sismos, deforestación, cortes o

excavaciones de laderas, cambio en el uso del suelo y los factores naturales más comunes son: litología, tipo de suelo, estructuras geológicas desfavorables, ángulo y forma de la pendiente.

En el documento metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, escala 1:100.000 (SGC, 2012) utilizado en Colombia, se describen los siguientes factores de análisis y su valor de ponderación:

Geología: 0.15

Geomorfología: 0.50

Suelos Edáficos: 0.20

Cobertura: 0.15

Villacorta et al. (2012) menciona que para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Perú escala 1:1'000.000 (INGEMMET, 2010), se utilizaron los siguientes factores con su valor de ponderación:

Pendiente: 0.2

Litología: 0.4

Geomorfología: 0.25

Hidrogeología: 0.1

Cobertura vegetal: 0.05

EPN – PLANTEL (2005) menciona que a cualquier nivel, se debe considerar como factores causales importantes las lluvias, sismos y las acciones antrópicas.

Para el análisis de susceptibilidad de este trabajo, considerando la escala, la disponibilidad de la información y el común de los factores manejados en otros trabajos (en especial de los países vecinos), se utilizarán los siguientes factores: pendiente, litología, grandes unidades de relieves, uso y cobertura del suelo, hidrogeología, lluvias y sismos.

3.2.1 EL FACTOR PENDIENTE

La pendiente es uno de los principales factores en la generación de movimientos en masa, ésta determina la magnitud de los esfuerzos de corte en una ladera y la cantidad de energía cinética de la masa inestable que se moviliza.

El factor pendiente está representado por el ángulo entre la superficie del terreno y la horizontal, expresado en grados o porcentajes. El Modelo Digital de Elevación (DEM) fue elaborado por la misión SRTM de la NASA y la Agencia Espacial de Alemania e Italia en el año 2000 y posee una resolución de 1 arco-segundo por 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m por 30 m) siendo utilizado para elaborar el mapa de pendientes.

Para el efecto se empleó la extensión 3D Analyst de ArcGis 9.3, obteniendo un mapa ráster con un tamaño de celda de 92.54 m x 92.54 m con 9 rangos en grados por defecto. En este trabajo fueron reclasificados los rangos considerando la clasificación de Van Zuidan (1986), que describe las condiciones del terreno y los procesos característicos desarrollados en cada rango de pendientes (Tabla N°11, Anexo N1).

Una vez reclasificado el factor pendiente, se tiene un mapa con 6 clases o rangos en grados que fueron valorados entre 0 y 5 (Tabla N°12, Anexo N1) de acuerdo a lo propuesto por Mora (2004). El valor mínimo representa una susceptibilidad nula y el máximo valor una susceptibilidad muy alta.

3.2.1.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PENDIENTE

En el mapa de pendientes valorado de la Figura N°20, se observa que el 23.5% del territorio corresponden a “planicies” entre 0° y 2°, ubicadas en el Golfo de Guayaquil, en las costas de las provincias de El Oro, Santa Elena, y Esmeraldas en la Región Costa, en ciertos sectores del Callejón Interandino cuyo relleno de material piroclástico origina una superficie plana y al noreste y sureste en la Región Oriental.

Las zonas con pendientes “muy bajas” (2°-4°), representan el 15.5% de la zona de estudio, es decir, un poco más de 38 mil km². Esta clase se agrupa en el valle del

Callejón Interandino, el pie de las colinas de la Región Costa y Oriente y las partes semi-planas de los grandes conos de deyección.

Las zonas con pendientes “bajas” ($4^{\circ} - 8^{\circ}$), cubren el 16% del país; están distribuidas en las partes bajas de las estribaciones de las cordilleras y otras elevaciones del país y bordes disectados de los conos aluviales.

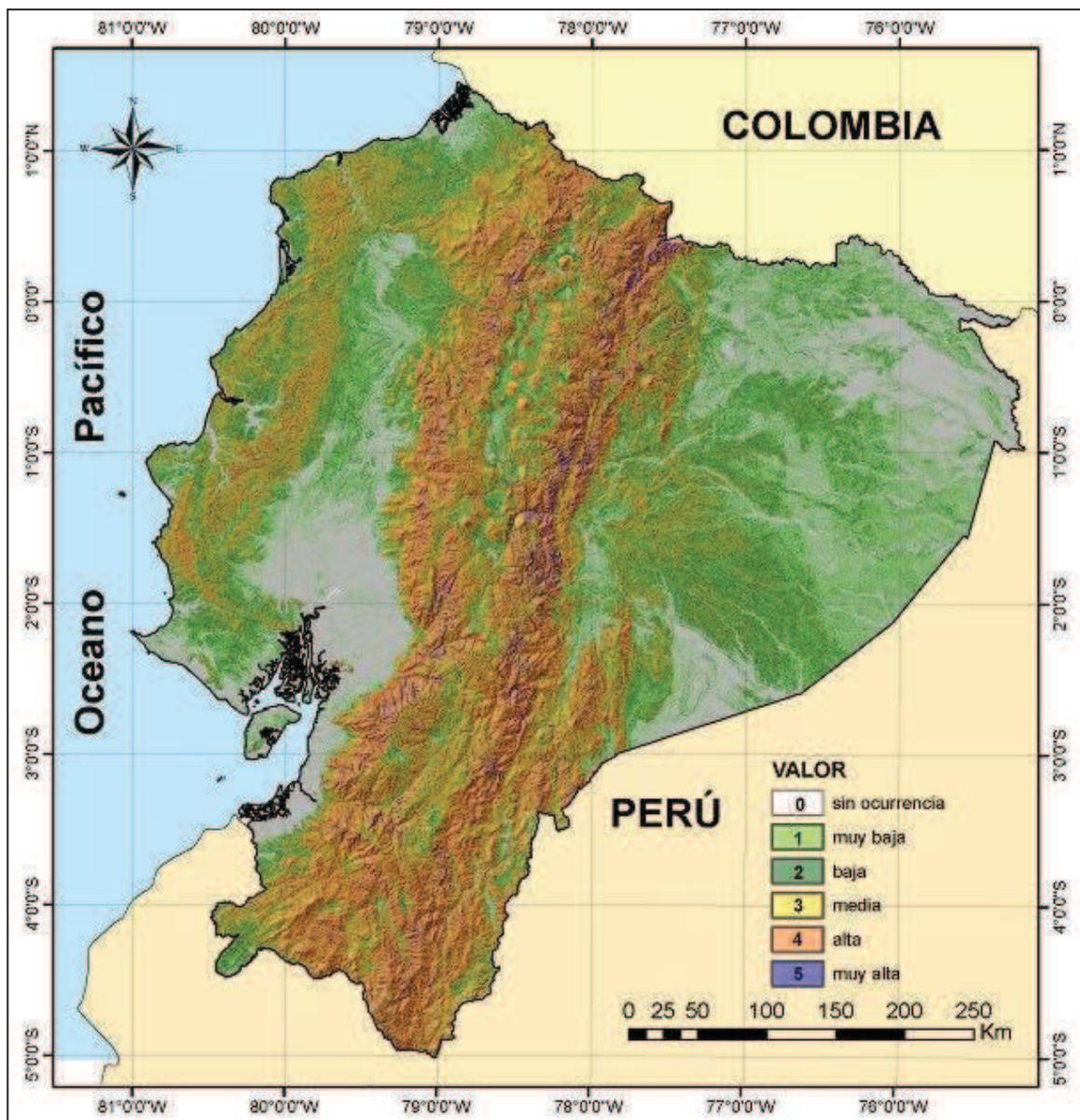


Figura N°20. Mapa valorado de pendientes reclasificado

Las zonas con pendientes “moderadas” (8° - 16°), representan el 19.4% del territorio nacional. Se ubican en la parte media-baja de las faldas de las Cordilleras Real y Occidental, de las cordilleras costeras, de la Depresión del Pastaza y Cordillera Cutucú.

Las zonas con pendientes “fuertes” (16° - 35°), representan el 23.6% del territorio nacional. Se ubican principalmente en la parte media-alta de las Cordilleras Real y Occidental y las partes más altas de las elevaciones de la Costa y Oriente.

Las zonas con pendientes “muy fuertes” ($>35^{\circ}$), representan el menor porcentaje (2%) del área de estudio, están en lugares puntuales, donde se tiene taludes muy abruptos con poco o nula cobertura vegetal de la Cordillera Occidental, Real y Cóndor – Cutucú. Los desprendimientos de roca sería los movimientos esperados en estas zonas.

3.2.2 FACTOR LITOLÓGICO

Según Mora y Vahrson (1994), la litología es una de las variables más importantes para la estabilidad de taludes, y al mismo tiempo la más difícil de valorar. Para este factor se debería utilizar información geotécnica, pero sino está disponible, una descripción general de la geología ayuda.

Este factor está representado por las unidades litológicas del Mapa Geológico del Ecuador, escala 1:1'000.000, elaborado en base al convenio de Cooperación Técnica entre los gobiernos del Ecuador (Ministerio de Energía y Minas) y del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte (Overseas Development Administration, ODA) y publicado por CODIGEM y BGS en el año 1993 (INIGEMM, 2013).

El mapa geológico fue digitalizado en el año 2011 por el INIGEMM (Com. Pers. Eco. Martha Correa), consta de 83 unidades litológicas, 55 edificios volcánicos y 10 grupos de rocas intrusivas que agrupan a 33 plutones.

Las unidades fueron valoradas de 1 a 5 por académicos y geólogos profesionales del INIGEMM (Tabla N°13, Anexo N1). Para la valoración de cada unidad se consideró las características de: la litología, fracturación, meteorización y ubicación geográfica

en relación a la facilidad para originar MM. Se compararon los valores obtenidos y se determinó un valor promedio. El valor 1 corresponde a materiales menos susceptibles a Mm y el valor 5 a los más susceptibles.

3.2.2.1 ANÁLISIS DEL FACTOR LITOLÓGICO

En el mapa de unidades litológicas valorado de la figura N°21, se muestra que el valor (1), corresponde a unidades compuestas por lavas basálticas, bien compactas y poco fisuradas. En esta valoración se incluyen las unidades de Piñón y Piñón de la Sierra.

El valor (2), corresponde a unidades litológicas que forman depósitos aluviales ligeramente compactos con contenido de material fino considerable; unidades de rocas sedimentarias de grano fino a medio con buena estratificación, muy poca alteración y fisuración; unidades de rocas ígneas que forman lavas masivas duras, y unidades de rocas metamórficas medianamente alteradas. En este grupo se encuentran las formaciones Cayo, Borbón, Ostiones, Cazaderos, Unacota, Volcánicos Pisayambo, Maguazo, Unidad El Toro, Unidad Piedras, entre otras.

El valor (3), corresponde a los cuerpos intrusivos y a las unidades litológicas compuestas por material sedimentario fino y medio; lavas, tobas, material retrabajado y piroclástico poco soldado; unidades de rocas metamórficas levemente compactas y medianamente alteradas. En este grupo se encuentran las formaciones de Tablazo, Balzar, Guayaquil, Viche, Volcánicos Cotopaxi, Silante, Mera, Arajuno, Chapiza, Pumbuiza, entre otras. Los edificios volcánicos fueron también calificados con este valor debido a su composición y morfología favorables.

El valor (4), corresponde a las unidades litológicas conformadas por materiales sedimentarios sueltos, poco compactos, que tienen una alteración mediana o fuerte y una estratificación a favor de la pendiente. En el caso de las unidades con rocas metamórficas cuyos planos de foliación están a favor de la pendiente y la meteorización es alta. Los materiales de los volcanes Pan de Azúcar, Reventador, Sangay y Sumaco, son un caso particular porque se encuentran atravesados por

sistemas de fallas activas que aumentan la posibilidad de originar MM mediante un evento sísmico.

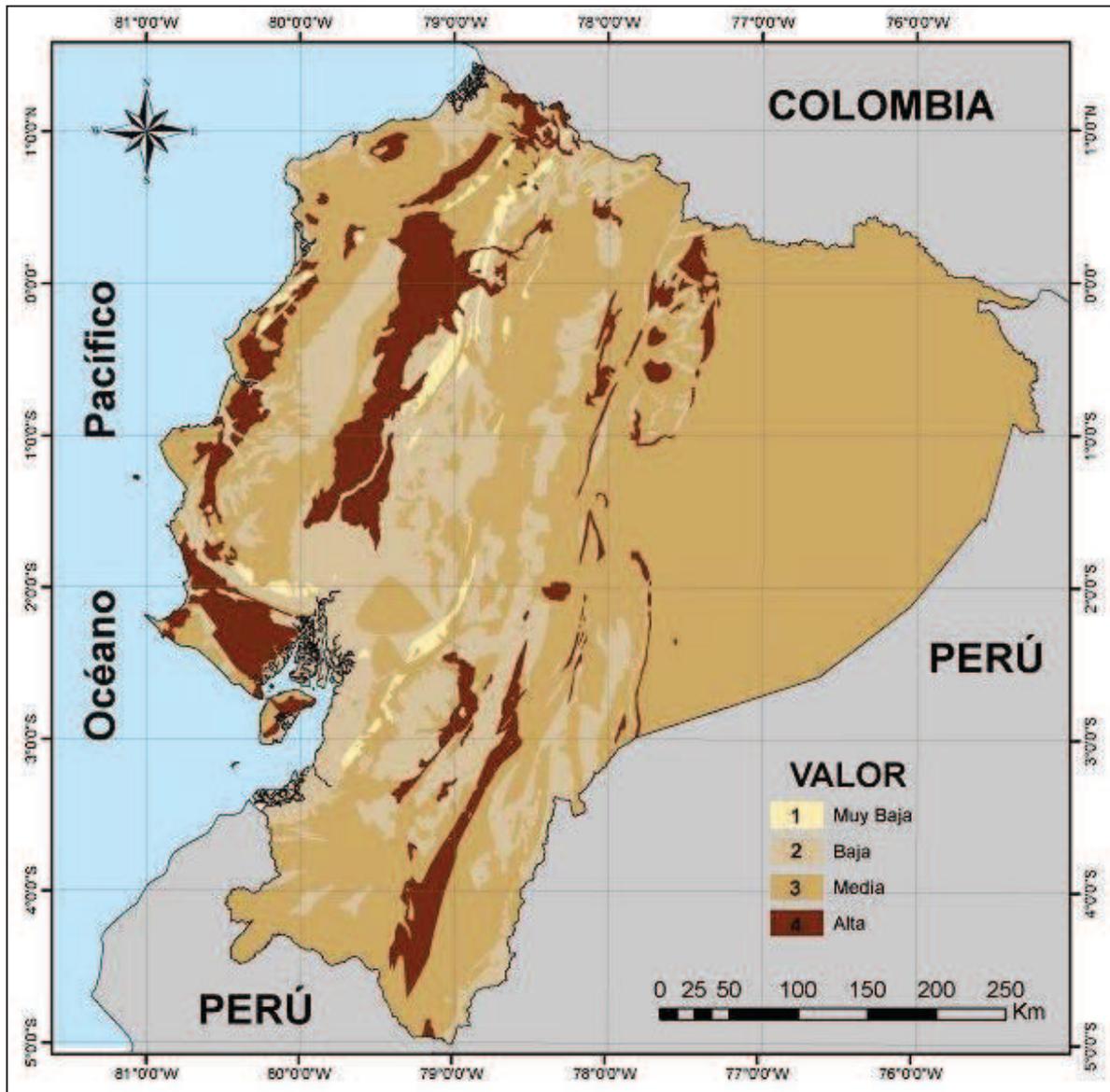


Figura N°21. Mapa valorado de unidades litológicas

3.2.3 FACTOR RELIEVE

Este factor está representado por la agrupación de las unidades de paisajes naturales del Mapa de Paisajes Naturales del Ecuador, a escala 1:1'000.000 elaborado por CEDIG/ORSTOM (1989) y luego modificado y valorado por INIGEMM (2013). Para la

agrupación de las grandes unidades de relieve se consideró la morfología (pendientes, desniveles, disección), génesis y edad. Cada unidad fue valorada en una escala de 0 a 5 de acuerdo a su potencial para generar movimientos en masa (Tabla N°14, Anexo N1).

3.2.3.1 ANÁLISIS DEL FACTOR RELIEVE

La figura N°22 muestra el mapa valorado de unidades de grandes relieves. Las unidades de relieve normalmente de alturas bajas (menores a 10m), fácilmente inundables como llanuras costaneras, manglares, playas, salitrales y pantanos en el Oriente, especialmente de Lago Agrio y Shushufindi son valoradas con cero.

El valor uno (1), corresponde a los valles fluviales con terrazas indiferenciadas y menores a 10 m de altura tanto en la Costa como el Oriente; las mesetas del levantamiento Napo (Napo - Hollín) y fondos de cuencas interandinas (excluyendo las montañas del sur).

El valor dos (2), corresponde a llanuras altas costaneras (Quevedo, Santo Domingo, otros); piedemontes (Naranjal, Naranjito, otros) y las colinas bajas de la Costa sobre rocas terciarias indiferenciadas. En la Sierra, representa los relieves cubiertos por páramos que son dominados por glaciaciones. En el Oriente, representa las planicies pantanosas, los piedemonte (Pastaza, Palora, Upano), las colinas bajas del oriente (afectadas por reptación) y finalmente fondos de cuencas y valles en la zona sur de El Oro.

El valor tres (3), corresponde a superficies abruptas y mesas en estado de destrucción avanzado en la Costa; mesas, piedemontes antiguos (Fm. Mera y Mesa) en el Oriente y relieves apalachados (flysch muy bien plegados) al sur.

El valor cuatro (4), corresponde a relieves más elevados y cuestas de la cordillera costanera (Chongón, Colonche, Cerro de Hojas, Balzar, Convento, Cojimíes). En la Sierra representa los conos volcánicos (cuaternarios y de finales del terciario) y las montañas del sur que se encuentran sobre el metamórfico.

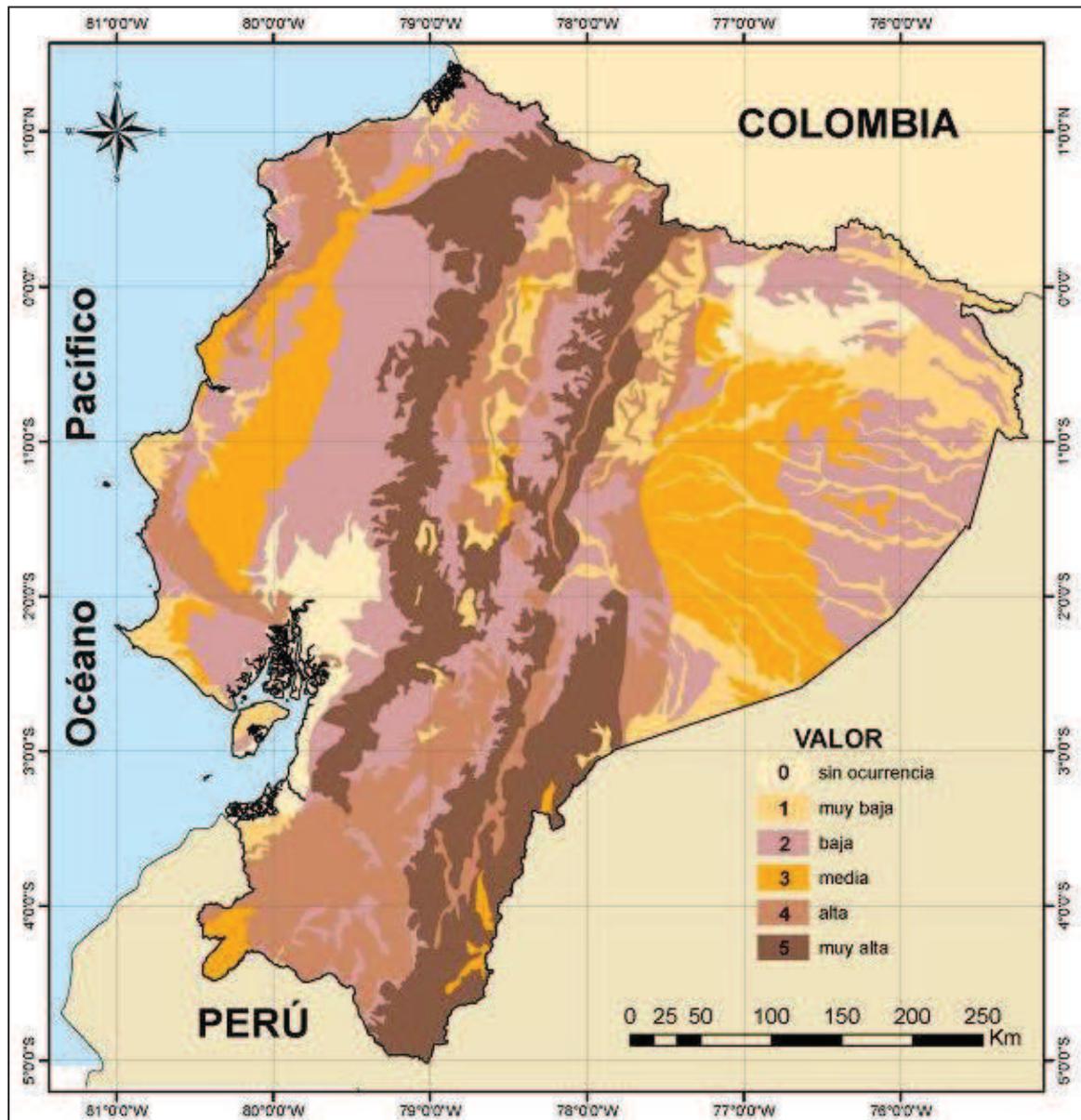


Figura N°22. Mapa valorado de unidades de grandes relieves (INIGEMM, 2013)

En el Oriente representa los contrafuertes del terciario, los valles encañonados y los que disectan el Levantamiento Napo, los corredores Cosanga, Macas – Méndez, Limón Gualaquiza y las vertientes bajas subandinas.

El valor cinco (5), corresponde a las vertientes exteriores oriental y occidental de las cordilleras andinas que se encuentran sobre afloramientos de basamento. En el

Oriente representa las vertientes sobre el metamórfico y finalmente los cuerpos intrusivos más jóvenes y los batolitos.

3.2.4 FACTOR USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL

Rice y Krames (1970) en CLIRSEN – MAGAP (2013) puntualizan que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos en los climas en los cuales la precipitación es muy grande y el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo, en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos.

El uso de suelo y la vegetación tienen un efecto importante en la generación de movimientos en masa, aunque la cobertura vegetal ayuda a la estabilidad del terreno en algunos casos, en otros las condiciones locales como espesor del suelo, pendiente y tipo de vegetación pueden aumentar la susceptibilidad.

Este factor está representado por las unidades del Mapa de Uso y Cobertura de Uso de Suelo, a escala 1:250.000, elaborado por el CONADE (1996), que fue digitalizado y modificado por SIGAGRO en el 2002. Cada unidad fue valorada entre 0 y 5, como se muestra en la tabla N°15 (Anexo N1), en función de su potencial para generar movimientos en masa.

3.2.4.1 ANÁLISIS DEL FACTOR USO Y COBERTURA VEGETAL

En la figura N°23, el valor cero corresponde a zonas cubiertas por cuerpos de agua y áreas usadas en cultivos de arroz o camaroneras (fácilmente inundables) de la Costa y los humedales en el Oriente. Este valor representa el 4.49% del territorio nacional.

El valor uno (1), corresponde a los bancos de arena y manglares a las orillas de la playa cubiertos por vegetación; el bosque natural muy húmedo con precipitaciones mayores a 2000 mm/año en la región oriental y en la provincia de Esmeraldas; y, el pasto natural seco y los cultivos de banano en la Costa. Este valor cubre el 29.47% del país.

El valor dos (2), corresponde a los páramos de las partes altas de las cordilleras Real y Occidental; los cultivos de palma africana localizada en zonas específicas en la

Costa, los bosques naturales, los pastos cultivados y naturales y la vegetación arbustiva de la Sierra y Oriente. Este valor cubre el 39.14% del territorio.

El valor tres (3), corresponde a la arboricultura tropical, los bosques intervenidos y plantados de la parte norte del país y las estribaciones centro – sur orientales de la cordillera Real; la caña de azúcar de la Cuenca del Río Guayas, los bosques y pastos naturales ubicados a lo largo de toda la región Costa; y, las zonas erosionadas en la Costa y zonas urbanas del país. Este valor representa el 17.41% del territorio.

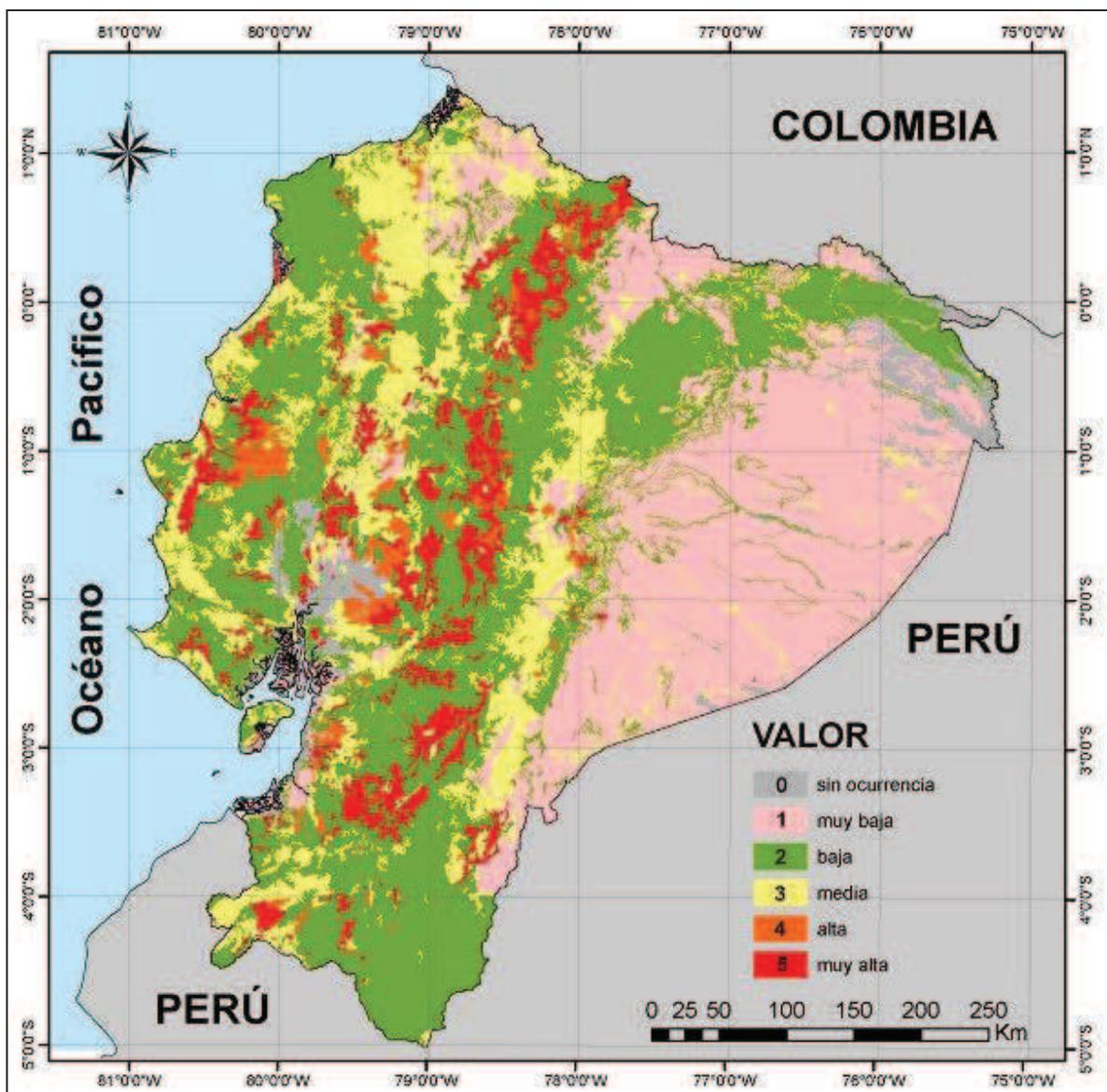


Figura N°23. Mapa valorado de uso y cobertura de uso de suelo

El valor cuatro (4), corresponde a los cultivos indiferenciados y las zonas erosionadas de la Sierra. Este valor cubre el 2.5% del territorio.

El valor cinco (5), corresponde a los cultivos de ciclo corto y de maíz ubicados en la Cordillera Real, a lo largo del Valle Interandino y partes de la Cuenca del Río Guayas. Cubre un área de 6.99% del territorio.

3.2.5 FACTOR HIDROGEOLÓGICO

La litología, porosidad y permeabilidad que posee cada unidad litológica determina la posibilidad de generar cualquier tipo de movimiento en masa. Este factor está representado por el Mapa Hidrogeológico del Ecuador, a escala 1:1'000.000, elaborado por el INAMHI - DGGM y publicado en el año 1983, que fue digitalizado y editado por PRETOECUADOR-MAG en el año 2005 (INIGEMM, 2013).

Se valora la permeabilidad de 0 a 5 de acuerdo a la descripción cualitativa que presenta el mapa original como se muestra en la tabla N°16 (Anexo N1).

3.2.5.1 ANÁLISIS DEL FACTOR HIDROGEOLÓGICO

Los resultados se muestran en la figura N°24. El valor cero (0), corresponde a los cuerpos de agua dispersos por todo el país. Este valor cubre el 0.84% del territorio.

El valor uno (1), corresponde a unidades con permeabilidad muy baja ubicados en las vertientes externas de las Cordilleras Real, Occidental y costaneras. Este valor cubre el 29.55% del territorio.

El valor dos (2), corresponde a unidades con permeabilidad baja y baja a media que se encuentran en el lado oeste del Oriente, en las partes altas de las cuencas intramontañosas y los conos de deyección. Este valor cubre el 30.98% del territorio.

El valor tres (3), corresponde a unidades con permeabilidad media y media a alta ubicadas en las mesetas y terrazas del lado este del Frente Subandino y de la Costa. Este valor cubre el 28.34% del territorio.

El valor cuatro (4), corresponde a las unidades con alta permeabilidad como las terrazas indiferenciadas en el Oriente y llanuras inundables de la Costa. Este valor cubre el 10.29% del territorio.

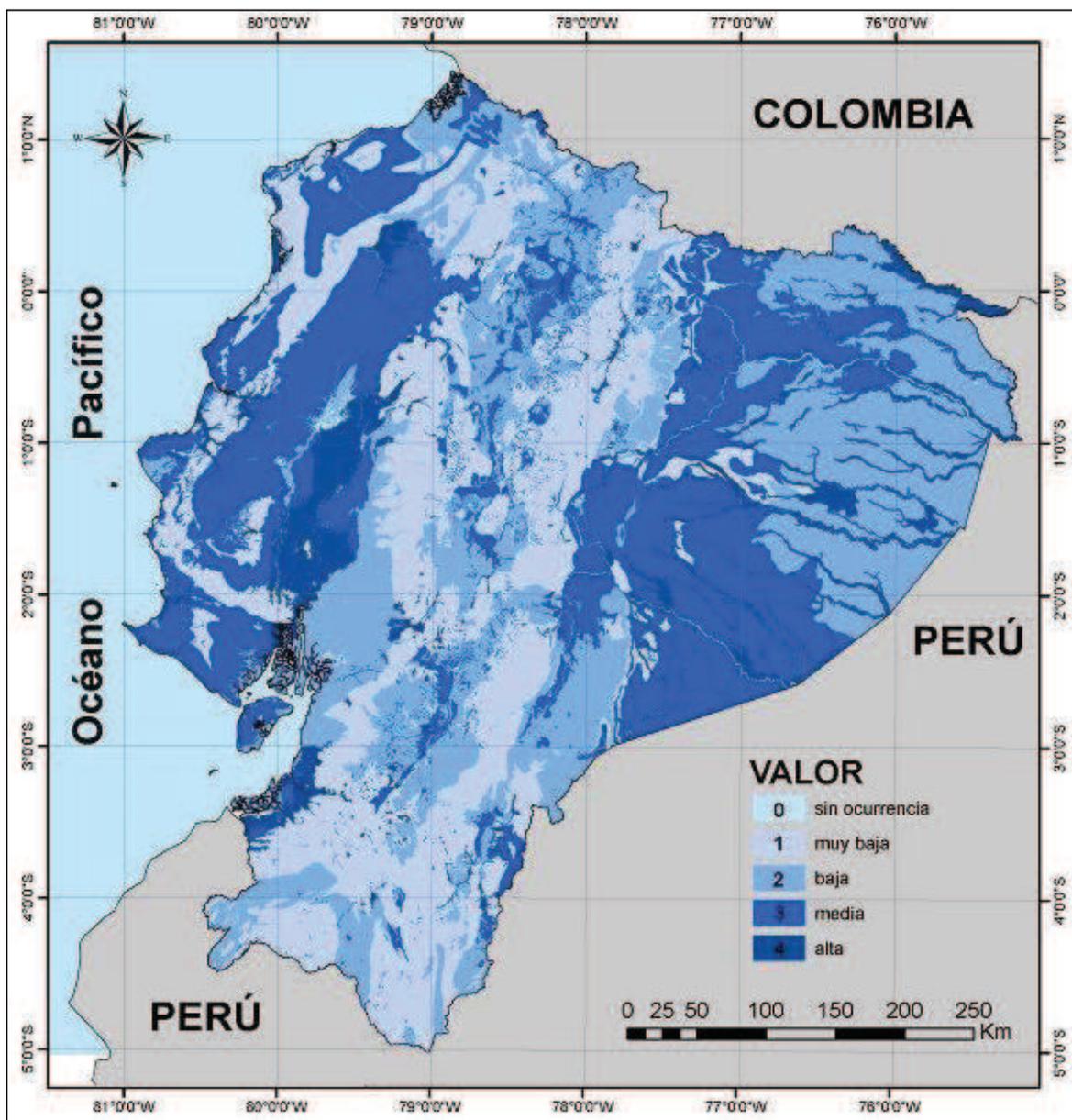


Figura N°24. Mapa valorado de unidades hidrogeológicas

3.2.6 FACTOR PRECIPITACIÓN

La lluvia es uno de los principales factores desencadenantes de MM en el Ecuador (Pazos y Vinueza, 1990; Plaza, 1996), puesto que, aumenta el peso de la masa que se desplaza, aumenta la presión del agua de los poros, sirve de medio de transporte al material, e incrementa la velocidad con la que desciende la masa una vez iniciado el movimiento.

El factor precipitación está representado de dos maneras: como la precipitación media anual que se considera como un indicativo de la humedad antecedente del suelo en el momento que se dan las lluvias máximas diarias y, como la intensidad de las lluvias máximas diarias evaluadas para un cierto período de retorno como indicativo de las lluvias que dispararía MM (SGC, 2012).

Según Mora y Vahrson (1994a, 1994b en INIGEMM, 2013) en Costa Rica y América Central la intensidad de precipitación es el segundo elemento más importante disparador de deslizamientos.

A continuación se describen las dos formas de representación:

3.2.6.1 ISOYETAS MEDIA ANUAL

La precipitación media anual está representado por el Mapa de Isoyetas Media Anual /Serie 81-2010 (INAMHI, 2013) publicado en la página web del INAMHI. Este mapa contiene datos de la precipitación de 265 estaciones meteorológicas divididas en 10 rangos. El mapa fue digitalizado de acuerdo a los rangos de la tabla N°17 (Anexo N1) y valorados de 1 a 5.

3.2.6.1.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PRECIPITACIÓN: ISOYETAS MEDIA ANUAL

En la figura N°25, las zonas con precipitaciones bajas, valor (1) y (2), están en la región costanera, específicamente en las provincias de Manabí, Guayas y El Oro, a menos 100 m.s.n.m.; a lo largo del Valle Interandino y en las cuencas intramontañosas de las provincias de Cañar, Azuay y Loja.

El valor tres (3), representa zonas donde hay precipitaciones moderadas y se encuentran en los flancos de los sistemas montañosos de la Costa y Sierra.

El valor cuatro (4), representa zonas con precipitaciones altas, localizadas en la región amazónica y en el valle que se encuentra entre la Cordillera Occidental y las Cordilleras de Balzar, Montañas de Convento y Cerros de Coaque en Manabí y las Cordilleras de Cojimíes y Atacames en la provincia de Esmeraldas. Además, existen tres sitios dispersos, ubicados en la Cuenca del Río Guayas, la parte norte de la Cordillera del Cóndor y al lado este de la provincia de Cañar.

El valor cinco (5), representa concentraciones puntuales de precipitaciones muy altas, ubicadas en el Cono de Deyección de Santo Domingo de los Tsáchilas, en la Depresión del Pastaza y gran parte de la provincia de Sucumbíos.

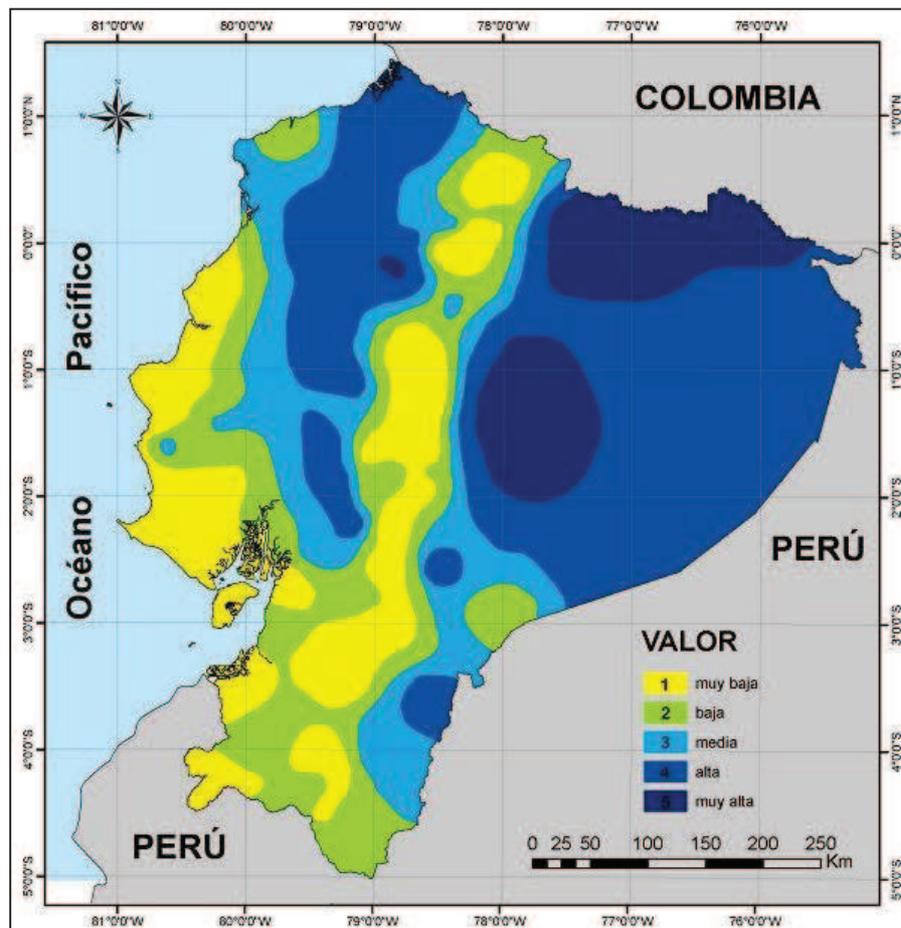


Figura N°25. Mapa valorado de precipitación media anual Serie 81-2010

3.2.6.2 INTENSIDAD DE LLUVIAS DIARIAS

Este factor está representado por la intensidad de lluvias diarias para un período de retorno de 100 años, de la misma forma como se considera en Mora y Vahrson (1994a, 1994b). La base de datos proviene de 178 estaciones, 65 estaciones pluviográficas que cuentan con registros de precipitaciones máximas para 5, 10, 15, 30, 60, 120, 360 y 1440 minutos y 113 estaciones pluviométricas con información de intensidades máximas en 24 horas, para el período 1964-1998 (INAMHI, 1999) (Tabla N°18, Anexo N1)

Los datos fueron procesados en ArcGis, elaborando un mapa de isolíneas mediante el método de interpolación Topo to Ráster. El número y valor de las clases es el mismo que fue utilizado en INIGEMM (2013), y se muestran en la tabla N°19 (Anexo N1).

3.2.6.2.1 ANÁLISIS DEL FACTOR PRECIPITACIÓN: INTENSIDAD DE LLUVIAS DIARIAS

La figura N°26, muestra que las zonas con intensidad bajas, valor (1) y (2), están a lo largo del Valle Interandino y las cuencas intramontañosas.

El valor tres (3), representa zonas donde la intensidad es moderada y está cubriendo gran parte de la Región Oriente, así como las vertientes externas de las cadenas montañosas.

Los valores cuatro (4) y cinco (5), representan zonas con intensidad de lluvias altas, se ubican como focos concentrados en las regiones Oriental y Costa.

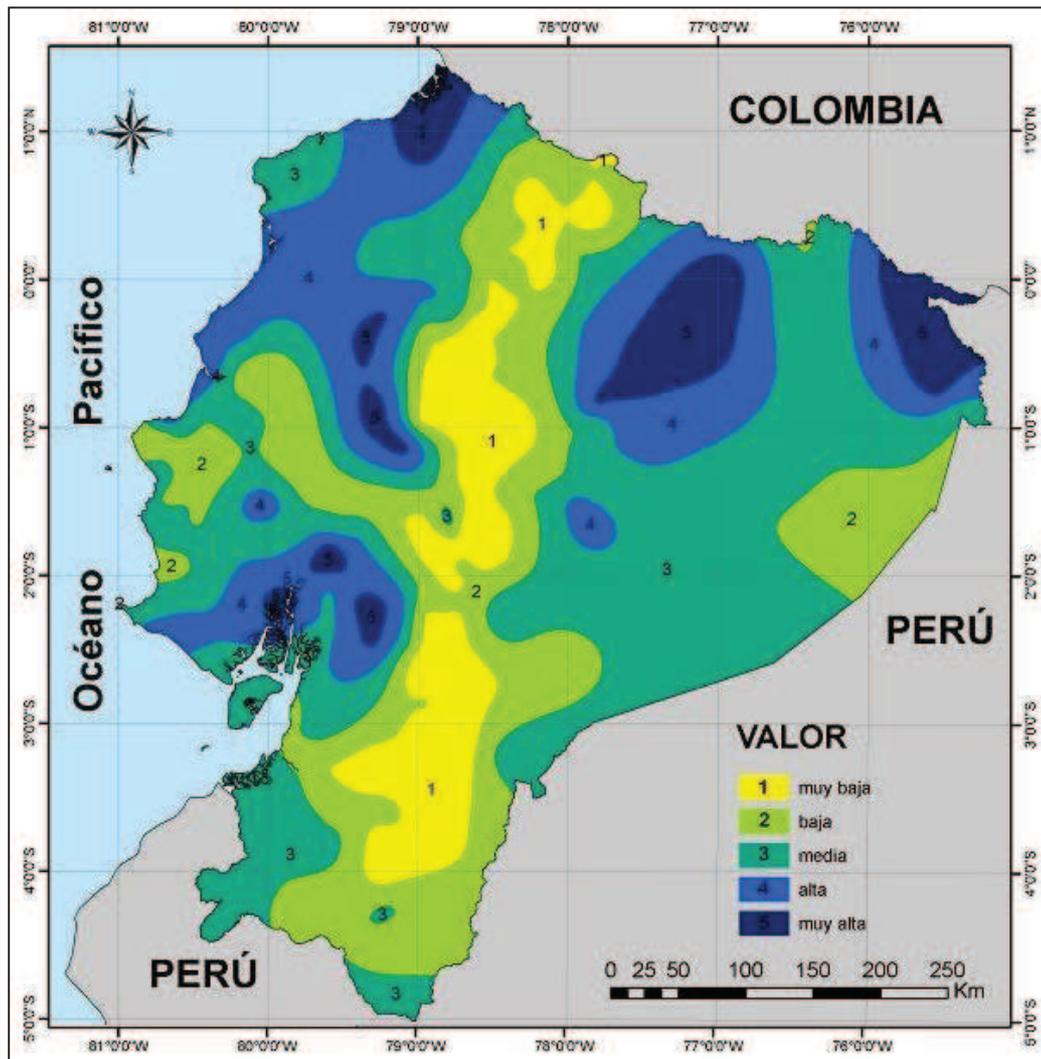


Figura N°26. Mapa valorado de intensidad de precipitación diaria, para períodos de retorno de 100 años (INIGEMM, 2013)

3.2.7 FACTOR SISMICIDAD

Los sismos, son uno de los desencadenantes más comunes para los desprendimientos de tierra en zonas de montaña, éstos pueden ser enormemente destructivos y causar gran pérdida de vidas (Keller y Blodgett, 2004 en Vilorio, 2012).

En el trabajo realizado por Keefer (1984) que incluye datos de 40 sismos históricos en el mundo para determinar las características, ambientes geológicos y los peligros de los deslizamientos disparados por eventos sísmicos, identifica catorce tipos de deslizamientos, determinando que la mayoría de los movimientos son caídas de roca,

deslizamientos de suelos alterados y de rocas; como que la mayoría de pérdidas humanas se debieron a las avalanchas de roca, los flujos rápidos de detritos y las caídas de roca.

El factor sismicidad puede ser representado como la intensidad sísmica o la aceleración máxima. Considerando la disponibilidad de la información, este factor está representado por el valor del factor Z, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. Estas aceleraciones son determinadas para un período de retorno de 475 años, es decir, una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años.

El mapa de aceleración sísmica valorado (Figura N°25), se obtuvo en función de las aceleraciones máximas calculadas por el IGEPN – IRD¹ (inédito), mediante la herramienta Contour de Spatial Analyst del programa ArcGis. Los rangos de las clases son similares a los determinados en el mapa del NEC (2011), sin embargo, la calificación y posterior valoración de algunas de ellas se modificaron (Com. Pers. Dr. Mario Ruiz), como se indica en la tabla N°20 (Anexo N1) y que fueron usados en INIGEMM (2013).

3.2.6.1 ANÁLISIS DEL FACTOR SISMICIDAD

El mapa de la figura N°27 indica 5 zonas sísmicas:

El valor uno (1), corresponde a la parte nor-oriental del país.

El valor dos (2), corresponde a la parte sur-oriental y las cuencas intramontañas de Cañar, Azuay y Loja, en estas zonas generalmente los sismos que se generan son muy profundos y de baja magnitud.

El valor tres (3), corresponde a la parte central del país, aquí generalmente se originan sismos menos profundos, de magnitudes variables y directamente relacionados al sistema de fallas activo que atraviesa el país.

El valor cuatro y cinco (4, 5), corresponde a la región Costa, caracterizada por una amenaza sísmica alta y muy alta. En esta región se generan sismos poco profundos o

¹ La base de datos de las aceleraciones máximas utilizadas (inédito), no puede ser anexada debido al compromiso de confidencialidad y no divulgación de los datos adquiridos entre la autora de este proyecto de titulación y el IGEPN-IRD.

someros provocados por la liberación de energía constante en la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana.

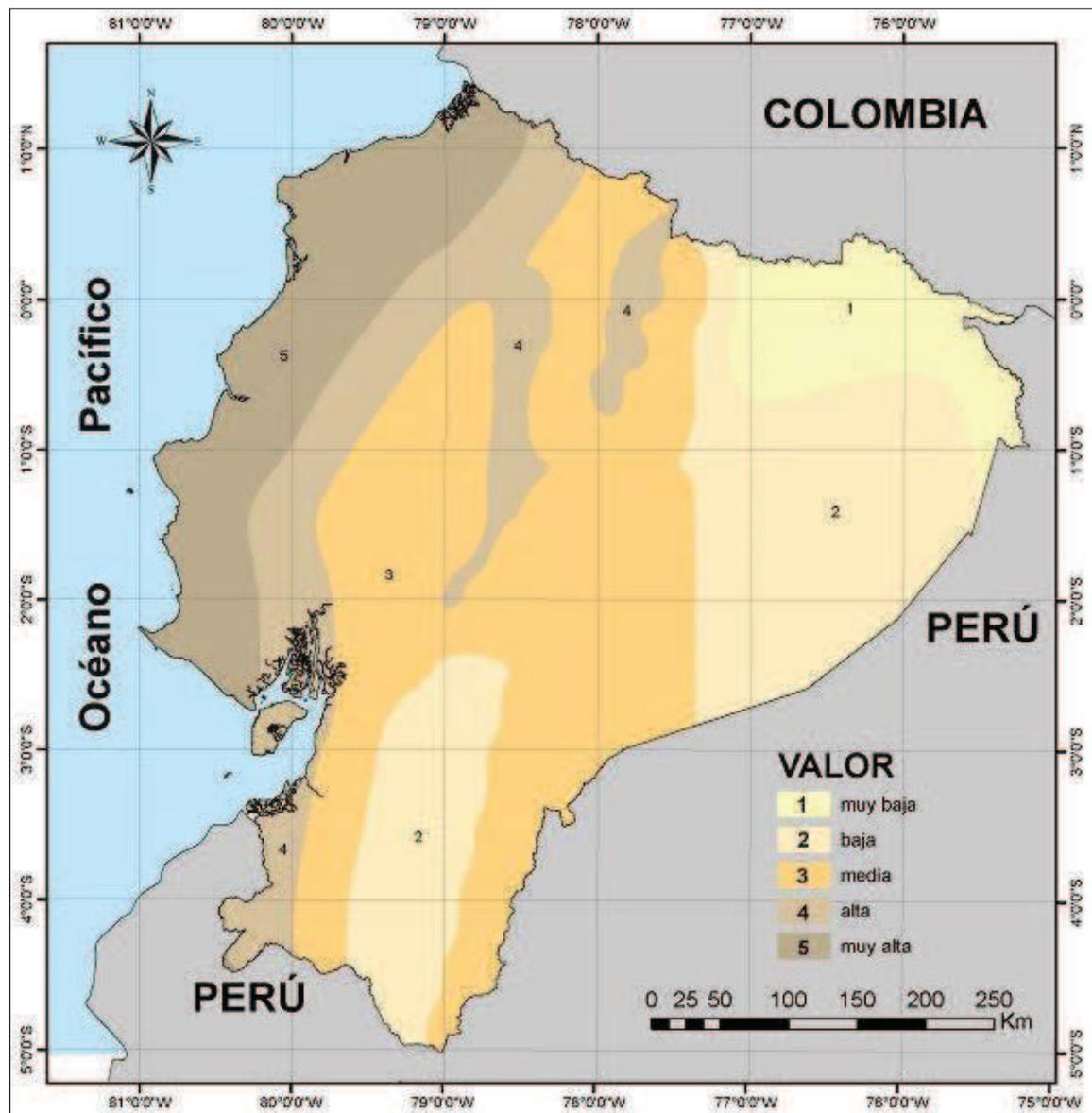


Figura N°27. Mapa valorado de zonas sísmicas

Las dos segmentos en la parte centro norte y norte del país, que están influenciados por los sistemas de fallas activas La Sofia - Chingual, Quito, Saquisilí-Yambo y Pallatanga, fueron valorados como una amenaza alta (4) ya que estas fallas generan aceleraciones máximas entre (0.35-0.5g).

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

El análisis y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa permite a través de la zonificación de la susceptibilidad, determinar lugares en el territorio continental ecuatoriano donde se pueden generar movimiento en masa. Esta zonificación se realiza utilizando el Método de Factores Ponderados y la matriz de jerarquización analítica para identificar el algoritmo y los pesos correspondientes de cada factor.

Se realizan varios ensayos usando cuatro (4), cinco (5) y seis (6) factores de análisis de los identificados como importantes para el origen de MM en el país. Estos ensayos se generan utilizando mapas en formato ráster para representar los factores, con pixeles de tamaño 92.54 m x 92.54 m. en el programa ArcGis. El mapa resultado según el algoritmo que se emplea, es clasificado en cinco clases, desde muy baja hasta muy alta, con rangos obtenidos en intervalos naturales, de igual manera como se representan en el Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Ecuador, a escala 1:1'000.000 (INIGEMM, 2013). El tamaño de los pixeles corresponde a la unidad que permite mejor resolución de acuerdo a la base topografía utilizada.

El algoritmo usado para el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa es generalmente determinado para cada zona de estudio. En Colombia el SGC (2012) identifica el siguiente algoritmo:

$$Sf = 0.5 \text{ (Geomorfología)} + 0.15 \text{ (Geología)} + 0.20 \text{ (Suelos)} + 0.15 \text{ (Cobertura)}.$$

En Perú el INGEMMET (2010) utilizó como algoritmo para el análisis de la susceptibilidad a MM, la siguiente relación:

$$SMM = SCV (0.05) + SHG (0.1) + SGM (0.25) + SP (0.2) + SL (0.4) / 5.$$

Donde:

SMM: Susceptibilidad a movimientos en masa

SCV: Susceptibilidad por cobertura vegetal

SHG: Susceptibilidad por hidrogeología
 SGM: Susceptibilidad por geomorfología
 SP: Susceptibilidad por pendiente
 SL: Susceptibilidad por litología

En Colombia el algoritmo fue usado para elaborar el Mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa (INGEOMINAS, 2001). En Perú, para elaborar el Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa del Perú (INGEMMET, 2010), en cuya validación resulta que el 86% de movimientos en masa, se concentran en las categorías de alta a muy alta susceptibilidad (Villacorta et al., 2012).

Estos algoritmos sirvieron como una guía para la valoración de los factores en la EMC de los ensayos de este trabajo.

4.1 EVALUACIÓN CON CUATRO FACTORES

Para estos ensayos se utilizan los siguientes factores:

- | | |
|--------------------------------------|-------|
| a.) Pendientes del terreno | (Fp) |
| b.) Litología | (FI) |
| c.) Grandes Unidades de Relieves | (Fr) |
| d.) Uso de Suelo y Cobertura Vegetal | (Fuc) |

Se realizan tres ensayos con los cuatro factores enunciados. El primero utiliza el mismo algoritmo identificado en el trabajo de INIGEMM (2013) y los otros dos son variaciones a este.

4.1.1 Ensayo A1

En este ensayo se considera a la pendiente como el factor más influyente en la generación de MM. El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°21 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (1) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,39(Fp) + 0,27(FI) + 0,20(Fr) + 0,14(Fuc)]/4 \quad (1)$$

En el algoritmo se muestra que la pendiente y la litología representan más del 50% del peso de los factores de análisis. La figura N°28 representa la zonificación de la susceptibilidad por MM.

Las clases de susceptibilidad bajas cubren un área de 37.12%, la clase media el 20.93% y las clases altas el 41.95%, del territorio nacional.

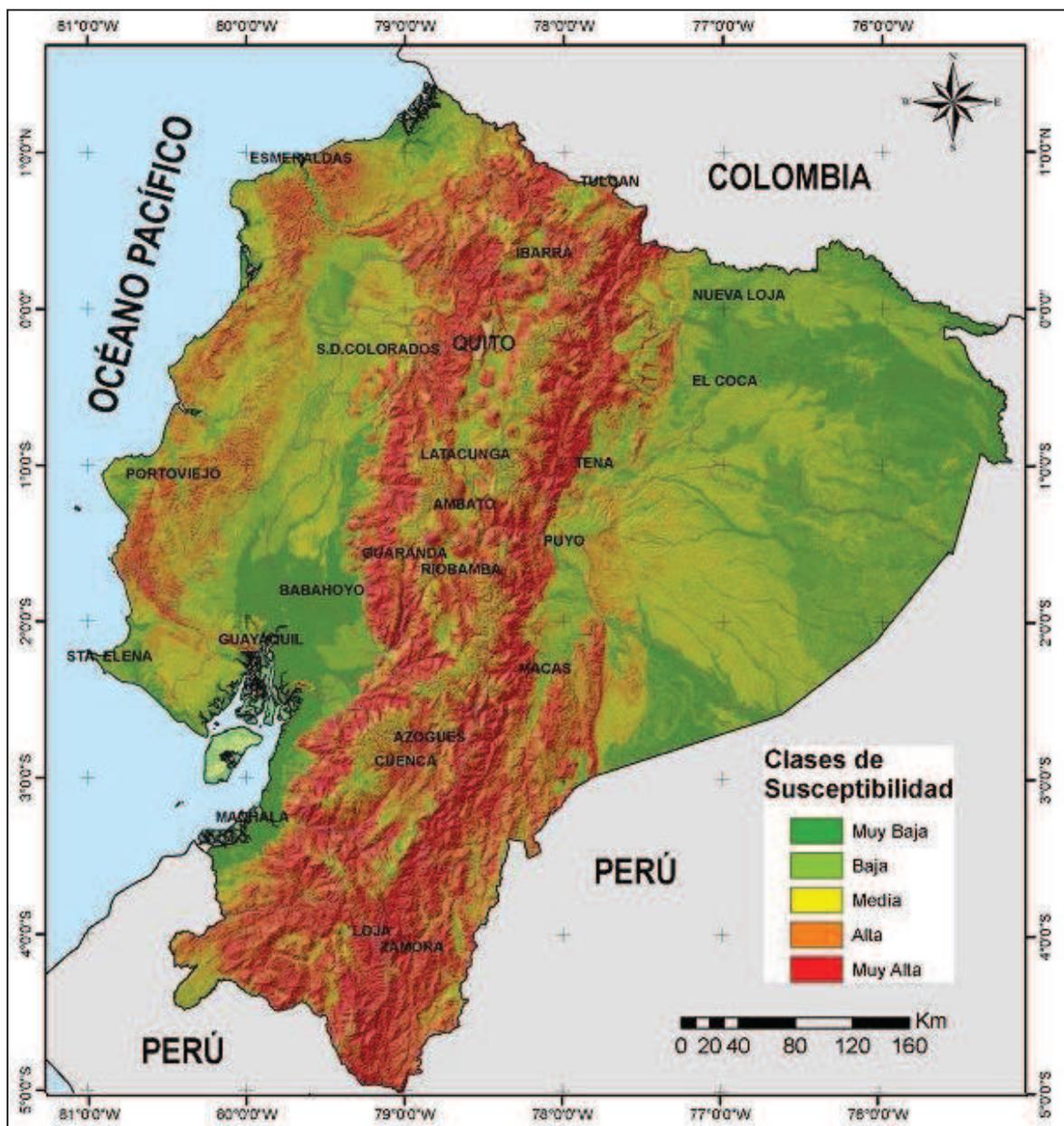


Figura N°28. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A1

La relación entre los movimientos en masa del IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que las clases altas (Figura N°29) contienen el mayor número de MM (87.84%) del total de MM.

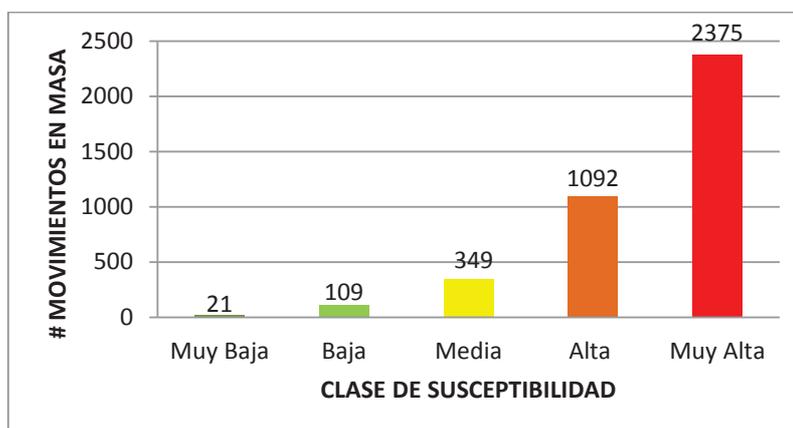


Figura N°29. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A1

4.1.2 Ensayo A2

Mora y Vahrson (1994a) mencionan que el factor litológico probablemente es el factor más relevante en la susceptibilidad por movimientos en masa. Considerando este criterio, este ensayo es una variación del caso anterior y toma en cuenta a la litología como el factor más influyente para la generación de movimientos en masa.

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°22 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (2) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,39(FI) + 0,27(Fp) + 0,20(Fr) + 0,14(Fuc)] / 4 \quad (2)$$

La figura N°30, representa la zonificación de la susceptibilidad en base al algoritmo (2). Las clases de susceptibilidad bajas cubren un área de 33.78%, la clase media el 24.88% y las clases altas el 41.34% del territorio nacional.

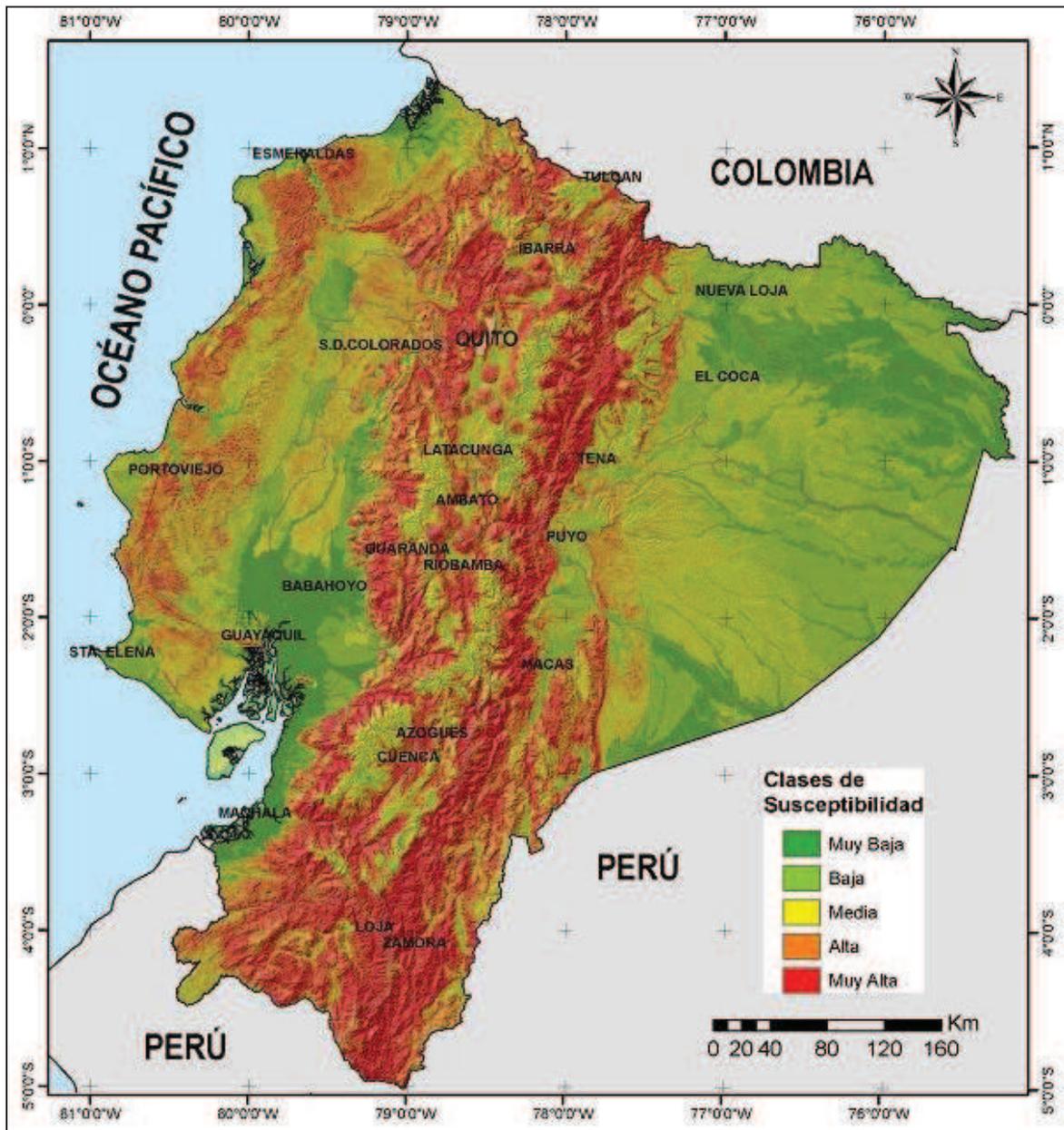


Figura N°30. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A2

La relación entre los movimientos en masa del IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que las clases altas (Figura N°31) contienen el mayor número de MM (86.95%) del total de MM.

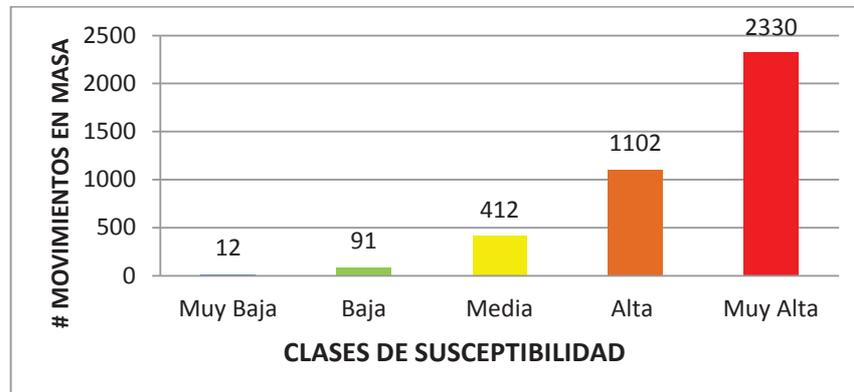


Figura N°31. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A2

4.1.3 Ensayo A3

En el algoritmo que INGEMMET (2010) utilizó para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa, se observa que los factores litología y geomorfología representan el 65% del total de la susceptibilidad. En este ensayo también se consideran a estos dos factores como los más importantes.

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°23 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (3) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,39(FI) + 0,27(Fr) + 0,20(Fp) + 0,14(Fuc)]/4 \quad (3)$$

En el algoritmo se muestra que la litología y unidades de relieve representan el 66% del peso de los factores de análisis. La figura N°32, representa la zonificación de la susceptibilidad por MM. Las clases de susceptibilidad bajas cubren el 32.29% de área del país, la clase media el 28.88% y las clases altas el 38.83%.

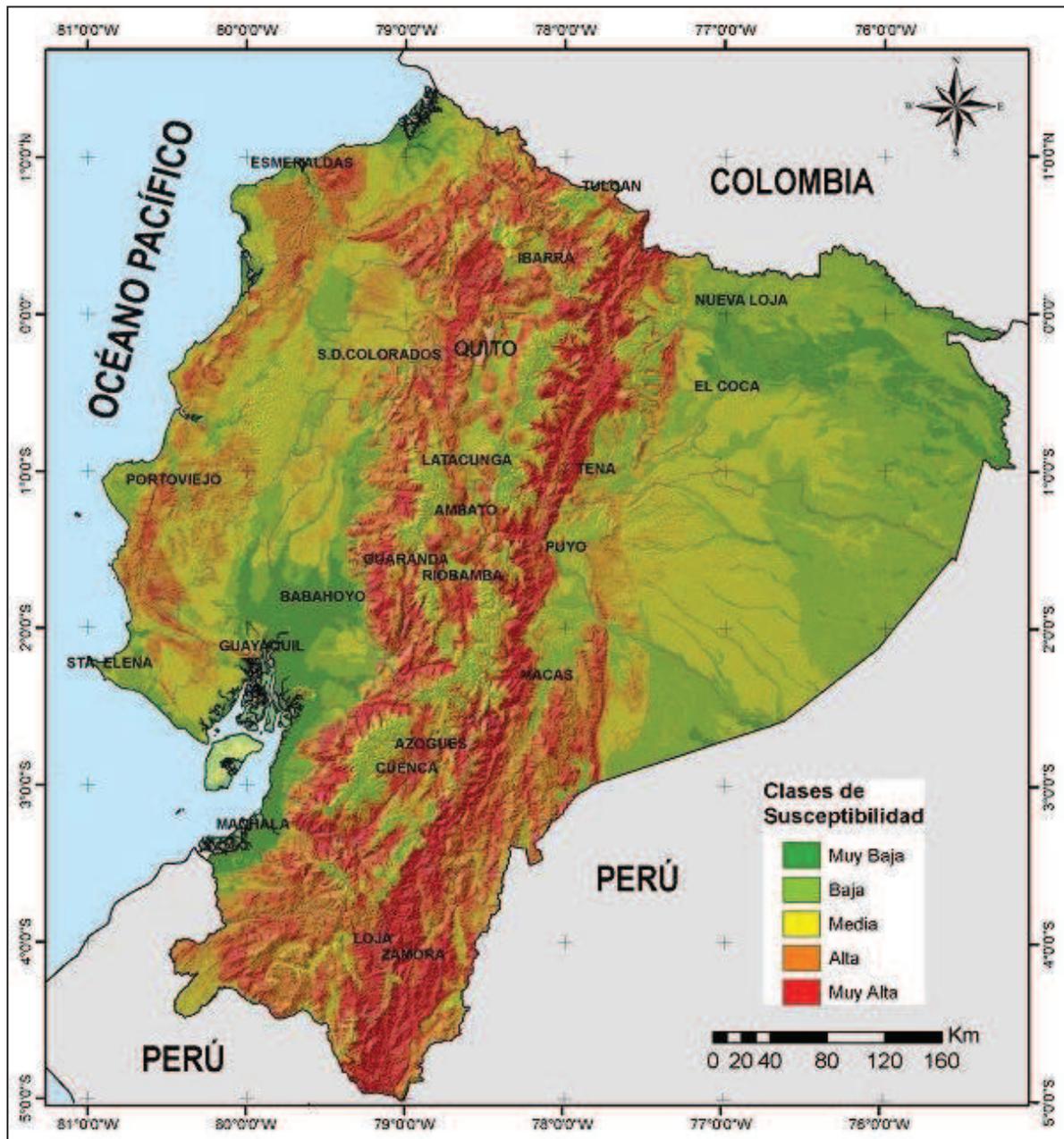


Figura N°32. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: A3

La relación entre los movimientos en masa del IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que las clases altas (Figura N°33) contienen el mayor número de MM (84.39%) del total de MM.

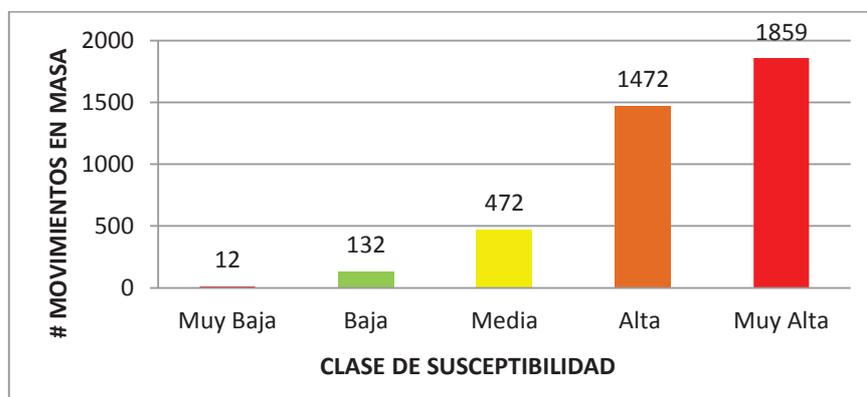


Figura N°33. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: A3

4.2 EVALUACIÓN CON CINCO FACTORES

Para estos ensayos se utilizan los siguientes factores:

- a.) Pendientes del terreno (Fp)
- b.) Litología (FI)
- c.) Grandes Unidades de Relieves (Fr)
- d.) Uso de Suelo y Cobertura Vegetal (Fuc)
- e.) Hidrogeología (Fh)

Se realizan tres ensayos con los factores propuestos. El primero utiliza el mismo algoritmo del trabajo de INIGEMM (2013) y los otros dos son modificaciones a este.

4.2.1 Ensayo B1

Este ensayo considera al factor hidrogeológico el menos influyente en la generación de MM y a los factores pendiente y litología los más importantes.

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°24 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (4) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,32(Fp) + 0,24(FI) + 0,19(Fr) + 0,14(Fuc) + 0.11(Fh)] / 5 \quad (4)$$

La figura N°34, representa la zonificación de la susceptibilidad por MM. Las clases de susceptibilidad bajas cubren el 36.30% de área del país, la clase media el 21.39% y las clases altas el 42.31%.

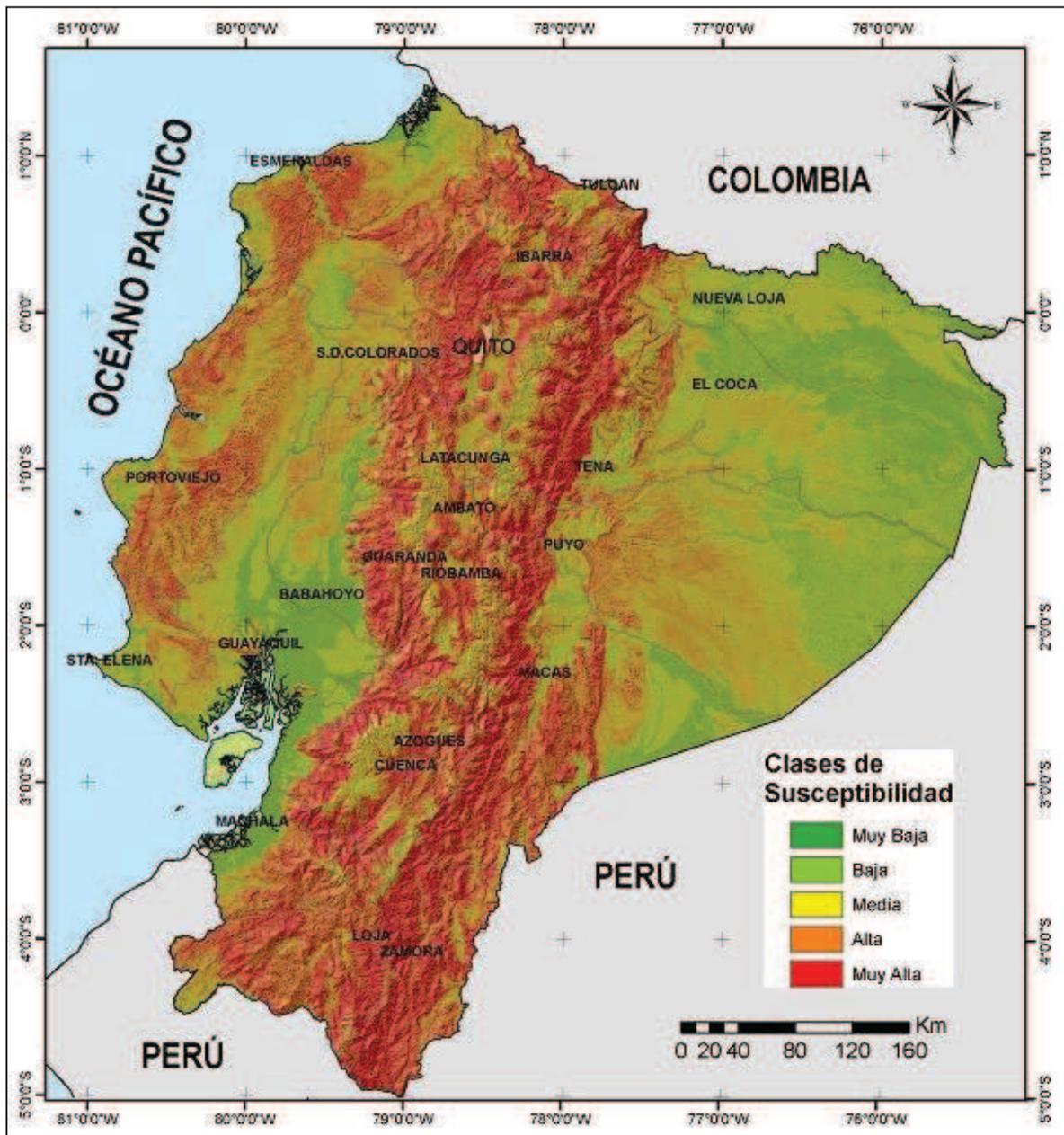


Figura N°34. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B1

La relación entre los movimientos en masa del IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que las clases altas (Figura N°35) contienen el mayor número de MM (87.25%) del total de MM.

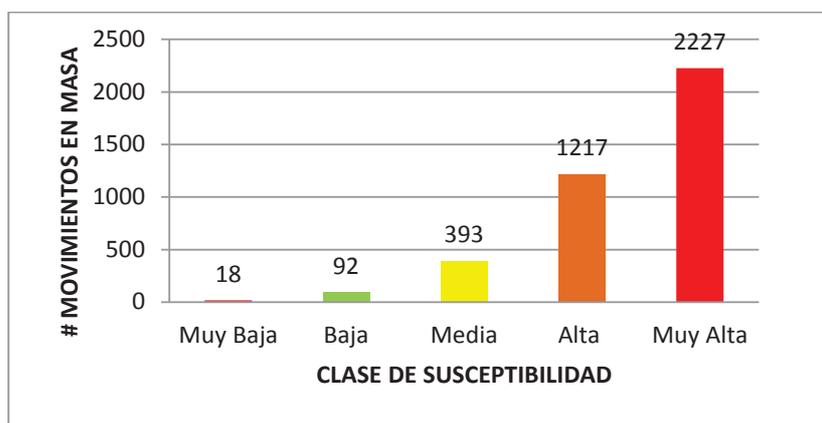


Figura N°35. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B1

4.2.2 Ensayo B2

En esta modificación se considera a la litología como el factor más influyente en la susceptibilidad por MM, y el factor hidrogeológico mayor que el factor uso y cobertura vegetal. El análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°25 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (5) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,32(FI) + 0,24(Fp) + 0,19(Fr) + 0,14(Fh) + 0.11(Fuc)] / 5 \quad (5)$$

La figura N°36 muestra la zonificación de la susceptibilidad por MM. Las clases de susceptibilidad bajas cubren el 37.40% de área del territorio nacional, la clase media el 21.39% y las clases altas el 42.18%.

La relación entre IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que las clases altas son aquellas con el mayor número de MM, representando el 85.76% del total de los MM (Figura N°37).

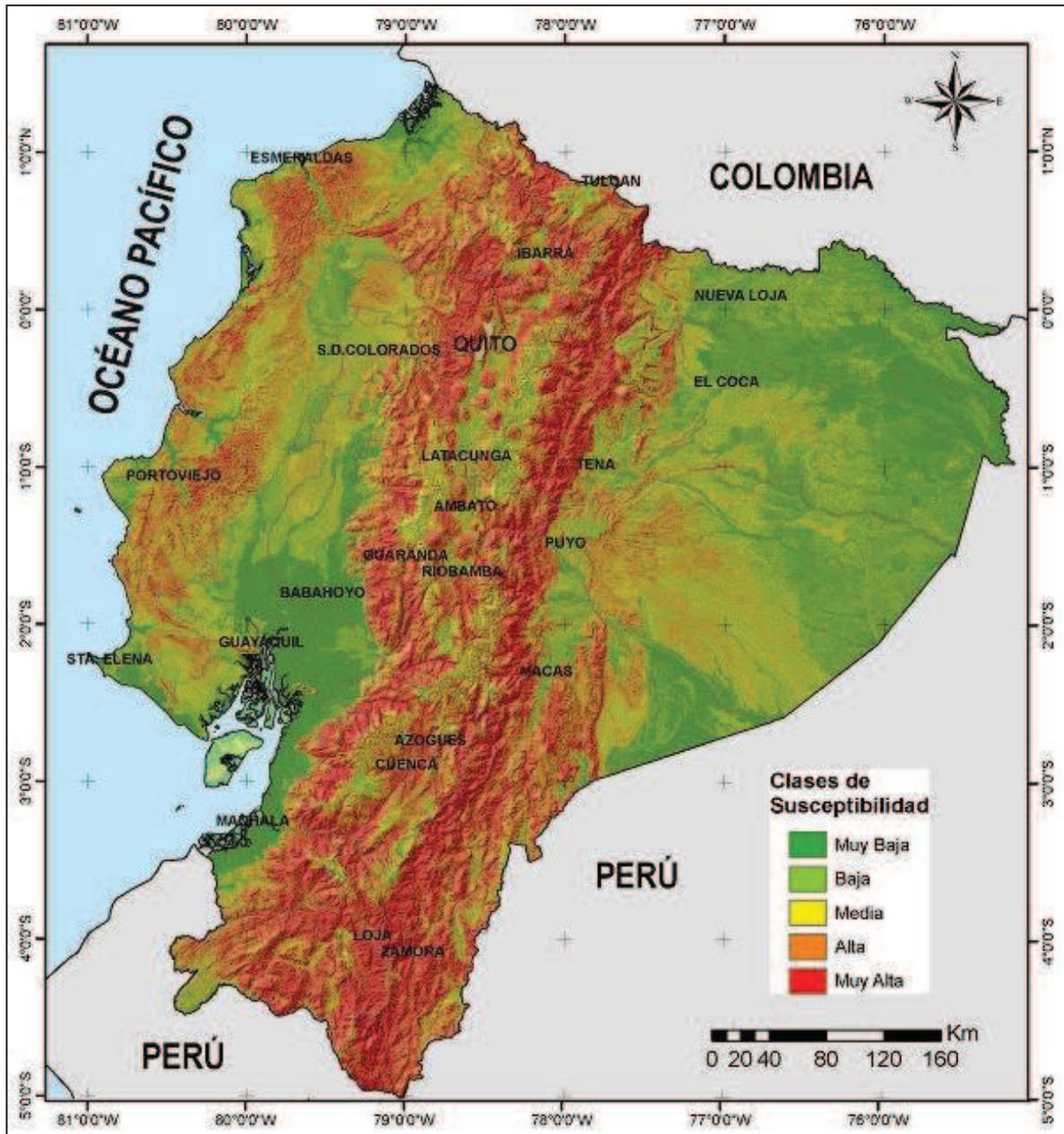


Figura N°36. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B2

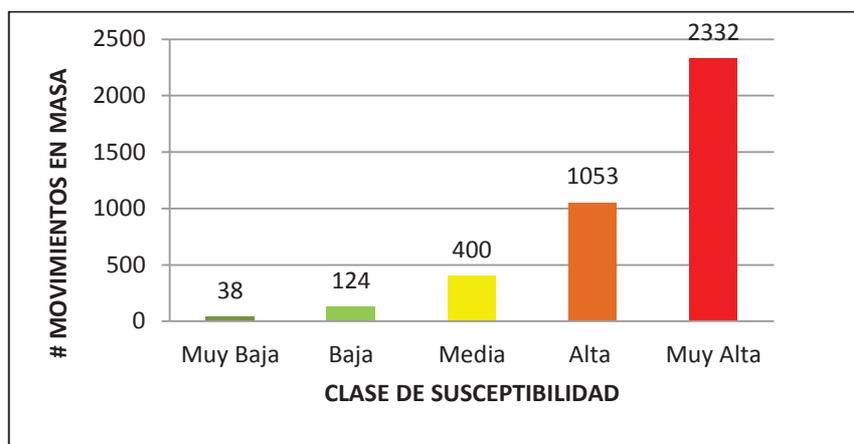


Figura N°37. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B2

4.2.3 Ensayo B3

Este ensayo considera el mismo nivel de importancia dado a los factores en el algoritmo del trabajo de INGEMMET (2010), en el cual el factor hidrogeológico tiene una valoración más alta que la pendiente y uso del suelo.

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°26 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (6) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,32(FI) + 0,24(Fr) + 0,19(Fh) + 0,14(Fp) + 0.11(Fuc)] / 5 \quad (6)$$

La figura N°38 muestra la zonificación de la susceptibilidad por MM, en el cual, el área cubierta por las clases de susceptibilidad bajas es del 30.36%, de la clase media es el 25.36% y de las clases altas el 44.28% del territorio nacional.

La relación entre el IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, indica que el mayor número de MM se encuentra en las clases altas y representan el 85.28% del total de MM (Figura N°39).

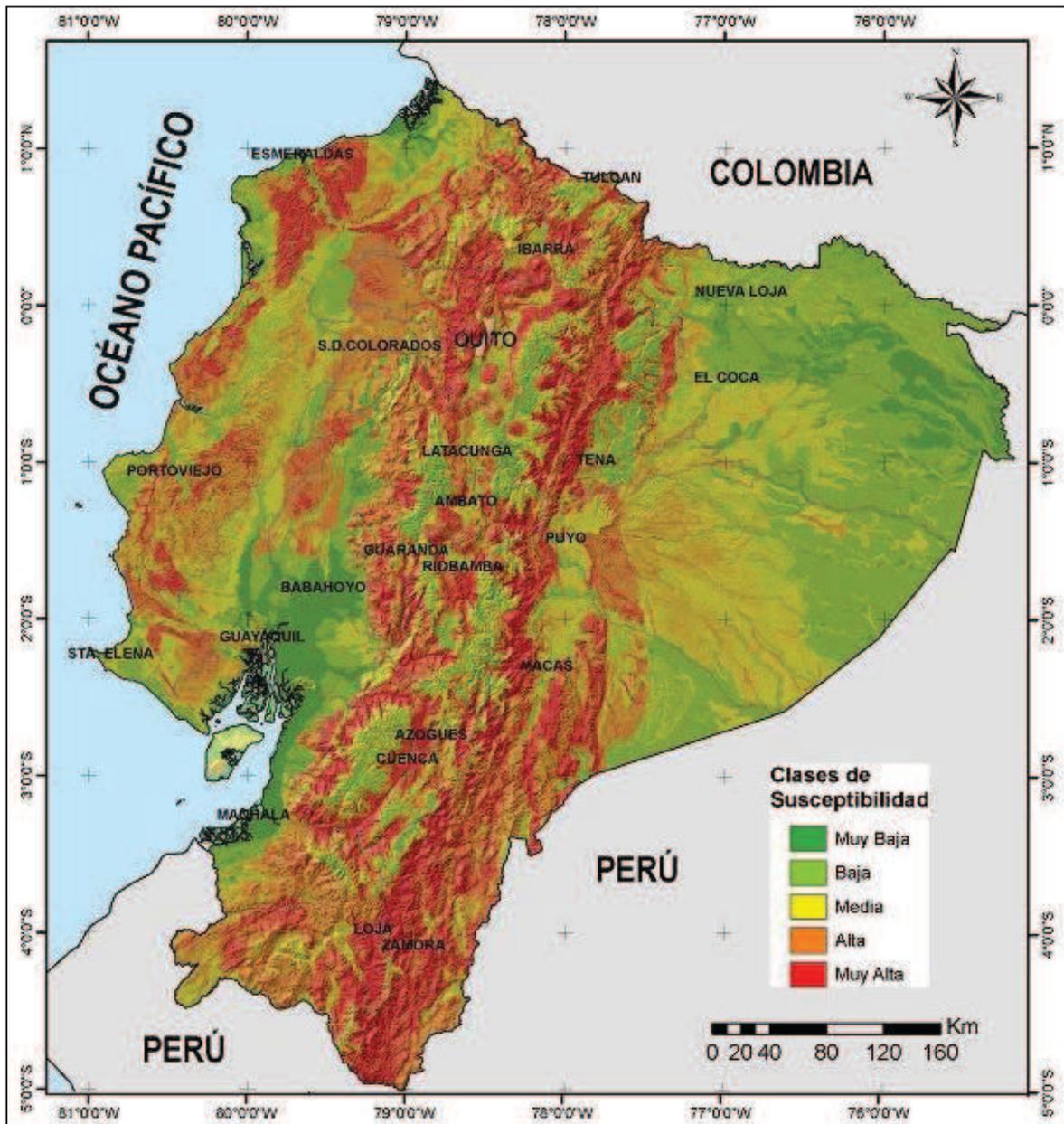


Figura N°38. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: B3

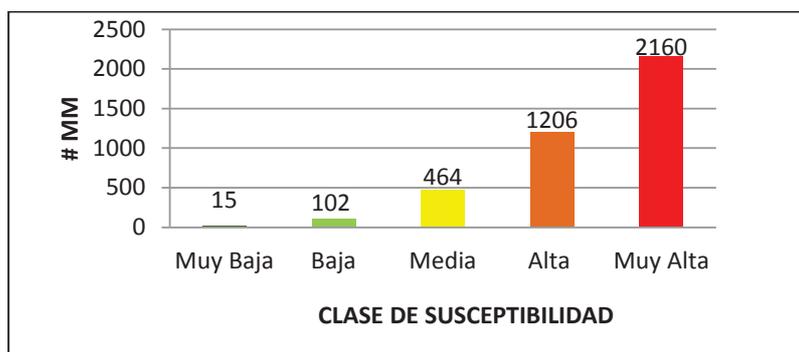


Figura N°39. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: B3

4.3 EVALUACIÓN CON SEIS FACTORES

Para estos ensayos se utilizan los siguientes factores:

- | | |
|------------------------------------------------------|-------------|
| a.) Pendientes del terreno | (Fp) |
| b.) Litología | (FI) |
| c.) Grandes Unidades de Relieves | (Fr) |
| d.) Uso de Suelo y Cobertura Vegetal | (Fuc) |
| e.) Intensidad de Lluvia / Precipitación Media Anual | (FII / Fpr) |
| f.) Aceleración sísmica | (Fa) |

Se realizan dos ensayos. El primero utiliza el factor intensidad de lluvia de forma similar al trabajo del INIGEMM (2013) y el segundo el factor precipitación media anual. En ambos caso se emplea el mismo algoritmo usado en el trabajo de INIGEMM (2013).

4.3.1 Ensayo C1

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°27 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo (7) resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,27(Fp) + 0,22(FI) + 0,11 (Fr) + 0,09(Fuc) + 0.17(FII) + 0.14 (Fa)] / 6 \quad (7)$$

En la figura N°40, se muestra la zonificación de la susceptibilidad por MM. Las clases de susceptibilidad bajas cubren el 40.11% de área del territorio nacional, la clase media el 21.26% y las clases altas el 38.63%.

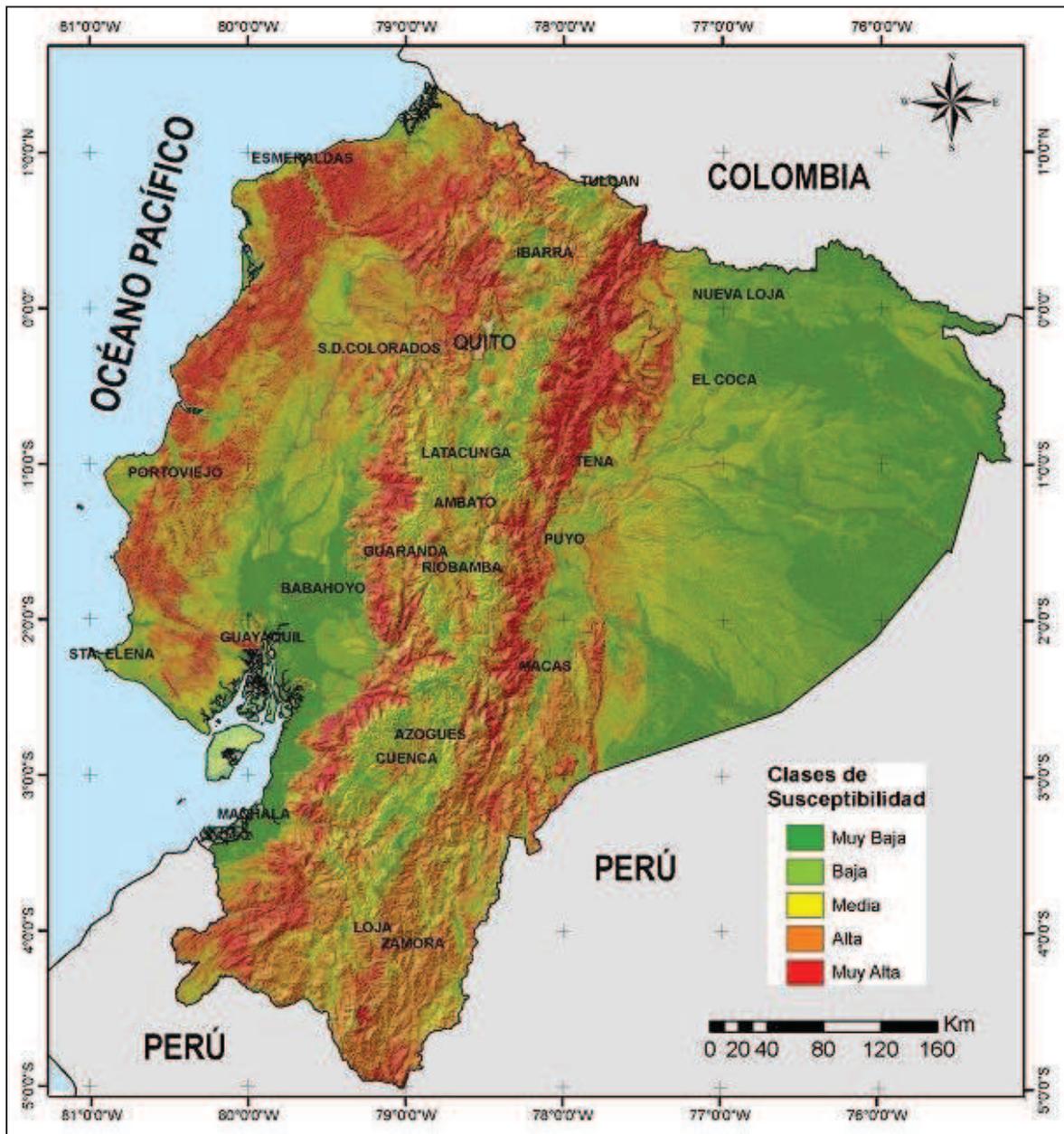


Figura N°40. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: C1

La relación entre el IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas, muestra que la clases altas son aquellas con mayor número de MM, representando el 59.36%, mientras la clase media tiene el 21.27% y las clases bajas el 40.11% (Figura N°41).

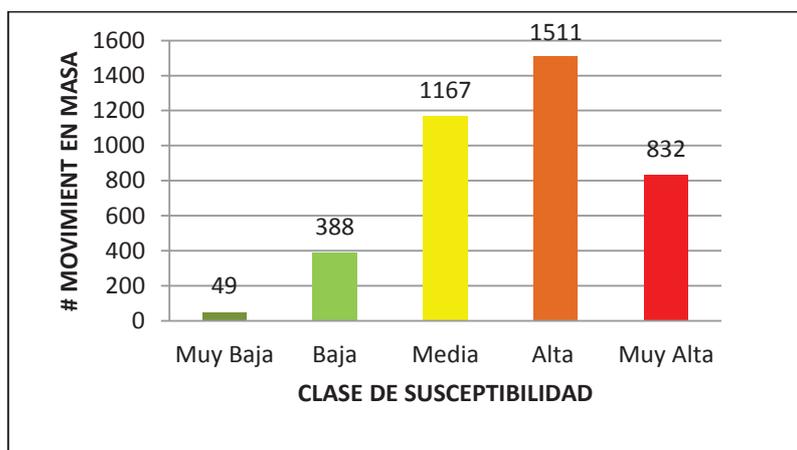


Figura N°41. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: C1

4.3.2 Ensayo C2

Este ensayo es una variación del anterior pues se cambia la representación del factor precipitación, reemplazando la precipitación media anual por la intensidad de lluvia.

El nivel de importancia en el análisis de los pares de factores se indica en la tabla N°28 (Anexo N1), así como los valores de ponderación (W) para cada factor.

El algoritmo resultante de la matriz de jerarquización analítica es el siguiente:

$$SD = [0,27(Fp) + 0,22(FI) + 0,11 (Fr) + 0,09(Fuc) + 0.17(Fpr) + 0.14 (Fa)] / 6 \quad (8)$$

En la figura N°42, se muestra la zonificación de la susceptibilidad por MM. Las clases de susceptibilidad bajas cubren el 35.37% de área del territorio nacional, la clase media el 25.99% y las clases altas el 38.64%.

La relación entre el IMMC (Figura N°6) y las clases de susceptibilidad obtenidas (Figura N°43), muestra que el mayor número de MM se encuentra en las clases altas con el 59.23% del total de MM inventariados.

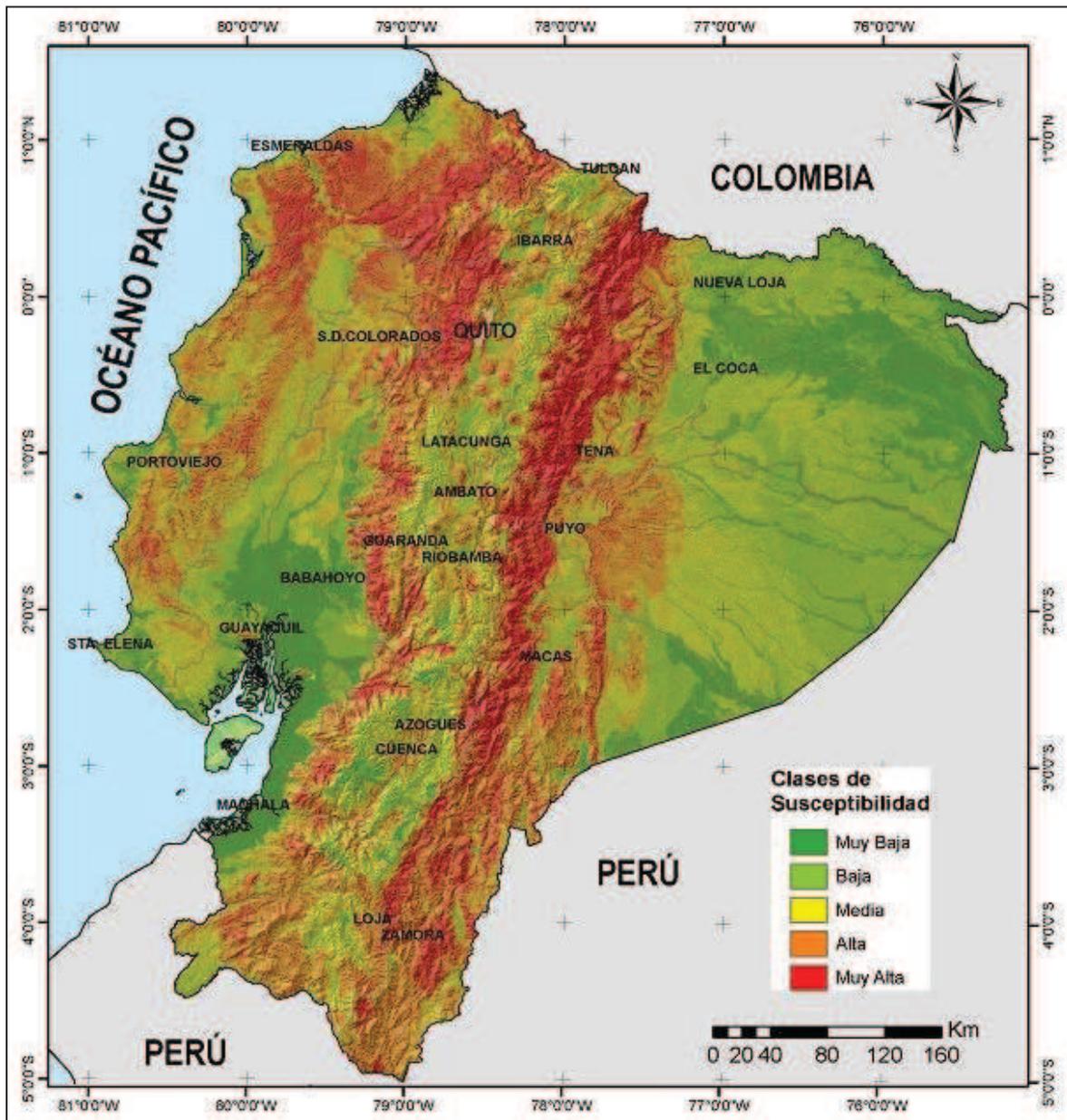


Figura N°42. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa del Ecuador. Ensayo: C2

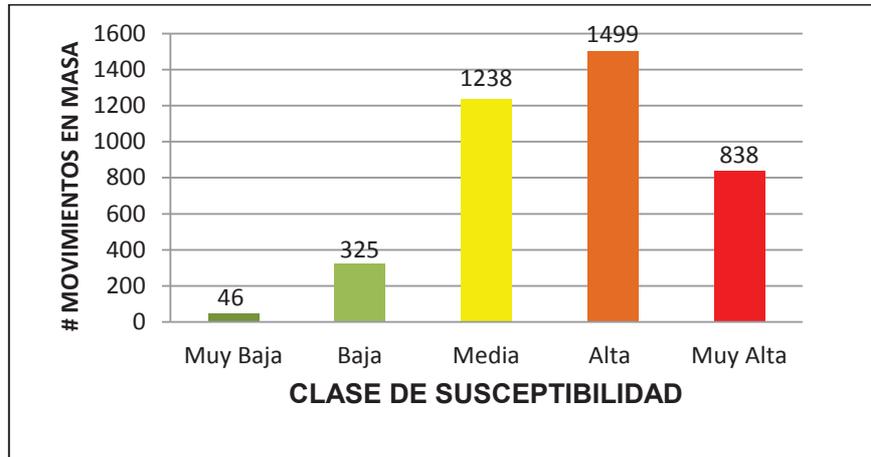


Figura N°43. Relación: Número de MM vs Clase de Susceptibilidad. Ensayo: C2

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

Los mapas de susceptibilidad obtenidos en los ensayos anteriores (Capítulo 4), pueden ser validados mediante un indicador, para lo cual se emplea el MIMM. El JTC-1 (2008) sugiere que al utilizar el mapa inventario de movimientos en masa se deben cuantificar los siguientes tres valores como parte del indicador:

- El porcentaje total de movimientos en masa que se agrupa en cada clase de susceptibilidad.
- El porcentaje del área de cada clase de susceptibilidad en relación al área total de estudio.
- El porcentaje del total del área deslizada que se ubica en cada clase de susceptibilidad.

Se considera que el objetivo de los indicadores de susceptibilidad relativa, generalmente es incluir el mayor número de movimientos en masa en las clases altas de susceptibilidad, tratando al mismo tiempo de alcanzar el mínimo de superficie para estas clases (JTC-1, 2008).

La razón de utilizar indicadores en la validación de un MSMM, es encontrar el mejor resultado que refleje la susceptibilidad a estos fenómenos para las condiciones propias de un terreno determinado, y así poder sugerir estudios a detalle de los lugares que se consideran de alta susceptibilidad. La validación de los resultados permite también comparar las diferentes zonificaciones de un área.

En este trabajo únicamente se cuantifican los dos primeros valores debido a la falta de información del área deslizada para cada uno de los MM. A pesar de que el IMMC es heterogéneo e incompleto, elaborado a partir de trabajos anteriores, con escalas, objetivos y métodos de trabajo diferentes, se lo usa para obtener los valores del indicador, que deben ser considerados como aproximaciones y no como resultados absolutos.

Se hizo una comparación por separado de los ensayos con cuatro, cinco y seis factores para determinar el que concuerda mejor con los criterios del indicador. Después se analizaron los tres ensayos escogidos y se determinó cual es el que representa mejor la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

5.1 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON CUATRO FACTORES

Se consideraron los resultados de los tres ensayos con cuatro factores, que se exponen en la tabla N°29 y tabla N°30 (Anexo N1). Las figuras N°44 y N°45 muestran la distribución de los movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad y el área que representan respecto al área total de estudio, para los tres ensayos.

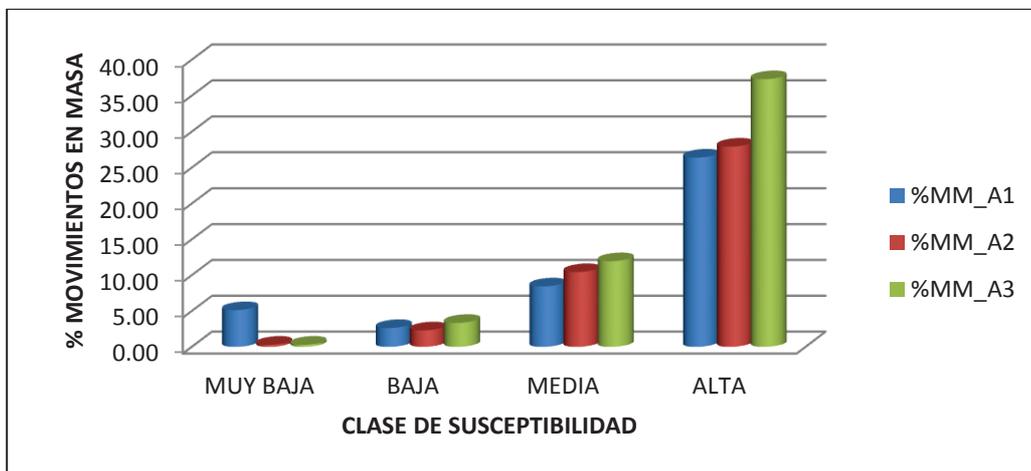


Figura N°44. Relación: Porcentaje de MMvsClase de Susceptibilidad (4 Factores)

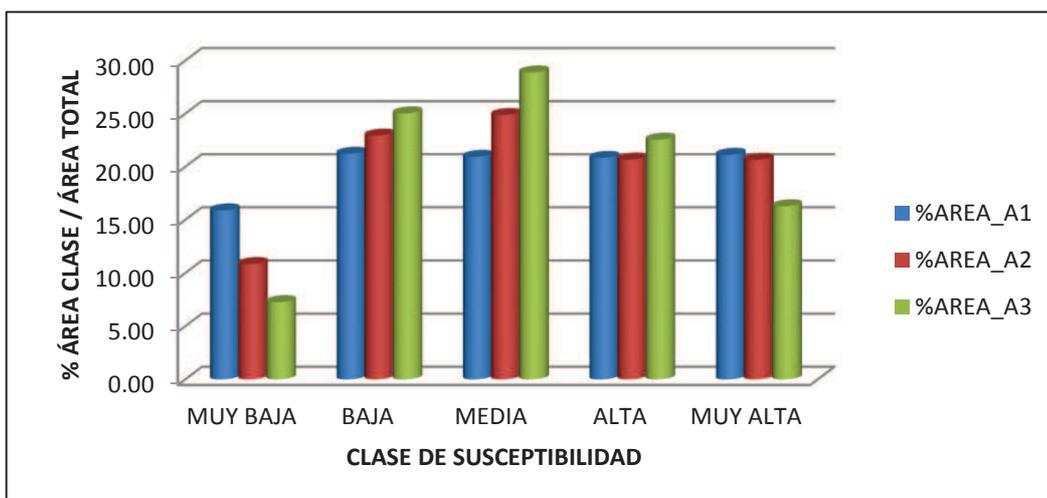


Figura N°45. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (4 Factores)

Los resultados del **Ensayo A3** se aproximan mejor a las condiciones del indicador.

5.2 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON CINCO FACTORES

Se consideraron los resultados de los tres ensayos con cinco factores, que se exponen en la tabla N°31 y tabla N°32 (Anexo N1). Las figuras N°46 y N°47 muestran la distribución de los movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad y el área que representan respecto al área total de estudio, para los tres ensayos.

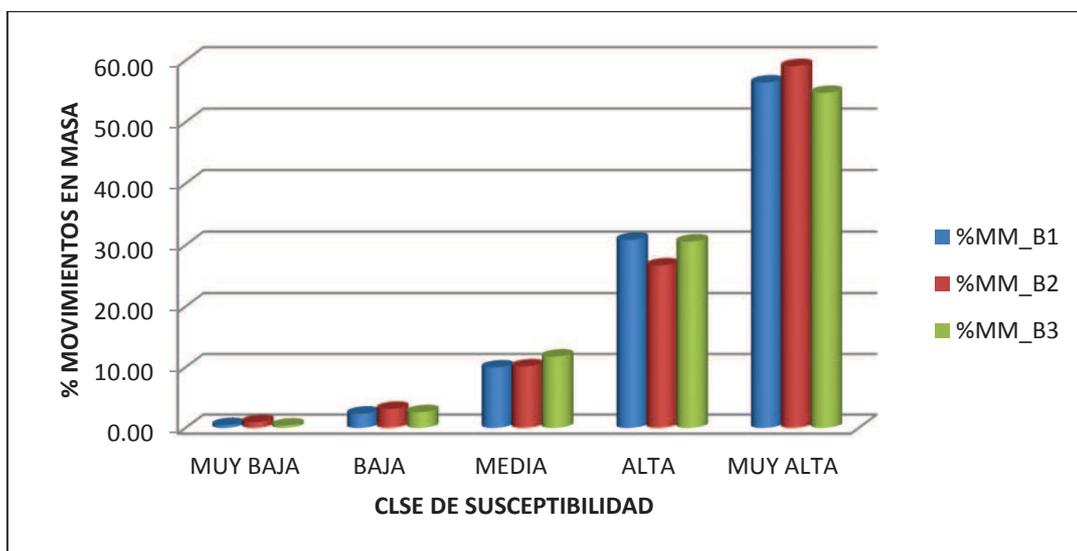


Figura N°46. Relación: Porcentaje de MMvsClase de Susceptibilidad (5 Factores)

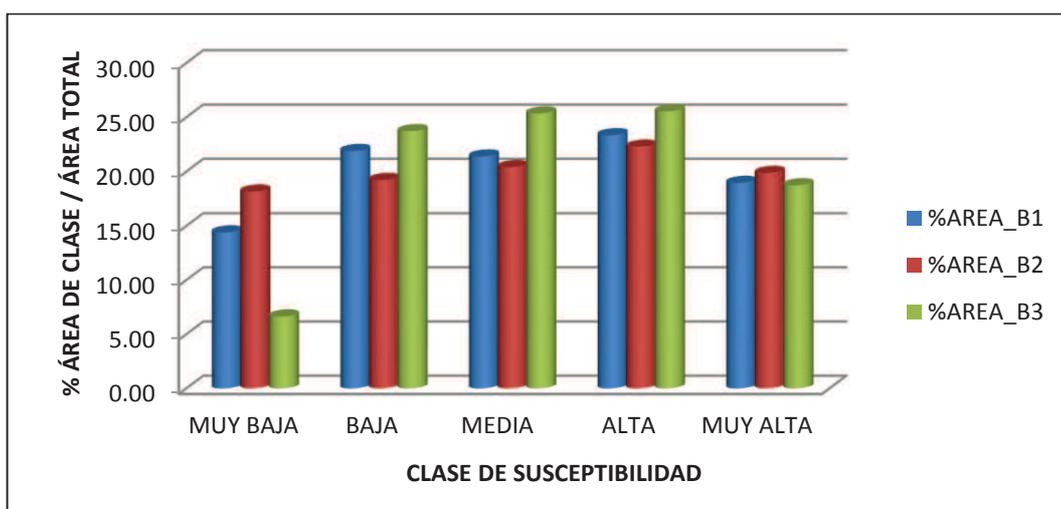


Figura N°47. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (5 Factores)

Analizado los resultados, se determina que el **Ensayo B2** se aproxima mejor a las condiciones del indicador.

5.3 VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS CON SEIS FACTORES

Se consideraron los resultados de los dos ensayos con seis factores, que se exponen en la tabla N°33 y tabla N°34 (Anexo N1). Las figuras N°48 y N°49 muestran la distribución de los movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad y el área que representan respecto al área total de estudio, para los tres ensayos.

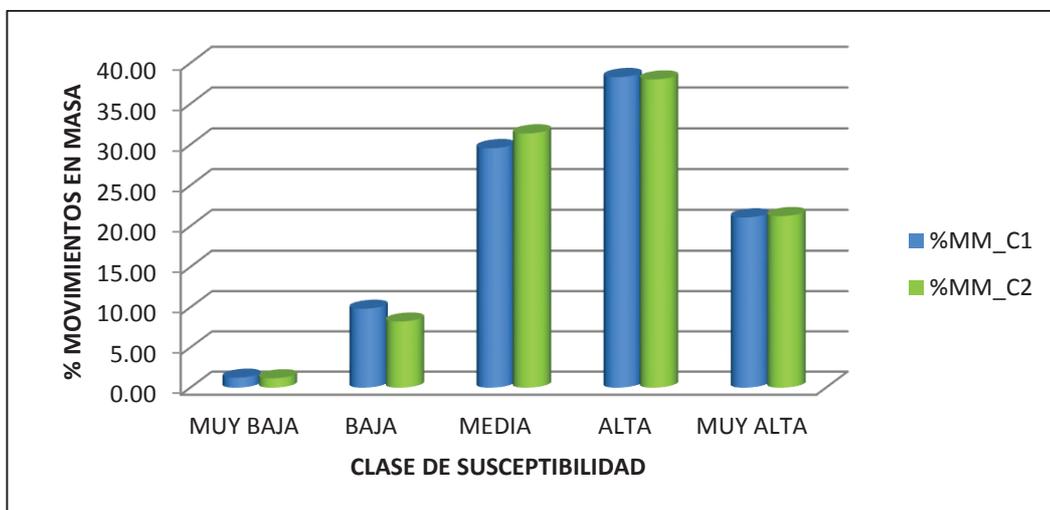


Figura N°48. Relación: Porcentaje de MMvsClase de Susceptibilidad (6 Factores)

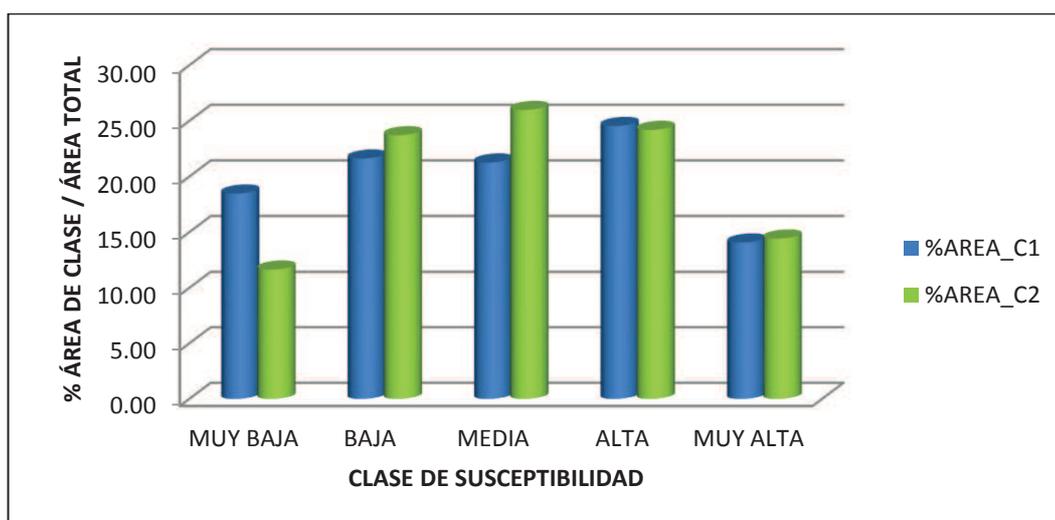


Figura N°49. Relación: Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (6 Factores)

Analizando los resultados, se determinó que el **Ensayo C1** se aproxima mejor a las condiciones del indicador.

5.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los ensayos A3, B2 y C1, se aproximan mejor a las condiciones del indicador. Para compararlos se consideran los valores de la tabla N°35 y tabla N°36 (Anexo N1). La figura N°50 y figura N°51, muestran las distribuciones de los movimientos en masa de cada clase de susceptibilidad y el área que representan respecto al área total.

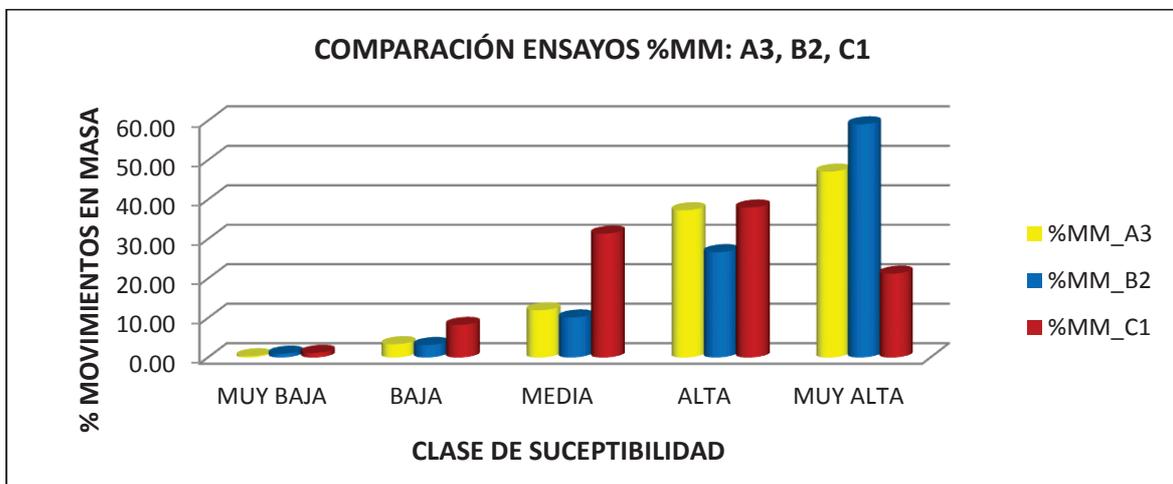


Figura N°50. Porcentaje de MM vs Clase de Susceptibilidad (Ensayos: A3, B2, C1)

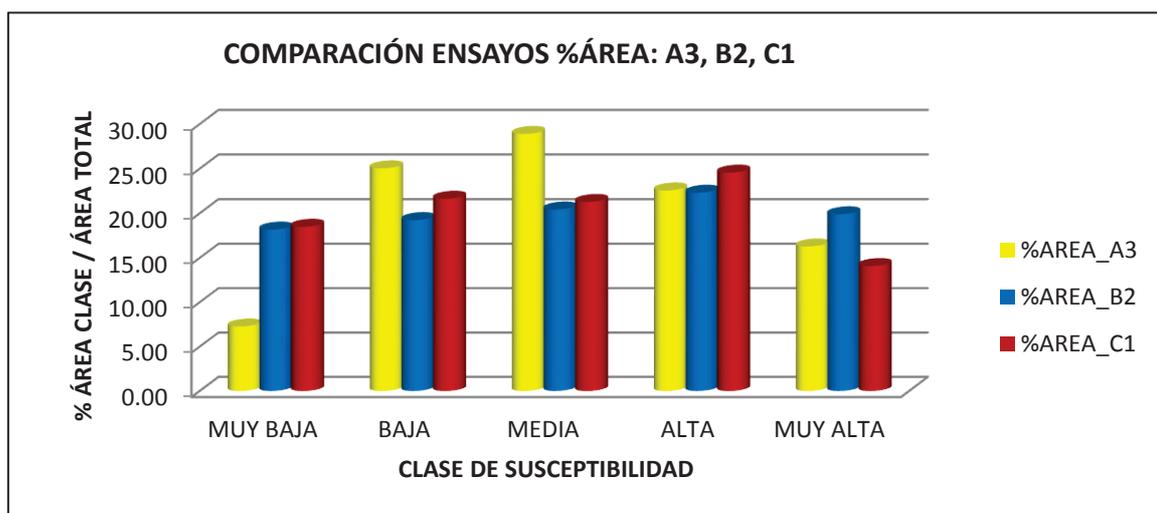


Figura N°51. Porcentaje del Área vs Clase de Susceptibilidad (Ensayos: A3, B2, C1)

La comparación entre los tres ensayos, considerando los dos criterios de evaluación del indicador; muestra que el **Ensayo A3**, el cual utiliza el algoritmo (3) se aproxima mejor a las condiciones del indicador.

5.5 VALIDACIÓN DEL MSMME CON EL IMM DEL PROYECTO PRECUPA

Una validación de los resultados del ensayo A3 con el inventario de MM del Proyecto PRECUPA (Almeida et al, 1996), se realizó con el objetivo de determinar la calidad del resultado que se obtuvo en el ensayo A3 en esta zona; donde se tiene un inventario sistemático que fue elaborado en campo y por interpretación de fotografías e imágenes satelitales, dándole un mayor nivel de confianza y calidad a la base de datos de los MM (Figura N°52).

En la figura N°53, resultado de la sobreposición de los mapas IMM de PRECUPA (Almeida et al, 1996) y las clases de susceptibilidad del ensayo A3, se puede observar que las clases alta y muy alta contienen el mayor porcentaje de MM (83.56%). Este resultado muestra que la valoración de los factores y su ponderación según su nivel de importancia, se ajusta bien a las condiciones en esta área, considerando los criterios del indicador escogido.

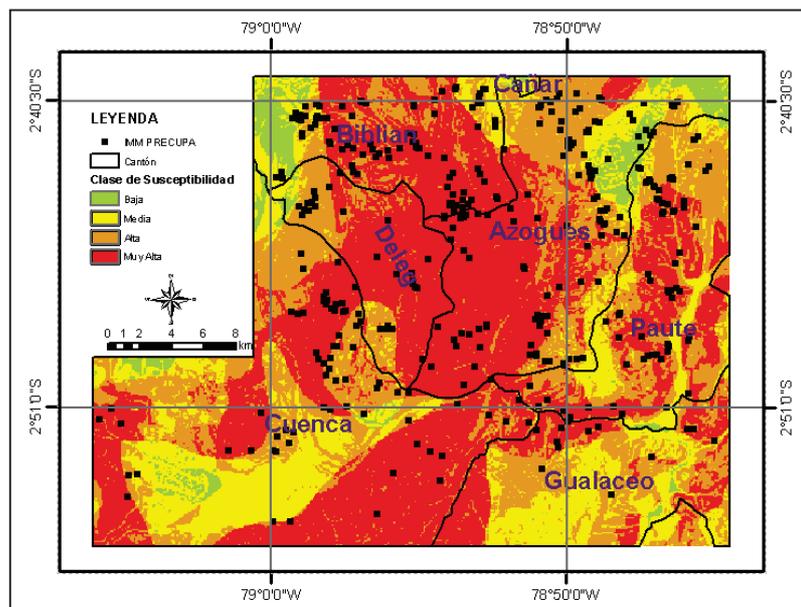


Figura N°52. MSMM vs IMM – Proyecto PRECUPA

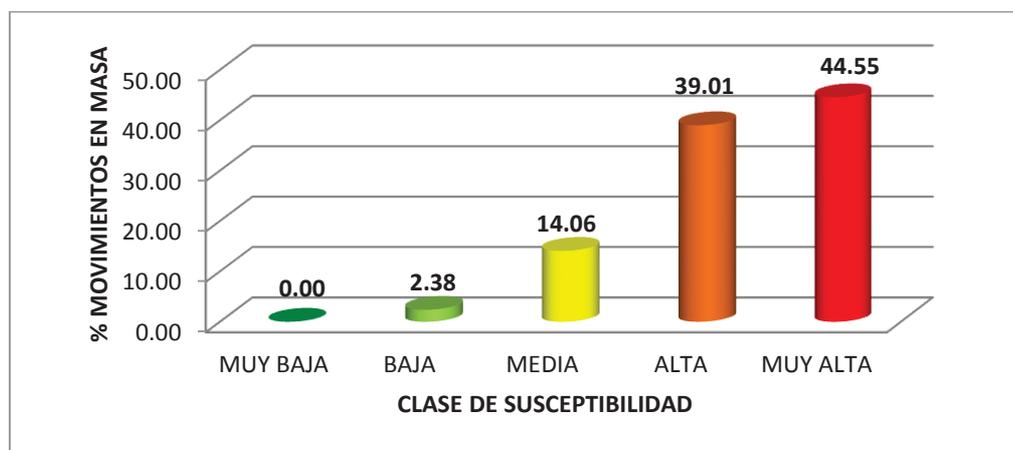


Figura N°53. Relación: Porcentaje de MM - Proyecto PRECUPA vs Clase de Susceptibilidad MSMME

5.6 CARACTERÍSTICAS DE LAS CLASES DE SUSCEPTIBILIDAD DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL ECUADOR (MSMME)

Los resultados del ensayo A3 representan la zonificación de la susceptibilidad por MM del Ecuador. La delimitación de las clases de susceptibilidad en el mapa es referencial y no un valor absoluto (Anexo N4). Las características de las cinco clases se describen a continuación:

Susceptibilidad Muy Baja.- Zonas relativamente estables, zonas planas a poco inclinadas, con pendientes menores a los 4°, representa el 7, 26% de la superficie del territorio; está presente en unidades de grandes relieves con geformas como llanuras y depresiones costaneras, llanuras inundables, suelos aluviales, pantanos, valles fluviales, fondos de cuencas interandinas, etc.; la composición litológica corresponde a lavas basálticas y rocas ultra básicas no meteorizadas. Estas áreas pueden estar cubiertas por cuerpos de agua como en camaroneras, humedales, manglares, también por bancos de arena o bosque natural. En esta clase se podría esperar la generación de movimientos en masa pequeños como flujos o esparcimientos laterales durante el fenómeno de El Niño principalmente en la región costa y por socavamiento y erosión fluvial, en la Región Oriente. (INIGEMM, 2013)

Susceptibilidad Baja.- Zonas relativamente estables, representa las planicies altas con pendientes entre los 4° a 8°, representa el 25,03% del área del territorio nacional;

está presente en unidades de grandes relieves con geoformas como las colinas bajas-medianas de la Costa y Oriente, las llanuras bajas costaneras, las llanuras de páramo dominados por glaciaciones, las terrazas pantanosas e indiferenciadas del Oriente, las partes finales de los conos de deyección salientes, etc.; la composición litológica corresponde a arcillas marinas de estuario, flujos de lava y piroclastos andesíticos a riolíticos, volcanoclastos consolidados y materiales sedimentario de grano medio a fino con poca meteorización. Estas áreas pueden estar cubiertas por cultivos de palma, cierto tipo de pasto cultivado, vegetación arbustiva y bosque natural. En esta clase se pueden generar movimientos en masa pequeños causados por erosión fluvial y socavamiento tanto en la región Costa y Oriente.

Susceptibilidad Moderada.- Zonas con estabilidad moderada, representa laderas con inclinaciones entre los 8° y 16°, representa el 28.88% del área del territorio nacional; está presente en unidades de grandes relieves con geoformas como las colinas occidentales periandinas, los corredores y algunas depresiones subandinas, gargantas fluviales recientes, las mesas costaneras, la sección media de conos de deyección, etc.; la composición litológica corresponde a los melanges ofiolíticos, esquistos y gneises semipelíticos, pórfidos con algo de alteración, abanicos aluviales, volcanoclastos semisueltos. Estas áreas pueden estar cubiertas por bosques intervenidos, naturales o plantados, arboricultura tropical, asentamientos urbanos, etc. En esta clase se han generado movimientos en masa frecuentes, originados por sismos y lluvias. El Deslizamiento de El Tambo se encuentra en esta clase.

Susceptibilidad Alta.- Zonas inestables, representa laderas con inclinaciones fuertes a abruptas con pendientes entre los 16° y 35°, representa el 22.55% del área del territorio nacional; está presente en unidades de grandes relieves con geoformas como las cuevas fuertemente erguidas de las cordilleras costeras el contrafuerte subandino, los corredores de Cosanga, Macas-Méndez y Limón –Gualaquiza, también los macizos y contrafuertes de la Sierra Sur, los conos volcánicos, los flancos externos de la cordillera de los Andes, etc.; la composición litológica corresponde a turbiditas finas, terrazas poco compactas de conglomerados, arenas y lutitas, lahares, escombros de avalanchas, fisuradas y meteorizadas, granodioritas y calizas. Estas

áreas pueden estar cubiertas por cultivos indiferenciados o ser zonas descubiertas erosionadas. En esta clase se han generado grandes movimientos en masa en el pasado, por ejemplo Pacha (2004) en la provincia de Chimborazo y El Tambo (s/f) en la provincia de Cañar, que formaron represamientos de los ríos (INIGEMM, 2013); aquí son frecuentes todos los tipos de movimientos en masa; las condiciones del relieve, el tipo de material, la mala intervención del uso del suelo suelen ser factores que favorecen mucho los movimientos en masa y, esto se percibe aun más en tiempos de lluvias y en la ocurrencia de sismos. Algunos movimientos en masa históricos ubicados en esta clase son: El deslizamiento de Cacha (1797) y el Avalancha de Detritos de Las Moras (1985).

La construcción de obras de infraestructura y su mantenimiento en estas zonas requieren de estudios detallados con medidas de prevención, correctivas o de control (INGEMMET, 2010).

Susceptibilidad Muy Alta.- Zonas muy inestables, representa laderas con pendientes muy fuertes, superiores a los 35°, representa el 16.28% del área total del territorio nacional; está presente en unidades de grandes relieves con geoformas como los relieves accidentados de las Cordilleras Cutucú y El Cóndor, los relieves fuertes interandinos y las vertientes exteriores occidental y oriental; la composición litológica corresponde a terrazas con intercalaciones de sedimentos fluviales, materiales finos, abanicos volcánicos, lahares, y rocas metamórficas (esquistos, gneises, migmatitas y cuarcitas). Estas áreas pueden estar cubiertas por cultivos de ciclo corto. Macro y mega movimientos en masa han ocurrido en esta clase, por ejemplo, los deslizamientos del Volcán El Reventador (1987); el deslizamiento de La Josefina (1993); el deslizamiento de Guarumales (s/f); el deslizamiento y represamiento del Río Pisque (1990), que causaron pérdidas humanas y económicas en el país.

5.7 DETERMINACIÓN DE ZONAS CON SUSCEPTIBILIDAD A MM

En el mapa de susceptibilidad a MM del ensayo A3 escogido como el MSMME en este trabajo, las áreas con susceptibilidad alta y muy alta cubren el 38.83% del

territorio nacional. Para determinar las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa con respecto a la distribución jurisdiccional del Ecuador, se sobrepuso el mapa de cantones del país (IGM, 2011) al MSMME y se ubicaron aquellos cantones cuya susceptibilidad es alta y muy alta (Figura N°54).

La información a nivel cantonal se utiliza porque permite trabajar a un nivel de escala media, lo cual resulta en mapas mucho más manejables por equipos interdisciplinarios.

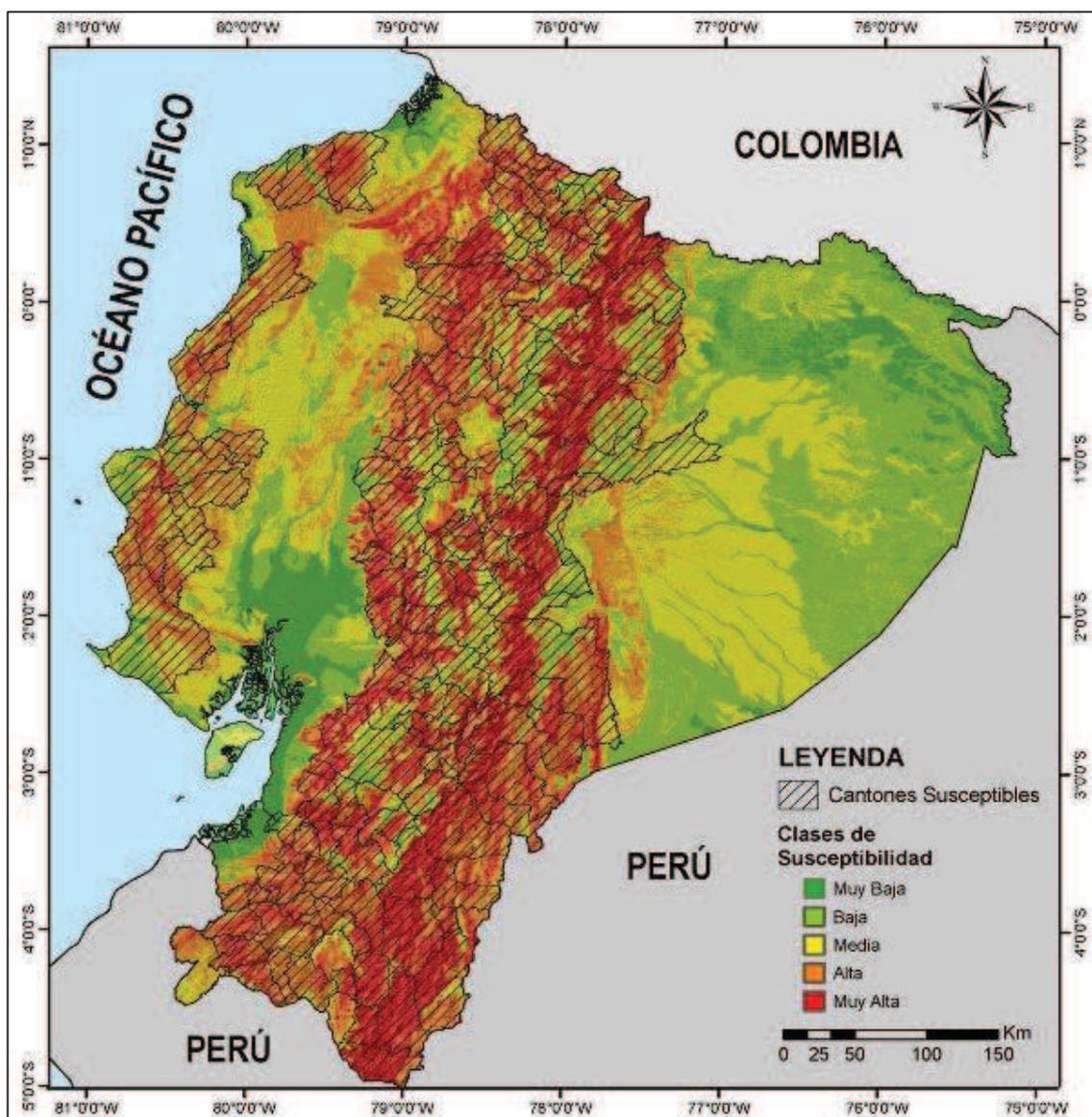


Figura N°54. Cantones con zonas de susceptibilidad alta y muy alta.

Estos cantones se pueden agrupar en las siguientes franjas:

a.) A lo largo de las cordilleras costeras, en los cantones Santa Elena, Jipijapa, San Vicente, Pedernales, el lado oeste de Quinindé, Atacames, Esmeraldas y Río Verde.

b.) A lo largo de la Cordillera Occidental, en los cantones de Ibarra, San Miguel de Urququí, Cotacachi, el costado este de Eloy Alfaro, Quito, Mejía y Sigchos al norte. Desde el centro hacia el sur en la vertiente externa de la misma cordillera, en los cantones Pujilí, Pangua, Guaranda, Caluma, Chimbo, San Miguel, Chillanes, Pallatanga, Alausí, Chunchi, Cañar, el lado oeste de Cuenca, Santa Isabel y Pucará

c.) A lo largo de las cuencas intramontañosas al sur, en los cantones de Azogues, Paute, Sevilla de Oro, El Pan, el lado este de Cuenca, Girón, Nabón y Saraguro.

d.) En el Bloque Amotape-Tahuín, en los cantones de Santa Rosa, Atahualpa, Zaruma, Portovelo, Loja, Piñas, Marcabelí, Las Lajas, Chaguarpamba, Olmedo, Catamayo, Puyango, Paltas, Gonzanamá, Pindal, Celica, Macará, Sozoranga, Calvas y Espíndola.

e.) En el Callejón Interandino, en las zonas donde la pendiente es mayor a los 16 grados, por ejemplo en los cantones de Tulcán, Bolívar, Montufar, Pimampiro, Otavalo, Pedro Moncayo, Cayambe, Salcedo, Ambato, Riobamba, Colta y Guamote.

f.) A lo largo de las vertientes externas de la Cordillera Real, en los cantones de Sucumbíos, Gonzalo Pizarro, El Chaco, Quijos, Archidona, Tena, Baños de Agua Santa, Palora, Pablo Sexto.

g.) A lo largo de la Cordillera Cutucú y flanco este de la C. Real, en los cantones Morona, Sucúa, Logroño, Santiago, Limón Indanza y San Juan Bosco.

h.) A lo largo de la Cordillera El Cóndor, en los cantones de Gualaquiza, El Pangui, Yantzaza, Yacuambi, Centinela del Cóndor, Zamora, Nangaritza, Palanda y Chinchipe.

i.) El Levantamiento Napo en los cantones El Chaco y Loreto y la Depresión del Pastaza en el cantón Pastaza.

Una comparación entre el Mapa de Niveles de Amenaza de deslizamientos por cantones en el Ecuador de INFLOPLAN, IGM, IRD presentado en (D'Ercole y Trujillo,

2003) y el de la figura N°52 de este trabajo, no muestran diferencias. Ambos mapas indican que las zonas con mayor susceptibilidad se encuentran a lo largo de los ejes montañosos del país (Cordillera Occidental y Oriental y partes del Valle Interandino), así también que los cantones ubicados en zonas de susceptibilidad alta están en la región Costa a lo largo de las cordilleras de la misma.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La primera actividad que se debe desarrollar en la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa es, determinar los factores que intervienen en la generación de los FRM y segundo, escoger el método de análisis más adecuado según el objetivo del trabajo.

La escala regional utilizada en este trabajo permitió un estudio básico, en el cual se elaboró un inventario de movimientos en masa cartográfico que fue utilizado para calibrar y verificar los resultados obtenidos.

- El IMMC consta de 3947 MM, es incompleto, no tiene un desarrollo sistemático, no fue comprobado en campo ni con interpretación de fotografías aéreas o imágenes satelitales; sin embargo, se lo utiliza en el análisis y evaluación de la susceptibilidad por MM para obtener los valores del indicador.

El IMMC muestra que las provincias con mayor índice de MM se ubican en la región Sierra y son: Loja, Cañar, Chimborazo y Azuay y que las lluvias son el factor desencadenante más importante en la generación de MM en el país, seguidos por los sismos y la naturaleza del material.

El IMMC tiene 1959 MM con información sobre el área que involucra cada fenómeno, el 24.80% tiene un área menor a 0.1 km^2 , el 18.65% entre 0.1 km^2 y 1 km^2 , el 5.85% entre 1 y 10 km^2 y el 0.33% representa áreas mayores a 10 km^2 . Sin embargo, 1988 MM (50.37%) no poseen esta información.

El IMMC cuenta con 1596 MM con información del estado de actividad, el 23.54% son activos, el 8.56% son latentes, el 4.21% son relictos, el 2.38% son estabilizados, el 1.11% son inactivos, el 0.51% son reactivados y el 0.13% están suspendido, y 2351 MM no poseen esta información y representan el 59.56% del total de MM.

- El IMMD consta de 3231 MM. Un análisis anual y mensual de estos datos, permite afirmar que durante los años del Fenómeno El Niño, el país registra un incremento de MM respecto a años no Niño y, los meses de mayor ocurrencia son los de la estación de invierno (febrero, marzo y abril).

El IMMD determina que las lluvias son la primera causa de generación de MM en el país, seguida por las condiciones litológicas y las actividades antrópicas, y las provincias con mayor registro de MM son Manabí, Loja, Pichincha y Zamora Chinchipe.

En el IMMD, la causa específica de la generación de MM desde el año 2010 no es clara, únicamente se puede concluir que en los últimos años la recopilación de la información ha mejorado.

Las condiciones climáticas del año Niño 1982-1983, muestran el punto más alto de precipitación media anual dentro del período 1970-2011 y el menor número de MM registrado de los cuatro años picos considerados. Las causas de esta anomalía pueden ser: errores de toma de datos de la precipitación o falta de interés en el registro de los MM generados.

En general las curvas de precipitación media mensual y de los MM mensuales de los años 1998 y 2008, muestran un incremento en el primer cuatrimestre del año y una disminución desde el mes de mayo, que coinciden con la época invernal y la aseveración que durante esta época ocurren gran cantidad de MM.

- El tipo de movimiento predominante en las bases de datos de los inventarios son los *deslizamientos* y representan más del 50% de los movimientos en masa
En las dos bases de movimientos en masa inventariadas, existe un porcentaje de información faltante en los diferentes atributos, lo que produce bases heterogéneas, incompletas y sesgadas.
- El método heurístico de combinación de factores ponderados permite combinar los parámetros que influyen en la inestabilidad de los terrenos, y para la valoración

de los pesos de cada uno de estos factores, es necesario el aporte de un experto familiarizado en el tema.

La subjetividad del método de combinación de factores, puede ser reducida mediante la utilización del Método de Jerarquización Analítica, que convierte la evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineales matemáticos.

- Los factores de análisis utilizados son: pendientes, litología, unidades de grandes relieves, hidrogeología, uso y cobertura vegetal, lluvias y sismicidad, y fueron escogidos y representados en función de la escala y disponibilidad de la información en el país.

El factor litológico y de unidades de grandes relieves, parecen ser los parámetros que más influyen en la generación de movimientos en masa en el país, de acuerdo al algoritmo (3) utilizado en el MSMME.

- Se realizaron varios ensayos con cuatro, cinco y seis factores de análisis, utilizando un algoritmo fácil de desarrollar mediante un sistema de información geográfica (SIG), que permitió clasificar cada mapa resultante en 5 clases de susceptibilidad, desde muy baja hasta muy alta.

En todos los ensayos de cuatro, cinco y seis factores, la relación entre los MM del IMMC y las clases de susceptibilidad obtenidas, mostraron que las clases altas contienen el mayor número de movimientos en masa.

- La evaluación del método utilizado se basó principalmente en los dos valores del indicador: 1. El grado de coincidencia entre el porcentaje de MM con las clases de susceptibilidad. 2. El porcentaje del área de cada clase respecto al área total del territorio.

Se determinó que los ensayos: A3, B2 y C1 se aproximan más a las condiciones del indicador, y entre ellos, el ensayo A3 representa mejor la zonificación de la susceptibilidad por MM del Ecuador.

En el Ecuador, las zonas con susceptibilidad muy baja y baja representan el 3.64%, con susceptibilidad media el 11.96% y con susceptibilidad alta y muy alta el 84.39%. De manera generalizada, se puede identificar que las clases de susceptibilidad baja y muy baja se encuentran distribuidas en todo el país, especialmente en las zonas con un relieve plano a semiplano y fácilmente inundable; la clase media se encuentra entre el pie y las partes media-baja de las estribaciones de los sistemas montañosos del territorio; y, las clases de susceptibilidad alta y muy alta se limitan a las cordilleras: Chongón - Colonche, Cerro de Hojas, Paján, Pauca, Balzar, Montañas de Convento, Cerros de Coaque, Cojimés, Atacames; en el BAT, en las cordilleras Occidental y Real, en el Levantamiento Napo, la parte con pendientes abruptas en la Depresión del Pastaza, y las cordilleras Cutucú y El Cóndor.

La validación del MSMME en la zona de estudio del Proyecto PRECUPA, determinó que para esta área la valoración y ponderación de los factores de análisis es correcta, ya que, el 83.56% de MM identificados en esta zona se ubican en las clases con alta y muy alta susceptibilidad.

- La determinación de zonas de susceptibilidad por MM se realizó a nivel cantonal y se identificaron más de 100 cantones con susceptibilidad alta y muy alta en todo el territorio ecuatoriano.

6.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar ensayos a nivel nacional con otras metodologías y analizar si es posible comparar los resultados obtenidos, así también, utilizando otros factores de análisis como densidad de fracturamiento, geomorfología, tipo de suelo, intensidad sísmica.
- ❖ Elaborar un inventario nacional actualizado de movimientos en masa sistemático y homogéneo mediante la interpretación de fotografías aéreas o imágenes satelitales y el levantamiento de información en campo.

- ❖ Determinar y usar una metodología estándar como la del PMA, para la adquisición de la información de las características de los movimientos en masa y la elaboración del inventario.
- ❖ Determinar una entidad responsable de la actualización de manera permanente de la información de todos los factores de análisis que intervengan en la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa.
- ❖ Realizar un análisis de susceptibilidad paramétrica, para identificar el factor que muestra la más alta sensibilidad y considerar esta evaluación para el análisis de los resultados.
- ❖ Realizar análisis de fotointerpretación o de reconocimiento en campo de los MM, para determinar las áreas de deslizamientos con relación al área total de cada clase y verificar las áreas que actualmente poseen susceptibilidad alta y muy alta por movimientos en masa.
- ❖ Una vez identificados los cantones con alta susceptibilidad, informar a las autoridades de las instituciones encargadas de planificación, para que realicen estudios a detalle y tomen medidas de prevención y planificación de desarrollo urbano y de infraestructura.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA

Abad, F. (2006). Ensayo metodológico para la evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, Cuenca de Loja (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Aillón, A., y Armijos, R. (2010). Determinación de zonas susceptibles a fenómenos de remoción en masa, planes de prevención y mitigación en los cantones Cañar, Sucursal y El Tambo de la provincia del Cañar (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

Almeida, E., Ramón P., y Serrano, C. (1996). Terrenos Inestables en la cuenca del río Paute. Informe de la primera etapa de los estudios realizados en el marco del convenio CSS-INECEL. En edición.

Alvarado, A. (2012). Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. Université de Grenoble. Grenoble, Francia.

Bravo, P., y González, A. (2009). Determinación de zonas susceptibles a movimientos en masa en el sector norte del área urbana del cantón Gonzanamá (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

Carrara, A., Cardnali, M., Guzetti, F., y Reinchenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard, en CARRARA, A., GUZZETTI, F. (Eds) Netherlands, 135 – 175.

CEDIG / ORSTOM (1989). Mapa Paisajes Naturales del Ecuador. Escala 1:1'000.000. Geografía Básica del Ecuador, Tomo IV. Edición IPGH/IGM.

CONADE (1996). PROYECTO ODEPLAN, FASE I., Mapa de Uso y Cobertura de Uso de Suelo. Escala 1:250.000.

Centro de Estudios y Prevención de Desastres, PREDES (2009). Estudio de amenazas ante eventos de movimientos en masa e inundaciones, áreas críticas y medidas de mitigación en la región Cusco. Lima, Perú. pp. 137.

Correa, C. (2007). Análisis de la susceptibilidad de los FRM de la Carretera Loja-Zamora (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Chang, L., y Alva, J. (1991). *DESLIZAMIENTOS Y ALUVIONES EN EL PERÚ*. Lima, Perú: Laboratorio Geotécnico Centro Peruano – Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.

CODIGEM - DHA/UNDRO, (1990). PELIGROSIDAD DE TERRENOS INESTABLES EN QUITO, DETECCIÓN Y MITIGACIÓN. Quito, Ecuador.

Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. Une définition simple d'un glissement de terrain. *Bulletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY de l'Association Internationale de GEOLOGIE DE L'INGÉNIEUR*, (43), pp. 27-29.

Cruden, D.M., y Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., *Landslides investigation and mitigation*: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, 36-75.

D'Ercol, R., y Trujillo, M. (2003). AMENAZAS, VULNERABILIDAD, CAPACIDADES Y RIESGO EN EL ECUADOR. Los Desastres, un reto para el desarrollo. Mapa de Zonas de deslizamientos y derrumbes potenciales en el Ecuador. Quito – Ecuador.

DNDC, (2007). Mapa de amenazas por movimientos de terreno inestables en las provincias de Carchi e Imbabura.

Ego F., Sebrier M., Lavenu A., Yepes H., y Egüez, A. (1993). Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. Second ISAG, Oxford (UK), extended abstract, pp. 89-92.

Egred, J. (2004). Terremoto de Riobamba del 4 de febrero de 1797. *Investigaciones en Geociencias*, v. I, pp. 158.

EMAP, IRD e INAMHI (2000). MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LES VERSANTS ORIENTAUX DU VOLCAN RUCU PICHINCHA. Quito, Ecuador.

EPN y DNDC (2000). "Zonificación de Peligros Sismogeotécnicos, por deslizamientos y fenómenos hidrometeorológicos en la ciudad de Bahía de Caráquez". Quito, Ecuador.

EPN y PLANTEL (2005). INTEGRACIÓN DEL COMPONENTE RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: FASE 1. COMPONENTE DESLIZAMIENTOS (FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA, FRM). Informe Final. Quito, Ecuador.

Guzzetti, F. (2005). LANDSLIDE HAZARD AND RISK ASSESSMENT (tesis de doctorado). Universidad Bonn. Bonn, Alemania.

Hall, M. (Ed.) (2000). Estudios de Geografía, v. 9. Quito, Ecuador: Corporación Editora Nacional.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., y Hutchinson, J. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type: *Environmental and engineering Geoscience*, v. 7, pp. 22-238.

Idrovo, A. (2006). "Contribución al estudio de los fenómenos de remoción en masa y su relación con la sismicidad" (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

IEE y MAGAP (2013). Memoria Técnica: Análisis de Amenaza por tipo de movimiento en masa: Cantón Montalvo. Quito, Ecuador. pp. 35.

IGM (2011). División cantonal del Ecuador *en* <recuperado de <http://www.geoportaligm.gob.ec/>>

INAMHI (1999). Estudio de Lluvias Intensas. Quito, Ecuador. pp.126.

INAMHI (2013). Mapa de Precipitación media anual / Serie 81-2010, *en* <recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/MapasBiblioteca/mapa%20de%20isoyetas%20anual%2081-2010.pdf>>.

INGEMMET (2010). MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL PERÚ.

INGEOMINAS (2001). Mapa de Categorías de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa de Colombia. Escala 1:1'500.000.

INGEOMINAS (2002). Estudio de evaluación de amenaza por deslizamientos de los barrios El Espino y cerros del Diamante, Ciudad Bolívar - Bogotá D.C. reporte interno.

INIGEMM (2013). ENSAYOS METODOLÓGICOS Y MAPA DE ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:50.000, ZONA DE RIOBAMBA. Quito, Ecuador.

INIGEMM (2013). Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Ecuador, escala 1:1'000.000. Quito, Ecuador.

INIGEMM (*Inédito*). Mapa Preliminar de Susceptibilidad de Amenazas a Movimientos en Masa del Ecuador, Escala 1:1'000.000.

INTERNATIONAL CONSORTIUM OF LANDSLIDE ICL: International Programme on Landslide, *en* <recuperado de <http://www.iplhg.org/>>

JIMÉNEZ, E. (1999). Zonificación de laderas inestables considerando el efecto sísmico. Caso de las cuencas de Rumipamba y Rumihurcu (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

JTC-1. JOINT TECHNICAL COMMITTEE ON LANDSLIDES AND ENGINEERED SLOPE (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for use planning. *Engineering Geology*, pp. 89.

KEEFER, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, pp. 406-421.

Keller, E. H., y Blodgett, R. H. (2004). Riesgos Naturales. Pearson Education S.A. Madrid, España.

Kellogg J. N., y Bonini W. E. (1985). Reply of a comment of C. Schubert on "Subduction of Caribbean Plate and basement uplift in the overriding South America Plate", 1, (3), pp. 251-276.

Kellogg, J.N., y Vega, V. (1995), Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, *in* Mann, P., ed., Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America: Geological Society of America Special Paper, (295), pp. 75-90.

Kojan, E. (1983). Landslide, Mudflow and Flood Disasters Ecuador. California, USA.

Lonsdale (1978), Ecuadorian Subduction System. *Bulletin Am. Assoc. Pet. Geol.* (62).

Mora, S., y Vahrson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists.*, v. 31 (1), pp. 49-58.

Mora C.S., y Vahrson, W.G. (1994 a). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin Association of Engineering Geologists*, v. XXXI, (1), pp.49-58.

Mora C.S., y Vahrson, W.G. (1994 b). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination: I SIMPOSIO PANAMERICANO DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA. SOCIEDAD ECUATORIANA DE MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS. Guayaquil – Ecuador. MEMORIAS, v. 1, pp. 406 – 431.

Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica, FUNDEVI 0960. Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas.

National Geospatial-Intelligence Agency, NASA, and the German and Italian Space Agencies (2000). The Shuttle Radar Topography Mission *en* <recuperado de <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>>.

NEC, (2011). PELIGRO SÍSMICO Y REQUISITOS DE DISEÑO RESISTENTE. Cap.2. MIDUVI - Cámara de la Construcción de Quito. pp. 78.

Nocquet, J. M., Mothes, P., Chlieh, M., Jarrin, P., ValleE, M., Ruiz, G., et al. (2010). New GPS velocity field in the northern Andes (Ecuador-Colombia): partial locking along the subduction and northeastward escape of the Northern Andean Block. *EGU General Assembly conference Abstracts*, 12, 9531.

ODEPLAN (2002). Plan de Desarrollo de la Provincia de Chimborazo. Quito, Ecuador.

Pazos, V., y Vinueza, W. (1990). Contribución al estudio sobre los deslizamientos en el Ecuador (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Peltre, P. (1999). QUEBRADAS Y RIESGOS NATURALES EN QUITO, PERÍODO 1900-1988. Quito, Ecuador.

Plaza, G. (1996). La amenaza y vulnerabilidad por deslizamientos en la región andina del Ecuador. Séptimo Congreso Ecuatoriano de Geología, Minas, Petróleos y Medio Ambiente. Trabajos técnicos: Tomo II. Colegio de Ingenieros Geólogos, Minas y Petróleos (CIGMYP). Quito – Ecuador, pp. 513 – 526.

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. Guayaquil, Ecuador.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO, PMA: GCA (2007), Movimientos en Masa en la Región Andina, una Guía para la Evaluación de Amenazas. Publicaciones Geológicas Multinacional N°4.

Ramírez, M. (2007). La evolución del peligro por fenómenos de remoción en masa y su aplicación a la planificación territorial: Ejemplo Provincia de Tungurahua (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Rice, R.M., y Krames, J.S. (1970). "Mass-Wasting Process in Watershed Management," Proceedings on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, ASCE, pp. 231-260.

Roa, J. (2006). Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. ISSN 1316-7790. (17). pp. 45-83.

Sánchez, G. (2003). Jerarquización Analítica. Técnicas Participativas de Planeación. McGrawHill. pp. 167 – 182.

Saaty, T.L. (1990). Multicriteria Desition Marking – The Analytic Hierarchy Process, AHP, v. I, Series McGrawHill, New York, USA.

Segovia, M. (2001). El sismo de Bahía del 4 de agosto de 1998: caracterización del mecanismo de ruptura y análisis de la sismicidad en la zona costera (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, SGC. (2012). Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, Escala 1:100.000. Bogotá, Colombia.

Singer, A., Rojas, C., y Lugo, M. (1983). *INVENTARIO NACIONAL DE RIESGOS GEOLÓGICOS*. Caracas, Venezuela: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas.

Soeters, R., y VanWesten, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation, *en* Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report, pp. 129-177.

Spikings, R., Winkler, W., Seward, D., y Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 186, pp. 57–73.

Suares, P. (1998). Definición de un evento de El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Memorias del Seminario Taller: LOS DESASTRES NATURALES Y LA ESTRATEGIA DE DESARROLLO A LARGO PLAZO. Guayaquil, Ecuador.

Suarez, J. (1998). Deslizamientos. Análisis Geotécnico. v. 1 <recuperado de www.erosion.com.co/libros.html>

Tambo, W., y Vicuña, D. (2009). Identificación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la vía Loja - Malacatos en el tramo comprendido entre Loja - Landanguí. Provincia de Loja (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

Trenkamp, R., Kellog, J., Freymueller, T., y Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, pp. 157-171.

Van Zuidan, R. A. (1986). Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping, ITC. Holanda. *Smits Publishers, The Hague*. pp. 442.

Varnes, D. J. (1978). Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslides analysis and control*: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report, (176), pp. 9-33.

Villacorta, S., Fidel, L., y Zavala, B. (2012). Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 69, (3), pp. 393-399.

Viloria, S. (2012). INVENTARIO DE SISMOS HISTÓRICOS EN COLOMBIA QUE HAN GENERADO MOVIMIENTOS EN MASA. *Congreso Latinoamericano de Prevención de Riesgos y Medio Ambiente*. Lima, Perú, pp. 8.

Yugsi, F. (2004). Caracterización de los fenómenos de remoción en masa producidos en las laderas surorientales del Complejo Volcánico Pichincha (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Zevallos, O., Fernández, M., Plaza, G., y Klinkicht, S., (ed). (1996). Sin plazo para la esperanza: Reporte sobre el desastre de La Josefina, Ecuador, 1993. Quito, Ecuador

Zevallos, O. (1999). *INVENTARIO DE DESASTRES EN ECUADOR, PERIODO 1988-1998*, Quito, Ecuador.

PÁGINAS WEB REVISADOS:

<https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CDMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcd%2Fcontent%2Fdocument%2Fcd%2Fdownloaddocument%2F9783642275258-c2.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-1293555-p174282657&ei=MXhaU-fMHcK3sATf3IDgCg&usg=AFQjCNE-if4qWillTNUMReIH3Xp0yaIDlg>

<http://www.geociencias.com.gt/foto/propuesta.pdf>

<http://www.eoearth.org/view/article/154157/>

<http://landslides.usgs.gov/>

<http://spinner.cofc.edu/~scgis/burwellaward/hungr.pdf>

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/>

<http://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/shallowGeohazardsAndRisks/landslides/home.html>