

*Cuando hay grandes inviernos, caen derrumbes y bajan inundaciones,
pero en ellas vienen los niños y niñas que nacen del agua.
Es un mal porque arrastran tierras, piedras, árboles, puentes, animales,
sembrados, casas, gente. Pero es un bien porque en ellas viven los
jefes de nosotros. Se los saca del agua, se los cría y tienen historias grandes;
de ellos nacen los valores culturales. Las inundaciones y los derrumbes no
son solamente inundaciones y derrumbes, sino que tienen historias.*

Guambianos: Hijos del Aroiris y del Agua

Por Abelino Dagua Hurtado, Misael Aranda y
Luis Guillermo Vasco.
Bogotá, 1998

APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA
EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

VIVIANA AGUILAR MUÑOZ

DIANA PATRICIA MENDOZA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2002

APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA
EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

VIVIANA AGUILAR MUÑOZ

DIANA PATRICIA MENDOZA GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniera Topográfica

Director

ANDRÉS VELÁSQUEZ

Profesor

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2002

PROYECTO

Título: APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

Autoras

Viviana Aguilar Muñoz

Cod. 9328875

Universidad del Valle

viaguila@osso.univalle.edu.co

Diana Patricia Mendoza González

Cod. 9331016

Universidad del Valle

dimendoz@osso.univalle.edu.co

Director

Prof. Andrés Velásquez

Ingeniero Geólogo

Director del Observatorio Sismológico del Sur Occidente

Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

ave@osso.univalle.edu.co

Asesores

Prof. Diego González

Meteorólogo

Profesor de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

digonz@ciencias.unal.edu.co

Tec. Jorge Eduardo Mendoza

Coordinador Sección Procesamiento Gráfico Observatorio Sismológico del Sur
Occidente

jomendoz@osso.univalle.edu.co

Nota de aceptación.

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, 26 de abril del 2002.

DEDICATORIA.

VIVIANA

Dedico este esfuerzo a mi familia por el amor, a mis amig@s por la amistad, a mi misma porque lo logré y a usted si le da sentido.

DIANA

A mi familia y al Clan del Cuco por su cariño, confianza, paciencia y complicidad permanentes.

AGRADECIMIENTOS.

El trabajo que aquí se presenta precisó de tres años de maduración. Durante este tiempo se contó con el apoyo permanente de la CORPORACIÓN OSSO y con la orientación de varios investigadores del Observatorio Sismológico del Sur Occidente, entre los cuales queremos resaltar:

Al Profesor Andrés Velásquez por su paciente labor de dirección, sus valiosas y apasionadas contribuciones tanto a la forma como al fondo del documento, por su aporte a nuestra formación en el ámbito de la investigación científica y por ser un abanderado del proyecto.

Al profesor Hansjürgen Meyer por creer en nosotras, brindarnos su apoyo y disculpar nuestros pequeños desastres.

Al profesor Diego González por su conocimiento, orientación y productiva contribución al manejo de la información sobre humedad del terreno.

Al técnico Jorge Eduardo Mendoza por su permanente apoyo en el procesamiento y producción gráfica y cartográfica, por habernos transmitido su

conocimiento, por su entusiasmo y por creer en el proyecto.

A la Geóloga Myriam López por sus aportes en geología, trabajo de campo e inventario de movimientos de masa cosísmicos y flujos. También por su apoyo en la gestión de insumos.

A la Ingeniera Cristina Rosales Climent por transmitirnos su pasión y entusiasmo por el trabajo científico y por su apoyo en la edición del documento.

A Sebastián Pedrosa y Mauricio Rengifo por su apoyo en el procesamiento cartográfico.

A Carolina Delgado y Adriana Moná del Centro de Documentación del OSSO, CENDOC, por su paciencia, comprensión y apoyo.

A Eugenio Jaramillo por enseñarnos el significado del punto.

A SWISSAID por patrocinar y hacer posible este proyecto.

A las instituciones que suministraron información:

CENICAFE: registros pluviométricos.

OSQ, CARDER, C.V.C., C.R.Q., DNPAD, FEDECAFE, INGEOMINAS, IDEAM, CREPAD, Defensa Civil de La Virginia y Universidad del Quindío: documentos de sus investigaciones e informes.

A los profesores e investigadores que suministraron información invaluable durante la revisión del estado del conocimiento: Ana Campos, Michel Hermelín, Alejandro Martínez, David Keefer, Guillermo Santamaría, Leonello Serva, Matthew C. Larsen, Sabina Porfido, Scott Miles, Pier Giorgio Nicoletti, Randy Jibson, Lucia Luzi, Peter Kingsbury, Annetty Benavides, Julián Bommer y Hugo Monsalve.

Nuestro agradecimiento a los profesores Francisco Hernández y Hernán Materón y a la Universidad del Valle.

Finalmente a tod@s los amig@s que nos brindaron techo, comida, ropa, masajes, flores, escucharon con paciencia durante 3 años nuestras quejas, pero sobre todo, nos regalaron a manos llenas el animo suficiente para avanzar cuando hizo falta.

RESUMEN.

En la región central de los Andes colombianos ocurrieron múltiples movimientos de masa asociados a actividad sísmica y lluvias intensas durante 1999. El 25 de enero un terremoto de magnitud 5,9 Mb, a menos de 20 km de profundidad, produjo, además, agrietamientos en las vertientes que se transformaron en movimientos a raíz de prolongadas lluvias asociadas al fenómeno La Niña. Con el fin de contribuir al entendimiento de los procesos de denudación del paisaje en ambientes tropicales húmedos de montaña, todavía poco comprendidos, así como a la planificación del territorio teniendo en consideración las amenazas derivadas, se seleccionó un área de 1960 km² de tal manera que contuviera la mayor parte de los procesos señalados.

Se enfatizó en la generación de modelos de susceptibilidad del territorio a los movimientos de masa con base en las variables pendientes naturales, humedad del terreno y geología. Con base en la cantidad y calidad de información y revisión de literatura sobre métodos de modelamiento y casos históricos, se adoptó una metodología heurística en la cual se combinan modelos de las variables seleccionadas.

Se aplicaron los criterios sobre pendientes naturales, unidades geológicas e isohietas, de un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa desarrollado a escala 1:500 000 por el OSSO en 1995a, el cual se trabajó a escala 1:100 000, en la zona. Este modelo se denominó **So**.

A partir de lo anterior se generaron otros dos modelos:

- **Som**: modificando la clasificación de las variables pendientes, geología y humedad del modelo anterior.
- **Sp**: a partir de Som aplicando, adicionalmente, tratamientos de la variable estructuras geológicas.

De manera independiente se generó un inventario de huellas de movimientos de masa a partir de un modelo de sombras del territorio, que se comparó con las áreas de cada clase de susceptibilidad obtenidas en So, Som y Sp.

Se concluye que el modelo Sp se ajusta de mejor manera a la dinámica de los movimientos de masa en la región, porque las densidades de huellas de movimientos de masa aumentan sistemáticamente en las áreas definidas como de mayor susceptibilidad.

Los resultados finales, con base en los criterios y tratamiento de las variables consideradas, son un avance con respecto a los modelamientos cualitativos revisados en la literatura en Colombia y se proponen como insumos para el ordenamiento territorial, la evaluación de amenazas y futuros estudios con metodologías cuantitativas.

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN.....	1
1. CONTEXTO GENERAL.....	6
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	6
1.2 ZONA DE ESTUDIO.....	9
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	12
1.3.1 Alcances.....	12
1.3.2 Limitaciones.....	13
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 Objetivo general.....	14
1.4.2 Objetivos específicos propuestos (P) y alcanzados (A).....	14
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1 DESCRIPCIÓN.....	17
2.1.1 Identificación y planteamiento del problema.....	17
2.1.2 Fuentes de información.....	18
2.1.3 Procesamiento de la información.....	18
2.1.4 Modelamiento.....	19
2.1.5 Presentación de resultados.....	19

ESQUEMA METODOLÓGICO.....	20
3. BASES CONCEPTUALES Y REVISIÓN DE LITERATURA.....	21
3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE PAISAJE.....	21
3.2 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE.....	22
3.2.1 Aspectos históricos y desarrollo del pensamiento en Geomorfología.....	24
3.2.2 Doctrinas y postulados.....	25
3.3 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE EN AMBIENTE TROPICAL DE MONTAÑA.....	34
3.4 MOVIMIENTOS DE MASA.....	37
3.4.1 Definición.....	37
3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA.....	38
3.5.1 Caídas.....	39
3.5.2 Volcamiento o inclinación.....	40
3.5.3 Deslizamientos.....	40
3.5.4 Esparcimientos laterales.....	42
3.5.5 Flujos.....	42
3.5.6 Avalanchas.....	43
3.5.7 Movimientos complejos.....	43
3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA ESTABILIDAD.....	45
3.6.1 Factores de susceptibilidad.....	46
3.6.2 Factores de disparo.....	47
3.7 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR LLUVIAS.....	48
3.7.1 Parámetros hidrometeorológicos.....	49
3.8 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR SISMOS.....	52
3.8.1 Parámetros sísmicos.....	54
3.9 MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA.....	60
3.9.1 Definición de términos.....	60

3.9.2	Escala de trabajo.....	61
3.9.3	Datos de entrada.....	62
3.9.4	Técnicas de análisis para el modelamiento de la susceptibilidad y/o amenaza.....	65
3.9.5	Selección de la técnica.....	70
3.9.6	Precisión y objetividad.....	72
3.10	USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y/O AMENAZA.....	73
4.	DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	75
4.1	TOPOGRAFÍA.	75
4.2	DRENAJES.....	75
4.3	DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA.	76
4.4	TECTÓNICA REGIONAL.	78
4.4.1	Fuentes asociadas con la zona de subducción.	79
4.4.2	Fuentes intraplaca.....	80
4.5	UNIDADES LITOLÓGICAS.....	80
4.5.1	Paleozoico.....	80
4.5.2	Mesozóico (Cretáceo).	81
4.5.3	Terciario.	83
4.5.4	Cuaternario.....	85
4.6	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	85
4.6.1	Falla Cali – Patía.....	87
4.6.2	Falla Quebradanueva.....	87
4.6.3	Falla Cauca – Almaguer.....	87
4.6.4	Falla Armenia.	88
4.6.5	Falla Silvia – Pijao.....	88
4.6.6	Fallas con tendencia E - W y WNW-ESE.....	89
4.6.7	Falla Ibagué.....	90
4.6.8	Falla Navarco.	91

4.6.9	Falla Montenegro.....	91
4.7	MACROSÍSMICA.....	91
4.8	AMENAZA SÍSMICA.....	96
5.	MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO EN 1999.....	98
5.1	SISMO DEL EJE CAFETERO del 25 DE ENERO DE 1999.....	98
5.1.1	Análisis de réplicas.....	99
5.1.2	Mecanismos focales.....	101
5.1.3	Aceleraciones.....	102
5.1.4	Macrosísmica del 25 de enero de 1999.....	103
5.2	ANÁLISIS DE LLUVIAS PRE Y POSTSISMO.....	105
5.2.1	Secuencia ENOS 1998 – 1999.....	105
5.2.2	Precipitaciones en 1999 en la región Andina de Colombia.....	107
5.2.3	Precipitaciones diciembre de 1998 a diciembre de 1999 en el Eje Cafetero.....	108
5.2.4	Precipitaciones y movimientos de masa en 1999.....	109
5.3	MOVIMIENTOS DE MASA ENERO Y FEBRERO DE 1999.....	114
5.3.1	Movimientos de masa.....	116
5.3.2	Agrietamientos.....	116
5.3.3	Hundimientos.....	116
5.3.4	Nacimientos de agua.....	117
5.4	MOVIMIENTOS DE MASA EN DICIEMBRE DE 1999.....	117
6.	MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO.....	119
6.1	CONSIDERACIONES GENERALES.....	120
6.2	DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	121

6.3	DEFINICIÓN DEL MODELO.	122
6.4	LIMITACIONES DEL MODELAMIENTO.	122
6.5	EVALUACIÓN DEL MODELAMIENTO.	123
6.6	SUBMODELO DE PENDIENTES.	125
6.6.1	Base conceptual.....	125
6.6.2	Desarrollo del submodelo de pendientes.....	128
6.6.3	Evaluación submodelo de pendientes.	132
6.7	SUBMODELO DE HUMEDAD.	133
6.7.1	Base conceptual.....	133
6.7.2	Desarrollo del submodelo de humedad.	136
6.7.3	Evaluación del submodelo de humedad.	143
6.8	SUBMODELO DE GEOLOGÍA.	145
6.8.1	Base conceptual.....	145
6.8.2	Desarrollo del submodelo de geología.....	153
6.8.3	Evaluación submodelo de geología.	166
6.9	MODELOS.	167
6.9.1	Modelo So.	167
6.9.2	Modelo Som.	170
6.9.3	Modelo Sp.	174
6.9.4	Evaluación de modelos.	178
6.10	RESULTADOS.	182
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	184
7.1	CONCLUSIONES.	184
7.2	RECOMENDACIONES.	187
8.	BIBLIOGRAFÍA.	189

9. ANEXOS.....	214
-----------------------	------------

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	10
Figura 2. Detalle de la zona de estudio.....	11
Figura 3. Estados del paisaje en un ciclo fluvial de erosión.....	27
Figura 4. Curvas hipsométricas típicas.....	30
Figura 5. Sismicidad histórica con efectos en el Eje Cafetero.....	92
Figura 6. Sismicidad regional OSSO 1987 - 2001.....	97
Figura 7. Epicentros sismo 25 de enero de 1999.....	99
Figura 8. Distribución temporal de replicas 25/01/1999 - 05/02/1999 (OSSO).....	100
Figura 9. Mecanismos focales de para el evento principal del 25 de enero de 1999. ..	102
Figura 10. Secuencia ENOS 1998 (NOAA, 2001).	106
Figura 11. Secuencia ENOS 1999 (NOAA, 2001).	107
Figura 12. Índice de precipitación para 12 estaciones entre 1998 y 1999.....	109
Figura 13. Precipitación acumulada del trimestre diciembre de 1998 a febrero de 1999 con respecto al promedio multianual (18 años) del mismo trimestre.....	110
Figura 14. Precipitación acumulada diciembre de 1998 al 25 de enero de 1999, con respecto a la precipitación promedio multianual (18 años), del mismo periodo. ...	111
Figura 15. Variación de la precipitación de febrero de 1999 con respecto a la precipitación promedio (18 años) para este mes en el Eje Cafetero.....	112
Figura 16. Curvas de masas trimestre DEF (1998 – 1999).	113
Figura 17. Curva de masas diciembre de 1999, Eje Cafetero, zona de estudio.....	114
Figura 18. Inventario de movimientos de masa.....	124
Figura 19. Pendientes del terreno.....	129
Figura 20. Submodelo de pendientes (So).	130
Figura 21. Submodelo de pendientes (Sp y Som).	132
Figura 22. Densidad de movimientos de masa según submodelos de pendientes.....	133

Figura 23. Pisos térmicos.....	137
Figura 24. Isohietas anuales.....	139
Figura 25. Zonas climáticas.....	140
Figura 26. Submodelo de humedad So.....	141
Figura 27. Submodelo de humedad Som y Sp.....	143
Figura 28. Densidad de movimientos de masa según submodelos de humedad.....	144
Figura 29. Unidades litológicas.....	153
Figura 30. Submodelo geología (So).....	155
Figura 31. Submodelo geología (Som).....	157
Figura 32. Estructuras lineales.....	158
Figura 33. Submodelo de estructuras lineales.....	159
Figura 34. Estructuras puntuales regionalizadas con relación al aspecto.....	162
Figura 35. Submodelo de estructuras puntuales.....	162
Figura 36. Submodelo geología (Sp) sin clasificar.....	164
Figura 37. Píxeles por valores de susceptibilidad de geología (Sp).....	164
Figura 38. Submodelo geología (Sp).....	165
Figura 39. Densidad de movimientos de masa según submodelos de geología.....	167
Figura 40. Modelo So sin reclasificar.....	168
Figura 41. Píxeles por valores de susceptibilidad de So.....	169
Figura 42. Modelo So.....	170
Figura 43. Modelo Som sin reclasificar.....	171
Figura 44. Píxeles por valores de susceptibilidad de Som.....	172
Figura 45. Modelo Som.....	173
Figura 46. Modelo Sp sin reclasificar.....	174
Figura 47. Píxeles por valor de susceptibilidad de Sp.....	176
Figura 48. Modelo Sp.....	177
Figura 49. Valores de susceptibilidad por modelos sin reclasificar.....	178
Figura 50. Número de huellas de movimiento de masa por modelo.....	179
Figura 51. Densidad de huellas de movimientos de masa por modelo.....	180
Figura 52. Índice de ocurrencia de movimientos de masa por modelo.....	181

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Características de los movimientos de masa inducidos por sismos.	44
Tabla 2. Datos de entrada para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa.	63
Tabla 3. Técnicas de análisis en relación con la escala de trabajo.	71
Tabla 4. Zonificación climática.	77
Tabla 5. Parámetros epicentrales del evento principal.	99
Tabla 6. Parámetros epicentrales réplica principal.	101
Tabla 7. Aceleraciones máximas del evento principal.	103
Tabla 8. Clasificación de pendientes (So).	129
Tabla 9. Clasificación de pendientes (Som, Sp).	131
Tabla 10. Clasificación de los pisos térmicos.	137
Tabla 11. Zonas climáticas.	139
Tabla 12. Clasificación de humedad (So).	140
Tabla 13. Evapotranspiración potencial y valores de precipitación límite.	142
Tabla 14. Clasificación de la humedad (Som y Sp).	142
Tabla 15. Susceptibilidad de litología a los movimientos de masa.	146
Tabla 16. Clasificación de geología (So).	154
Tabla 17. Clasificación de geología (Som).	156
Tabla 18. Clasificación de las estructuras lineales.	159
Tabla 19. Clasificación de las estructuras puntales.	161
Tabla 20. Valores de susceptibilidad modelo geológico – estructural.	163
Tabla 21. Clasificación de la geología (Sp).	165
Tabla 22. Valores de susceptibilidad del modelo So.	168
Tabla 23. Reclasificación del modelo So.	170
Tabla 24. Valores de susceptibilidad modelo Som.	171

Tabla 25. Reclasificación modelo Som.	173
Tabla 26. Valores de susceptibilidad modelo Sp.	175
Tabla 27. Reclasificación modelo Sp.	176
Tabla 28. Áreas por modelo de susceptibilidad.	177

LISTADO DE ANEXOS.

ANEXO A. Productos Cartográficos.

ANEXO B. Memorias del procesamiento cartográfico

ANEXO C. Análisis de precipitaciones en la zona de estudio, periodo 1982 – 1999.

ANEXO D. Reportes de efectos geológicos inducidos por sismos.

ANEXO E. Inventario de movimientos de masa 1999.

ANEXO F. Consideraciones sobre la susceptibilidad en los municipios de la zona de estudio.

PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS EN EL ANEXO A.

Información general.

Convenciones de la cartografía base.

Índice de planchas IGAC 1:25 000 del área de estudio.

MAPA 1. Municipios.

MAPA 2. Sitios de interés general.

MAPA 3. Vías y líneas de alta tensión.

MAPA 4. Drenajes.

MAPA 5. Curvas de nivel.

MAPA 6. Zonas climáticas.

MAPA 7. Pendientes naturales.

MAPA 8. Unidades geológicas.

MAPA 9. Estructuras geológicas.

MAPA 10. Tipo y orientación de estructuras.

MAPA 11. Inventario de huellas de movimientos de masa.

MAPA 12. Movimientos de masa 1999.

MAPA 13. Flujos 1999.

MAPA 14. Área de movimientos de masa cosísmicos.

MAPA 15. Modelo de susceptibilidad S_o .

MAPA 16. Modelo de susceptibilidad S_{om} .

MAPA 17. Modelo de susceptibilidad S_p .