

**ESTIMACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS GENERADOS  
POR EVENTOS SISMICOS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN USANDO  
HERRAMIENTAS DE LA GEOMÁTICA  
- CASO APLICADO A EDIFICACIONES URBANAS -**

*Tesis de Maestría*

**JOHNNY ALEXANDER VEGA GUTIERREZ**

*Presentada ante las Facultades de Ciencias Astronómicas y  
Geofísicas e Ingeniería de la  
Universidad Nacional de La Plata  
como requisito para la obtención del Grado Académico de*

**MAGÍSTER EN GEOMÁTICA**

*Director de Tesis:* MSc. César Augusto Hidalgo \_\_\_\_\_

*Codirector de Tesis:* Dra. Nora Cristina Sabbione \_\_\_\_\_

*Jurado de Tesis:* Dra. Gabriela A. Badi \_\_\_\_\_

Dra. Claudia L. Ravazzoli \_\_\_\_\_

Ing. Juan S. Carmona \_\_\_\_\_

*Lugar y fecha de la defensa oral y pública: La Plata, Febrero 22 de 2013*



Facultad de Ingeniería



Universidad Nacional  
de La Plata



Facultad de Ciencias  
Astronómicas y Geofísicas

## MAESTRÍA EN GEOMÁTICA

---

# ***ESTIMACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS GENERADOS POR EVENTOS SISMICOS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN USANDO HERRAMIENTAS DE LA GEOMÁTICA***

*CASO APLICADO A EDIFICACIONES URBANAS*

Autor:

**JOHNNY ALEXANDER VEGA GUTIERREZ**

***MSc. Geotecnia - César Augusto Hidalgo***  
Director

***Dra. Sismología - Nora Cristina Sabbione***  
Codirectora

---

La Plata 2012



*A mi hija Celeste quien le da un nuevo color a mi vida y a mi familia que  
siempre está conmigo...*



## AGRADECIMIENTOS

Un sentido agradecimiento a todas y cada una de las personas que directa e indirectamente han contribuido con el desarrollo de la presente investigación, bien sea en calidad de directores o asesores temáticos, como a aquellas personas que han contribuido con información bibliográfica y cartográfica o con su concepto profesional para el desarrollo del trabajo de investigación.



## SÍNTESIS

El estudio sobre la estimación del riesgo por deslizamientos de laderas accionados por eventos sísmicos, se efectuó sobre datos que corresponden al Municipio de Medellín, República de Colombia, con los cuales se pretende implementar un modelo a partir de herramientas pertenecientes al área de la Geomática, como lo son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de coadyuvar en la estimación y cuantificación del riesgo ocasionado por este tipo de desastre en las laderas de la jurisdicción de estudio, al igual que la proyección de un análisis de los costos suscitados por daños en elementos de la infraestructura urbana, para este caso las viviendas del sector de estudio.

Esta estimación y evaluación se llevó a cabo, mediante la adopción de una metodología apoyada en una plataforma SIG, de manera que posibilite la realización de un análisis de comparación entre el campo de aceleraciones pico (PGA) que se puede llegar a presentar durante un evento sísmico de una magnitud dada, el campo de aceleración crítica y los desplazamientos debidos al evento sísmico.

Con la metodología propuesta se plantea, estimar la amenaza a partir del cálculo de la probabilidad de falla de los taludes para aquellos casos en los que la aceleración pico y el desplazamiento asociado sean mayores que la aceleración crítica que genere el efecto dinámico en el talud, y el desplazamiento crítico que genere el mismo efecto, respectivamente. Así mismo, para la estimación de la vulnerabilidad se busca calcular la probabilidad de que se produzcan daños, dado que se dio una falla. Finalmente se calculará el riesgo aceptable para el caso de estudio de acuerdo a una ecuación del tipo  $R = P[A] \times P[B/A] \times C$ , donde  $P[A]$  corresponde a la probabilidad de falla,  $P[B/A]$  corresponde a la probabilidad de ocurrencia de daños debido a que se produjo la falla, y  $C$  a los costos suscitados por dichos daños. Así mismo, se incorporó al modelo el efecto que tiene tanto la profundidad del nivel freático, como el espesor de falla del talud y la probabilidad de que el suelo se encuentre en estado de saturación debido a la lluvia antecedente al evento sísmico.

Para la estimación de la probabilidad de que se produzca la falla o desplazamientos excesivos tanto en los elementos en los cuales se evalúa el riesgo a sufrir daño, como en el medio donde se encuentran localizados, se emplearon algunos parámetros e insumos cartográficos como la localización de elementos de la infraestructura urbana, las viviendas susceptibles de sufrir daño por el evento sísmico, los mapas de pendientes, los mapas de formaciones superficiales, las curvas de aceleración pico, entre otros, al igual que otros parámetros de interés como los criterios de daño específico.



## ABSTRACT

The research on the estimate of risk for landslides caused by seismic events, was performed on acquired data corresponding to the Medellín City, Republic of Colombia, with which we intend to implement a model based on tools from the Geomatics area, such as Geographic Information Systems (GIS), to assist in the estimation and quantification of risk caused by this type of disaster on the slopes of the study jurisdiction, like the projection of an analysis of the costs arising from damage to urban infrastructure elements, in this case the houses on the study sector.

This assessment and evaluation were carried out by adopting a methodology based on a GIS platform, so it enables the execution of a comparison analysis between the field of peak accelerations (PGA) that can be present during an earthquake of a given magnitude, the critical acceleration field and displacement due to the seismic event.

With the proposed methodology we intend to geographically estimate the threat from the calculation of the failure probability of the slopes for cases in which the peak acceleration and displacement associated are higher than the critical acceleration generated by the dynamic effect on the slope and the critical displacement which produces the same effect, respectively. Also, for the vulnerability estimate is sought to calculate the damage probability, since there was a failure. Finally, calculate the acceptable risk to the case of study according to the model equation  $R = P[A] \times P[B/A] \times C$ , where  $P[A]$  corresponds to the probability of failure,  $P[B/A]$  corresponds to the probability to occurs the damage, and  $C$  to the costs arising from such damage. Likewise, the model incorporated the effect of both the depth of the water level, the thickness of slope failure and the Chance of the soil in a state of saturation due to rain precedent to the seismic event.

To estimate the probability of failure occurrence or excessive movement both in the elements which are assessed the risk of harm, as in the middle where they are located, we used some parameters and inputs like the location map and urban infrastructure elements such as houses susceptible to damage from the seismic event, slope maps, maps of surface features, peak acceleration curves, among others, as well as other parameters of interest with specific damage criteria.

## CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS .....	15
LISTADO DE TABLAS .....	19
PARTE I. Conceptos introductorios.....	20
CAPITULO UNO.....	21
1. Introducción .....	21
1.1. Concepción inicial.....	21
1.2. Objetivos de la investigación .....	24
1.3. Contenido de la memoria .....	25
PARTE II. Contextualización y caracterización .....	26
CAPITULO DOS .....	27
2.    Caracterización de la zona de estudio .....	27
2.1.    Generalidades.....	27
2.2.    Geología .....	29
2.3.    Geomorfología.....	33
2.4.    Pendientes.....	33
2.5.    Procesos Morfodinámicos .....	36
CAPITULO TRES .....	38
3.    Conceptos sobre deslizamientos de masas de tierra .....	38
3.1.    Tipos de movimientos de masa .....	38
3.2.    Factores que afectan la estabilidad del terreno .....	41
3.3.    Deslizamientos asociados a eventos sísmicos .....	42
CAPITULO CUATRO.....	44
4.    Conceptos sobre sismología .....	44
CAPITULO CINCO .....	52
5.    Análisis y gestión del riesgo .....	52
5.1.    Características y efectos de los desastres .....	53
5.2.    Evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo .....	54
CAPITULO SEIS.....	56
6.    Conceptos sobre Geomática.....	56

6.1.	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	56
6.2.	Aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) en la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo. ....	58
PARTE III. Conceptos y metodologías aplicadas .....		62
CAPITULO SIETE.....		63
7.	Evaluación por inestabilidad de taludes y deslizamientos accionados por sismos .....	63
7.1.	Peligrosidad o amenaza de deslizamientos asociados a sismos. Método de Newmark. ...	64
7.1.1.	Evaluación de la estabilidad de taludes .....	65
7.1.1.1.	Factor de seguridad (FS) .....	67
7.1.1.2.	Aceleración crítica (AC).....	68
7.1.1.3.	Desplazamiento de Newmark (DN) .....	69
7.1.2.	Valores umbrales para el desplazamiento de Newmark.....	71
7.1.3.	Simplificaciones y consideraciones del método de Newmark .....	72
7.2.	Métodos probabilísticos para la estimación de probabilidades de falla o deslizamiento ..	72
7.2.1.	Niveles de análisis en los métodos probabilísticos .....	74
7.2.2.	Métodos probabilísticos de análisis de Nivel II .....	76
7.2.3.	Métodos probabilísticos de análisis de Nivel III .....	78
7.2.4.	Incertidumbre en Geotecnia.....	79
7.2.4.1.	Análisis probabilista de las propiedades geotécnicas .....	80
7.2.4.2.	Método Probabilístico adoptado para la estimación de la probabilidad de falla. Método FOSM (First Order, Second Moment) .....	80
7.2.4.3.	Índice de Confiabilidad y Probabilidad de Falla .....	81
7.3.	Consideración del efecto de la lluvia como detonante del deslizamiento de laderas .....	84
7.3.1.	Análisis geoestadístico de los valores de probabilidad de saturación del suelo .....	88
7.4.	Modelos de evaluación de la vulnerabilidad .....	90
7.4.1.	Vulnerabilidad física de edificaciones .....	91
7.4.1.1.	Indicadores de la vulnerabilidad física .....	91
7.5.	Desarrollo metodológico adoptado para evaluar la vulnerabilidad.....	94
PARTE IV. Implementación y análisis del modelo.....		107
CAPITULO OCHO .....		108
8.	Implementación y Análisis del modelo .....	108
8.1.	Implementación del modelo.....	113

8.1.1.	Rasterización de la información.....	113
8.1.2.	Programación del modelo .....	114
8.2.	Análisis de resultados .....	117
8.2.1.	Efecto de la profundidad de la superficie de falla.....	117
8.2.2.	Efecto del nivel freático (NF) sobre el factor de seguridad (FS) .....	121
8.2.3.	Aceleración crítica .....	124
8.2.4.	Probabilidad de falla (PF).....	127
8.2.4.1.	Probabilidad de falla en condición húmeda.....	127
8.2.4.2.	Probabilidad de falla en condición saturada.....	131
8.2.5.	Probabilidad de falla total .....	135
8.2.6.	Comparación de las aceleraciones críticas con los valores de PGA .....	136
8.2.7.	Desplazamiento de Newmark (DN) asociado a los deslizamientos.....	140
8.2.8.	Vulnerabilidad de las edificaciones de la zona de estudio .....	143
8.2.9.	Susceptibilidad de falla de las edificaciones de la zona de estudio debido a deslizamientos de masa	145
8.2.10.	Riesgo y Costo suscitado por la probabilidad de eventos catastróficos en la zona de estudio. Pérdida máxima probable. ....	147
8.3.	Validación de los resultados del modelo .....	151
8.3.1.	Comparación de resultados obtenidos de puntos críticos respecto a estudios geológicos en la zona de estudio. ....	151
8.3.2.	Comparación de resultados obtenidos con respecto al Proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín.....	154
8.3.3.	Comparación de resultados obtenidos con respecto al Estudio de Zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en el Valle de Aburrá. ....	159
CAPITULO NUEVE .....		163
9.	Conclusiones.....	163
CAPITULO DIEZ .....		165
10.	Proyección de la investigación.....	165
BIBLIOGRAFÍA.....		166



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Municipio de Medellín y el Valle de Aburrá.....	28
Figura 2. División político administrativa del Municipio de Medellín.....	28
Figura 3. Mapa de unidades geológicas del Municipio de Medellín.....	30
Figura 4. Mapa de unidades geomorfológicas del Municipio de Medellín.....	34
Figura 5 .Mapa de pendientes del municipio de Medellín.....	35
Figura 6. Mapa de procesos morfodinámicos en el Municipio de Medellín (1985-2006).....	37
Figura 7. Tipos de movimientos de masa.....	41
Figura 8. Marco geodinámico de convergencia de placas tectónicas en Colombia.....	45
Figura 9 . Mapa de zonificación sísmica a nivel nacional.....	47
Figura 10 . Mapa de zonificación sísmica departamento de Antioquia.....	48
Figura 11 . Mapa de zonificación sísmica a nivel nacional (NSR - 10).....	49
Figura 12. Amenaza Sísmica en el Valle de Aburrá. Valores de PGA con un periodo de retorno de 9,3 años.....	50
Figura 13. Amenaza Sísmica en el Valle de Aburrá. Valores de PGA con un periodo de retorno de 475 años.....	51
Figura 14. Formatos de representación en un SIG.....	57
Figura 15 . Mapa mundial de riesgos naturales.....	58
Figura 16 . Diagrama de cuerpo libre del bloque deslizante.....	66
Figura 17. Ejemplo del registro acelerométrico del sismo de Irpinia.....	70
Figura 18. Región de seguridad, de falla y estado límite (Caso Bidimensional).....	73
Figura 19 . Incremento del margen de seguridad mediante el FS.....	74
Figura 20. Probabilidad de falla versus índice de confiabilidad para varias distribuciones de probabilidad.....	83
Figura 21 . Regiones representativas de lluvia para movimientos en masa.....	86
Figura 22 . Esquema de cálculo de las ventanas móviles de lluvia.....	88
Figura 23 . Probabilidad de saturación del suelo obtenido por el método de Kriging.....	89
Figura 24. Parámetros en la estimación del índice de vulnerabilidad sísmica.....	94
Figura 25. Escenarios de análisis de la vulnerabilidad.....	95
Figura 26. Mapa de tipos de sistema estructural (Armazón) de las viviendas de la zona de estudio.....	98
Figura 27. Mapa de estado de conservación de las viviendas de la zona de estudio.....	99
Figura 28. Mapa de número de pisos construidos de las viviendas de la zona de estudio.....	100
Figura 29. Mapa de tipo de cubierta (techo) de las viviendas de la zona de estudio.....	101
Figura 30. Mapa de edad (vetustez) de las viviendas de la zona de estudio.....	102
Figura 31 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de madera.....	104
Figura 32 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras prefabricadas.....	104
Figura 33 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de ladrillo.....	105

Figura 34 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de concreto .....	105
Figura 35 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de ladrillo (con cubierta en losa de concreto).....	106
Figura 36 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de concreto (con cubierta en losa de concreto).....	106
Figura 37 . Esquema metodología adoptada para la evaluación de la amenaza .....	110
Figura 38 . Esquema metodología adoptada para la evaluación de la vulnerabilidad .....	111
Figura 39 . Esquema metodología adoptada para la evaluación del riesgo.....	112
Figura 40. Interface gráfica de ArcGIS y Model Builder .....	113
Figura 41. Submodelo implementado en Model Builder de ArcGIS para el cálculo del Factor de Seguridad (FS). .....	116
Figura 42. Factor de seguridad con la superficie de falla a 5m de profundidad .....	118
Figura 43. Factor de seguridad con la superficie de falla a 10 m de profundidad .....	119
Figura 44. Factor de seguridad con la superficie de falla a 20 m de profundidad .....	120
Figura 45. Factor de seguridad con la superficie del agua a 2 m de profundidad (Hw=3m) .....	122
Figura 46. Factor de seguridad con la superficie del agua coincidiendo con el terreno (Hw=5m) .....	123
Figura 47. Mapa de Aceleraciones Críticas para condición húmeda (Hw=0m).....	125
Figura 48. Mapa de Aceleraciones Críticas para condición saturada (Hw=5m).....	126
Figura 49. Valores del factor de seguridad para PGA=0.2g (Condición húmeda) .....	128
Figura 50. Valores del índice de confiabilidad para PGA=0.2g (Condición húmeda) .....	129
Figura 51. Valores de probabilidad de falla para PGA=0,2g (Condición húmeda) .....	130
Figura 52. Valores del factor de seguridad para PGA=0.2 (Condición saturada) .....	132
Figura 53. Valores del índice de confiabilidad para PGA=0.2g (Condición saturada) .....	133
Figura 54. Valores de probabilidad de falla para PGA=0,2g (Condición saturada) .....	134
Figura 55. Distribución de la probabilidad de falla total para PGA=0.2g .....	135
Figura 56. Distribución de zonas de iguales valores de PGA para 475 años de periodo de retorno .....	137
Figura 57. Comparación de valores de AC y PGA en condiciones húmedas .....	138
Figura 58. Comparación de valores de AC y PGA en condiciones saturadas .....	139
Figura 59. Valores de DN calculados a partir de la Intensidad de Arias para un sismo de duración t=20 s, PGA 0,2g Condición húmeda.....	141
Figura 60. Valores de DN calculados a partir de la Intensidad de Arias para un sismo de duración t=20 s, PGA 0,2g Condición saturada.....	142
Figura 61. Índice de Vulnerabilidad Ponderado (IVP) .....	144
Figura 62. Susceptibilidad de falla de las edificaciones de la zona de estudio. ....	146
Figura 63. Riesgo suscitado por la probabilidad de falla de las edificaciones en la zona de estudio dado que se presenta un deslizamiento como consecuencia de un evento sísmico.....	148
Figura 64. Costos suscitados por la probabilidad de eventos catastróficos en la zona de estudio. Pérdida máxima probable para una Susceptibilidad de falla >50%. .....	149
Figura 65. Localización de puntos críticos en condiciones saturadas para un PGA = 0.2g.....	152
Figura 66. Lugares críticos identificados por geólogos .....	153

Figura 67. Área del casco urbano de Medellín cubierta por cada tipo de Susceptibilidad a deslizamiento. ....	154
Figura 68. Porcentaje del Área urbana de Medellín cubierta por cada tipo de Susceptibilidad a deslizamiento. ....	155
Figura 69. Susceptibilidad a deslizamiento para un evento sísmico de 0,2g. ....	156
Figura 70. Mapa de susceptibilidad al deslizamiento asociado a sismo. Condiciones estáticas. ....	157
Figura 71. Mapa de susceptibilidad al deslizamiento asociado a sismo. Condiciones dinámicas. ....	158
Figura 72. Mapa de Probabilidad de Falla Total Anual obtenida en la investigación.....	161
Figura 73. Mapa de amenaza de movimientos en masa en el municipio de Medellín considerando la lluvia como factor detonante. Probabilidad de movimiento en masa anual (%). ....	162



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 . Parámetros geomecánicos de los suelos .....	31
Tabla 2 . Datos de referencia para la adopción del coeficiente de variación (CV) de los parámetros geotécnicos .....	32
Tabla 3. Movimientos en Masa en el Valle de Aburrá. ....	39
Tabla 4. Clasificación de los movimientos de masa de acuerdo a la velocidad .....	40
Tabla 5. Grandes deslizamientos activados por sismo. ....	43
Tabla 6 . Niveles de medidas de confiabilidad estructural .....	75
Tabla 7. Probabilidad de falla para varios valores del índice de confiabilidad y para varias distribuciones de probabilidad .....	83
Tabla 8. Estaciones pluviométricas empleadas para la consideración de la variable lluvia. ....	87
Tabla 9. Comparativo de celdas con $FS < 1$ para diferentes profundidades de la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio .....	117
Tabla 10. Comparativo de celdas con $FS < 1$ y su área de cubrimiento para diferentes alturas del nivel freático sobre la superficie de falla .....	121
Tabla 11. Comparativo de valores de $AC$ según la altura del nivel freático medido desde la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área del municipio .....	124
Tabla 12. Comparativo de celdas que presentan valores de $PGA$ mayor o igual a $AC$ según la variación del nivel freático medido desde la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio .....	136
Tabla 13. Comparativo de celdas con $DN$ superiores a 5 centímetros y su variación de acuerdo a la posición del nivel freático y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio .....	140
Tabla 14. Variabilidad en los costos de acuerdo a diferentes valores de $PGA$ . Pérdida máxima probable para una Susceptibilidad de falla $>50\%$ .....	150

## **PARTE I. Conceptos introductorios**

## CAPITULO UNO

### 1. Introducción

#### 1.1. Concepción inicial

La concepción del riesgo es una abstracción de origen completamente humano. El concepto de riesgo, asociado con la idea de porvenir sin certeza, ha estado presente desde siempre en las sociedades humanas. Su propia concepción implica un devenir de los acontecimientos. En esta característica temporal, radica la variabilidad que dificulta su predicción. Así mismo, un acontecimiento que produce una consecuencia no deseada sobre el hombre, está asociada al espacio físico donde desarrolla sus actividades. La distribución espacial de esta afectación sobre el territorio geográfico también se caracteriza por su gran variabilidad. Estas dos características, temporal y espacial del riesgo, lo convierten en un concepto esencialmente dinámico. (Soldano 2009)

En Colombia, los deslizamientos de masas de tierra, al igual que las inundaciones, constituyen los riesgos naturales más severos en el país, lo cual se debe principalmente a las diversas y variadas características geográficas y fisiográficas del país, siendo detonados por factores tanto naturales como antrópicos. (Coronado 2006)

Las condiciones particulares de la zona montañosa del Área Metropolitana del Municipio de Medellín, en cuanto a relieve, clima, topografía, geología, entre otros, hacen a la región susceptible para la ocurrencia de procesos geodinámicos como los deslizamientos de masas de tierra, que pueden afectar tanto a la población como a su infraestructura.

Un análisis de riesgos está asociado a la predicción de un determinado nivel de riesgo por un fenómeno específico o la sumatoria de varios de ellos, y la definición de sus atributos y componentes de acuerdo a su ubicación espacial y temporal. El tema concerniente al análisis de riesgos se ha venido recomendando desde hace mucho tiempo como una herramienta que propende a gestionar el riesgo.

Según la UNDRP (United Nations Disaster Relief Organization o Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre), los mapas de riesgo son fundamentales para el diseño de programas de mitigación y para la aplicación de medidas de mitigación como la zonificación urbana y los reglamentos de construcción. La Declaración y Plan de Acción de Yokohama de 1994, estableció como principio básico que el análisis de riesgos es clave para lograr el éxito en la reducción de desastres. (Maskrey 1998)

Existen diferentes enfoques sobre el concepto de riesgo, por lo que puede entenderse de muchas maneras, los cuales lo emplazan como un sinónimo de amenaza, hasta una conceptualización holística de escenarios de riesgos.

De acuerdo a Cardona (2000), desde la perspectiva de los desastres naturales, una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que considere no solamente variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, y que permita orientar de manera efectiva la toma de decisiones en un área geográfica puede contribuir a mejorar la efectividad de la gestión urbana y facilitar la identificación de medidas factibles y eficientes de reducción del riesgo.

Según esto, el autor plantea que las estimaciones obtenidas mediante técnicas matemáticas (índice relativos, variables difusas y redes neuronales) pueden facilitar la forma de realizar los análisis de riesgo sísmico de ciudades o áreas de una ciudad desde una perspectiva holística, considerando como punto de partida los modelos convencionales de estimación de pérdidas o escenarios de daños, y así, este tipo de enfoque integral y multidisciplinar podría tener en cuenta de manera más consistente las relaciones no lineales de los parámetros del contexto, la complejidad y dinámica de los sistemas sociales y contribuir a la gestión efectiva del riesgo.

Usualmente, el análisis de riesgos se limita a la producción de mapas que determinan la distribución espacial y temporal de las amenazas y sus atributos, por ejemplo, mapas de amenaza sísmica, amenaza de deslizamientos de masas de tierra y amenaza de inundaciones, entre otros.

Generalmente el análisis de riesgo que se realiza, es un análisis parcial o incompleto, puesto que representa una evaluación de amenazas y no de riesgos propiamente dichos, ya que no se toma en cuenta el concepto de la vulnerabilidad y de los costos asociados a la recuperación del desastre suscitado por la amenaza, y es precisamente una de las propuestas realizadas para desarrollar en esta investigación.

La UNDRR, definió el riesgo como "el número de pérdidas de vida, personas heridas, daños a propiedades y interrupción de actividades económicas esperadas debido a un fenómeno natural particular y consiguientemente el producto de riesgo específico y elementos en riesgo", pero una concepción más actual, debe ir más allá de una simple evaluación de amenazas, para incluir en una metodología la relación entre las pérdidas, con los diferentes elementos afectados y la naturaleza de la amenaza. El riesgo se ha definido como una probabilidad de pérdida. Por lo tanto, se considera al riesgo como una variable objetiva, neutral y absoluta que puede medirse y cuantificarse para su uso en la planificación. (Maskrey 1998)

En un principio, los análisis de riesgos se realizaban empleando técnicas analógicas, como la superposición manual de mapas temáticos, la cual había sido utilizada durante mucho tiempo para producir mapas de las amenazas ambientales, pero este tipo de técnicas cuentan con el condicionamiento de no poder superponer más que un número pequeño de mapas, por lo que resultan insuficientes para manejar grandes volúmenes de datos o para realizar operaciones espaciales más sofisticadas, además de que la información que se genera es generalmente de carácter estático, debido al tiempo y recursos necesarios para redibujar manualmente un mapa.

Es allí, donde la introducción de ramas de la Geomática como los sistemas de información geográfica (SIG), irrumpen en el manejo para el análisis y estimación de riesgos, gracias a la facilidad para capturar y administrar datos geográficos en diferentes formatos, como mapas analógicos digitalizados, imágenes de satélite y datos alfanuméricos georreferenciados; su capacidad de almacenamiento de grandes volúmenes de datos en un formato digital en diferentes estructuras de bases de datos, y al igual que la integración de números ilimitados de capas temáticas, utilizando diferentes algoritmos para llevar a cabo operaciones espaciales, de manera que se garantice la continuidad de los elementos, y obtención de la coherencia entre los datos contenidos.

Hoy en día, el uso de la geoinformación se ha convertido en una herramienta de suma importancia para la evaluación y manejo de las amenazas, tanto naturales como aquellas provocadas por la actividad humana.

El presente trabajo plantea una metodología bajo un ambiente SIG para abarcar el tema de la estimación del riesgo por deslizamientos de laderas o taludes a partir de un análisis de susceptibilidad en condiciones dinámicas, es decir accionado por un evento sísmico bajo un enfoque probabilista, realizado en el Municipio de Medellín – Colombia.

Las comunas tomadas como objeto de estudio corresponden a las comunas 1, 2 y 3 (Popular, Santa Cruz y Manrique, respectivamente), las cuales son conocidas como las comunas populares del sector nororiental de la ciudad, el cual es un sector donde se ha asentado irregularmente en su gran mayoría, población de escasos recursos económicos como producto de diversos factores tanto sociales como de desplazamiento forzado, al igual que por el déficit cualitativo y cuantitativo de vivienda, lo cual ha ocasionado una sobre población de las laderas orientales de la ciudad, con construcciones informales de precarias condiciones de calidad de vida generalmente, y por supuesto con precarias condiciones de seguridad desde el punto de vista de sismo resistencia.

Así mismo, el área de estudio piloto considerada se caracteriza por haber sufrido procesos de inestabilidad de laderas en condiciones estáticas debido a lluvia y por haber sufrido en el pasado un deslizamiento de masas de tierra considerable que provocó daños en su infraestructura urbana y su población.

El modelo propuesto para la estimación de la amenaza bajo condiciones estáticas y dinámicas está basado en la metodología de Newmark (1965), la cual se ha complementado para contemplar la incertidumbre en los parámetros geotécnicos del suelo, mediante el método de simulación de primer orden segundo momento (FOSM), y el cálculo del factor de seguridad del talud se calcula por medio del método de talud infinito considerando el criterio de falla o rotura de Mohr - Coulomb. Cabe destacar, que adicional al factor sismo que se consideró como desencadenante del deslizamiento, se consideró también el aporte del factor lluvia a dicho deslizamiento.

De igual modo, se realizó un acercamiento al tema de la vulnerabilidad de la infraestructura urbana correspondiente a vivienda y su población, mediante los métodos de índices de vulnerabilidad, árboles de eventos y consulta a expertos, adaptando la metodología a las condiciones locales y particulares de la zona de estudio, a partir de la información catastral y censal disponible.

Toda vez que se han calculado tanto la amenaza o peligrosidad del deslizamiento de la ladera bajo condiciones dinámicas, al igual que la vulnerabilidad de los elementos expuestos, ambos en términos de probabilidades, se realizó la estimación del riesgo correspondiente, presentando los resultados obtenidos en forma de mapa.

El enfoque de la investigación se enmarcó desde una combinación de criterios heurísticos para valorar los factores o variables incidentes en la vulnerabilidad de las edificaciones, para posteriormente darle un enfoque probabilista, en el cual se obtuviera un índice del riesgo a sufrir un deslizamiento de masas de tierra accionado por eventos sísmicos, denominado dentro de la investigación como Índice RDS, representado estadísticamente como la probabilidad de que una edificación sufra daño debido a que se produjo un deslizamiento de tierra accionado por el movimiento sísmico para un periodo de tiempo dado bajo las condiciones estudiadas.

## 1.2. Objetivos de la investigación

### 1.2.1. Objetivo General

Estimar cuantitativamente el riesgo de deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín a partir de modelos de base física y probabilísticos mediante el uso de herramientas de la Geomática.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

-Desarrollar una aplicación (modelo) bajo ambiente SIG que ofrezca funcionalidades específicas para reducir la complejidad y la incertidumbre en el análisis y estimación de riesgos por deslizamientos de masas de tierra accionados por sismos considerando la componente espacial y temporal.

-Estimar la amenaza de deslizamientos ocasionados por sismos en la ciudad de Medellín considerando efectos topográficos, hidrológicos, geológicos y geotécnicos.

-Estimar la vulnerabilidad de la infraestructura urbana (viviendas), debido a movimientos de masa ocasionados por sismos, usando información del inventario catastral y del Plan de Ordenamiento Territorial.

-Estimar la susceptibilidad de falla de las viviendas del sector nororiental de la ciudad, y el riesgo correspondiente a la ocurrencia del evento sísmico y a las condiciones de fragilidad de las estructuras, en términos de costos.

-Determinar la variación de los costos por las pérdidas máximas probables en las edificaciones, de acuerdo a la variación de la aceleración pico del terreno.

### 1.3. Contenido de la memoria

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro grandes partes para una mejor comprensión y desarrollo, las cuales a su vez están compuestas por diferentes capítulos.

La primera parte corresponde a los conceptos introductorios de la investigación, en los cuales se incluye una síntesis de la misma, una concepción inicial del concepto de riesgo y la utilización de los sistemas de información geográfica para la evaluación del mismo, al igual que los objetivos propuestos en esta investigación.

La segunda parte corresponde a la contextualización y caracterización de la zona de estudio en cuanto a algunos componentes geológicos, geográficos, entre otros. Se plantean varios conceptos básicos sobre deslizamientos de masas de tierra y los factores detonantes de los mismos, conceptos sobre sismología y sobre análisis y gestión de riesgos, en cuanto a la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y el riesgo como tal. Así mismo, se plantean los conceptos introductorios que corresponden a la Geomática y a los sistemas de información geográfica, y su aplicación al tema de la investigación.

La tercera parte corresponde a los conceptos y metodologías aplicadas para cumplir el objetivo principal de la investigación, en cuanto a la metodología empleada para la evaluación de la estabilidad de laderas, métodos probabilísticos para la estimación de probabilidades de falla o deslizamiento, la consideración de los factores lluvia y sismo como detonantes de un deslizamiento, modelos de evaluación de vulnerabilidad, índices de vulnerabilidad física de edificaciones y la estimación del índice de riesgo y sus costos asociados.

La cuarta y última parte de la investigación corresponde a la descripción de la implementación del modelo de evaluación del riesgo en una aplicación o modelo para software SIG y el análisis de los resultados obtenidos en cada fase del desarrollo de la investigación. Así mismo se incluye en esta parte, las conclusiones obtenidas y la proyección del presente trabajo.

Así mismo, se cuenta con varios anexos digitales dentro del disco compacto que contiene el soporte magnético de la investigación, entre los que se destacan la base de datos cartográfica que incluye los insumos para los modelos implementados, así como los resultados de los mismos; y las hojas de cálculo con los resultados tabulados de los procesos.

## **PARTE II. Contextualización y caracterización**

## CAPITULO DOS

### 2. Caracterización de la zona de estudio

#### 2.1. Generalidades

El municipio de Medellín se encuentra localizado dentro del denominado Valle de Aburrá, cuenca natural del Río Medellín, que corresponde a una sub-región ubicada en el centro-sur del departamento de Antioquia, en medio de la cordillera central de Los Andes. En la Figura 1, se puede apreciar la ubicación del municipio de Medellín tanto al interior del departamento de Antioquia, como en el centro del Valle de Aburrá.

La ciudad se extiende longitudinalmente sobre el eje natural del río Medellín enmarcada en dos ramales de la cordillera central, con altitud variable entre 1.460 m.s.n.m. en la confluencia de las quebradas La Iguana, Santa Elena y el río Medellín, y 3.000 m.s.n.m. en los Altos del Romeral, Padre Amaya y Las Baldías al occidente.

La temperatura del municipio de Medellín está determinada por los pisos térmicos que van del páramo (que equivale a 3 km<sup>2</sup> del territorio), pasando por el clima frío (192 km<sup>2</sup>) hasta llegar al clima templado (185 km<sup>2</sup>), en donde está la zona urbana, la cual tiene una temperatura que oscila entre 20 y 28 °C, según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Las temperaturas más altas oscilan entre 27 y 28.6 °C, con máxima absoluta de 32 °C, y las más bajas oscilan alrededor de 16 °C, con mínima absoluta de 10 °C.

Históricamente, se presenta una tendencia bimodal en la que al comienzo y la mitad del año son estaciones secas, y el resto del año el clima es variable, incluso lluvioso en algunas épocas. La precipitación media anual es moderada de aproximadamente 1.700 mm, y no es igual en todo el valle de Aburrá, pues usualmente llueve más al sur que al norte.

Según cifras estimadas por el Departamento Nacional de Estadísticas (DANE), cuenta con una población de 2.636.101 habitantes para el año 2010, lo que la convierte en la segunda ciudad más poblada de Colombia.

El territorio municipal asciende a 37.621 hectáreas y está compuesto por 10.210 hectáreas de suelo urbano (27,1%), 401 hectáreas de áreas de expansión urbana (1,1%) y 27.010 hectáreas de suelo rural (71,8%), de acuerdo con la clasificación del suelo definida en el Plan de Ordenamiento Territorial.

El área de la ciudad de Medellín corresponde al 0.6% del área total del departamento de Antioquia y al 33.15% del área total del Valle de Aburrá.

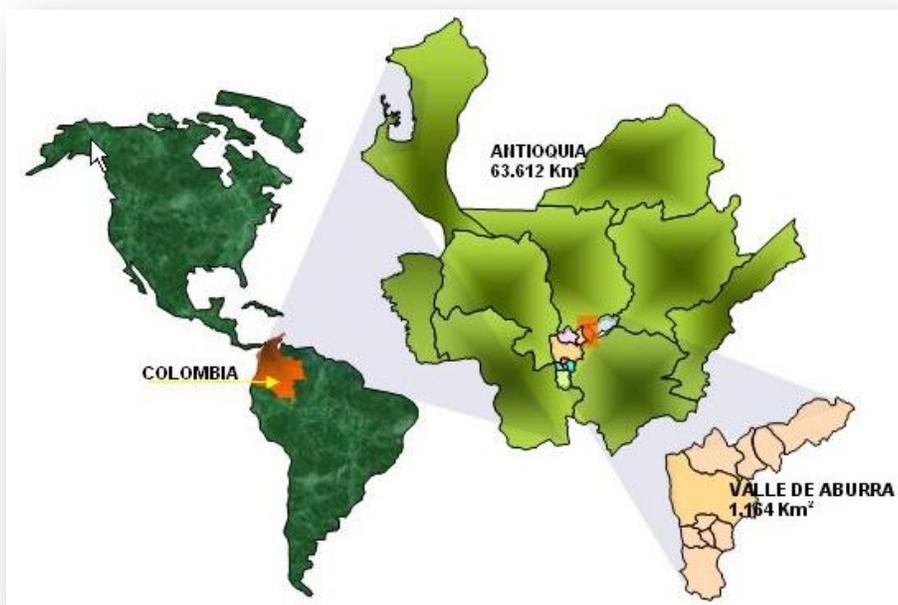


Figura 1. Localización del Municipio de Medellín y el Valle de Aburrá.  
Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA 2011)

En términos político administrativos se puede apreciar en la Figura 2, que la ciudad está dividida en 16 comunas urbanas donde se ubican los barrios y en 5 corregimientos ubicados en la zona rural.

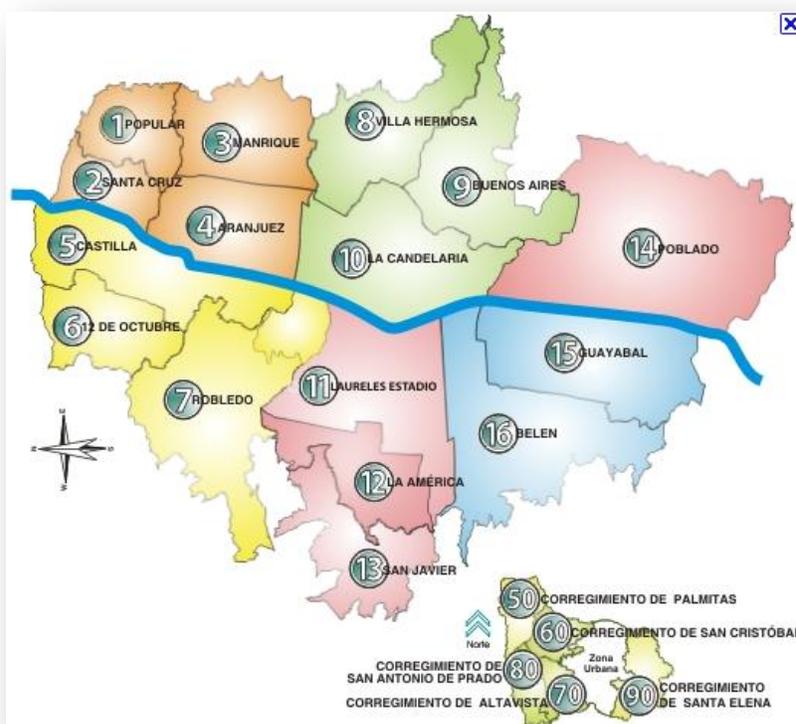


Figura 2. División político administrativa del Municipio de Medellín.  
Fuente: Municipio de Medellín (Medellín 2011)

## 2.2. Geología

Desde el punto de vista geológico en el Valle de Aburrá y los altiplanos circundantes, afloran diferentes unidades litológicas que incluyen diversas rocas de edad, origen y composición diferente. Respecto a las edades, es posible encontrar desde rocas paleozoicas hasta depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición, es posible encontrar rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas, y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos; rocas volcansedimentarias y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico. Así mismo, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá establece que el marco geológico es bastante complejo y presenta una gran influencia de los sistemas de fallas de Cauca y Romeral, además de sistemas menores asociados.

De acuerdo al estudio de Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (AMVA 2007), las principales formaciones en diferentes grados de meteorización y fracturamiento que se encontraron en el Valle de Aburrá corresponden al Grupo de Caldas (Anfibolitas del Alto de Minas, Esquistos de Caldas y Anfibolitas Granatíferas de Caldas), Grupo el Retiro (Anfibolitas de Medellín, Esquistos Anfibólicos de Baldías, Migmatitas de Puente Peláez y Gneis de La Ceja), Esquistos del complejo Cajamarca, intrusivo triásico (Stock de Amaga y Gneis de Palmitas), la milonita de La Iguana del intrusivo Jurásico, complejo ofiolítico de Romeral (Gabros de Romeral y Peridotita de Romeral), complejo Ofiolítico de Aburra (Metabasitas del Picacho, Dunitas de Medellín y Gneis milonítico de Sajonia), complejo Quebradagrande (miembro volcanosedimentario y miembro volcánico), intrusivos cretáceos (Batolito Antioqueño, Stock de Las Estancias, Stock de Media Luna, Batolito de Ovejas, Stock de AltaVista, Stock de San Diego y Gabros de Copacabana), depósitos de vertiente (depósitos de deslizamientos y diferentes depósitos de flujos de escombros y/o lodos), depósitos aluviales (depósitos aluviales y depósitos aluvio torrenciales) y depósitos antrópicos.

El municipio de Medellín corresponde a un ambiente geotécnico definido por el valle aluvial del Río Medellín y sus afluentes, enmarcado por laderas hacia los costados Oriental y Occidental, las cuales en sus partes altas corresponden a afloramientos de rocas ígneas y rocas metamórficas con recubrimientos parciales, tales como granito, gneis, serpentina, esquistos, rocas talcosas, diorita, diabasa y algunos pórfidos. También se observa la presencia de filones de cuarzo lechoso, y muestras de óxido de hierro, sobre los cuales drenan numerosas quebradas tributarias del río Medellín. En la Figura 3, se presenta el mapa geológico con las diferentes unidades para el municipio de Medellín.

La parte terrosa es el resultado de la descomposición de las rocas antes mencionadas, y corresponden a una arcilla ferruginosa, arenácea, de poca o nula plasticidad, de color anaranjado hasta color ocre. Usualmente se puede apreciar como recubrimiento en el talud de las montañas, y en algunas partes como en los barrios del oriente y nororiental de la ciudad.

En la Tabla 1 se muestran las diferentes unidades litológicas tenidas en cuenta en el proceso, las cuales fueron consideradas de acuerdo a criterios de homogeneidad en el comportamiento mecánico. En dicha tabla se presentan los valores de las propiedades geomecánicas: Peso específico ( $\gamma$ ), Cohesión ( $c'$ ) y Ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ).

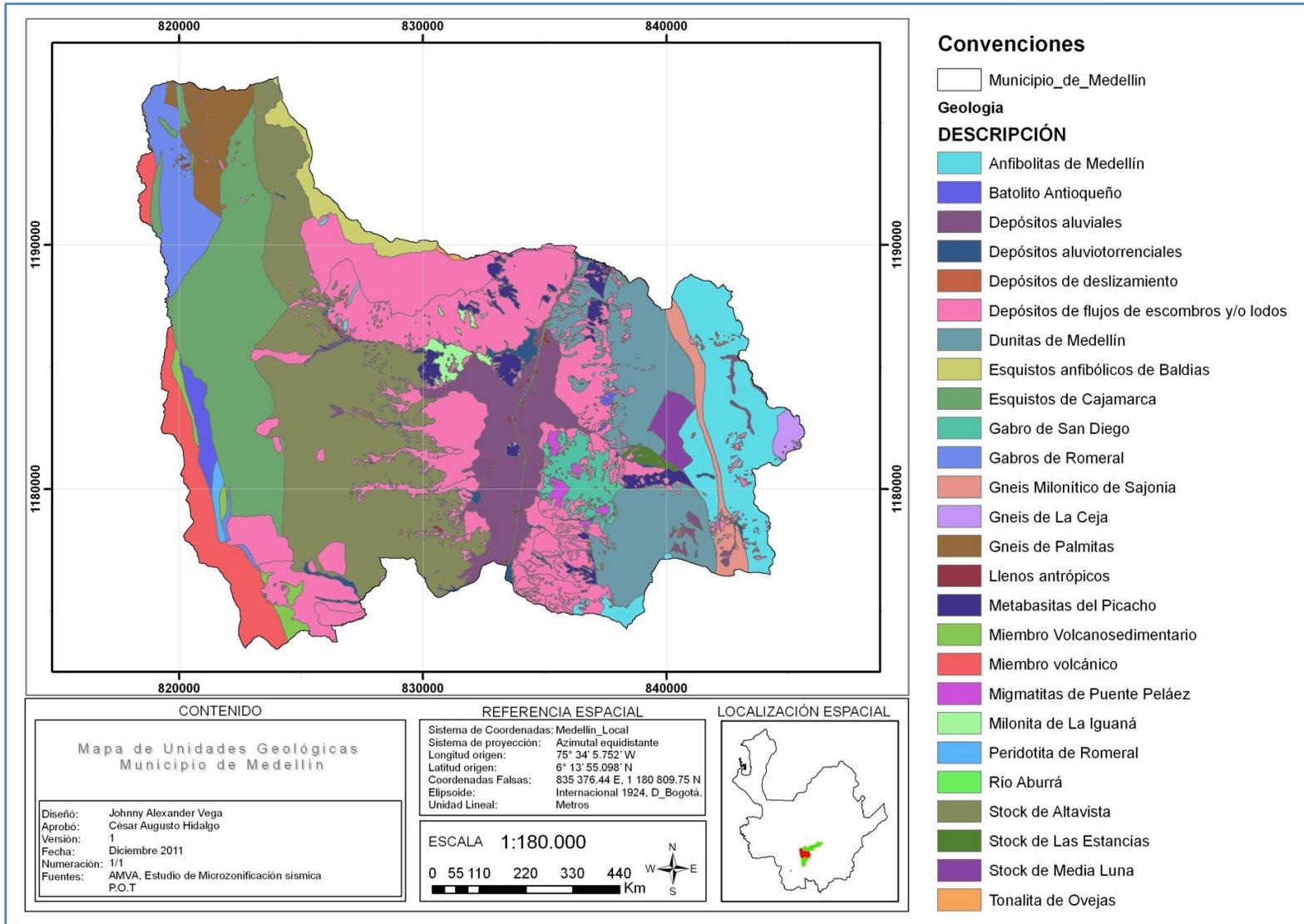


Figura 3. Mapa de unidades geológicas del Municipio de Medellín.  
Fuente: Elaboración propia. Modificado de AMVA (2007)

<b>Unidad geológica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Gamma (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Phi (°)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
<i>PZagC</i>	Anfibolita granatífera de Caldas	18,9	29,9	34,3
<i>TRaM</i>	Anfibolitas de Medellín	18,9	29,9	34,3
<i>PZaAM</i>	Anfibolitas del Alto de Minas	18,9	29,9	34,3
<i>KcdA</i>	Batolito Antioqueño	18,0	26,2	35,5
<i>Qal</i>	Depósitos aluviales	17,7	29,0	35,0
<i>Qat</i>	Depósitos aluviotorrenciales	19,0	35,0	12,0
<i>NFI</i>	Depósitos flujos de escombros	14,8	32,0	28,4
<i>JKuM</i>	Dunitas de Medellín	16,0	24,0	30,0
<i>TReaB</i>	Esquistos anfibólicos de Baldías	17,6	27,0	55,0
<i>TReC</i>	Esquistos de Cajamarca	17,6	27,0	55,0
<i>PZeC</i>	Esquistos de Caldas	17,6	27,0	55,0
<i>KgSD</i>	Gabro de San Diego	18,1	33,2	31,7
<i>KgC</i>	Gabros de Copacabana	18,1	33,2	31,7
<i>KgC</i>	Gabros de Copacabana	18,1	33,2	31,7
<i>JgR</i>	Gabros de Romeral	18,1	33,2	31,7
<i>TRgLC</i>	Gneis de La Ceja	17,9	19,0	16,0
<i>TRgP</i>	Gneis de Palmitas	17,9	19,0	16,0
<i>JKgMS</i>	Gneis Milonítico de Sajonia	17,9	19,0	16,0
<i>QII</i>	Llenos antrópicos	19,0	17,0	10,0
<i>JKmbP</i>	Metabasitas del Picacho	19,0	25,0	22,0
<i>KvQG</i>	Miembro volcánico	19,0	27,0	30,0
<i>KvsQG</i>	Miembro Volcanosedimentario	19,0	24,0	25,0
<i>TRmPP</i>	Migmatitas de Puente Peláez	18,5	27,5	17,0
<i>JmI</i>	Milonita de La Iguañá	19,0	32,0	16,0
<i>JuR</i>	Peridotita de Romeral	19,0	24,0	30,0
<i>KdA</i>	Stock de Altavista	18,0	29,0	19,0
<i>TRgA</i>	Stock de Amagá	18,6	31,0	16,0
<i>KcdE</i>	Stock de Las Estancias	18,6	31,0	16,0
<i>KcdML</i>	Stock de Media Luna	18,6	31,0	16,0
<i>KtO</i>	Tonalita de Ovejas	18,6	32,0	16,0

**Tabla 1 . Parámetros geomecánicos de los suelos**

Fuente: Hidalgo (2012)

Los valores del coeficiente de variación para cada parámetro se adoptaron a partir de datos presentados en referencias bibliográficas, tal como se presentan en la Tabla 2.

<b>Parámetro</b>	<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>Fuente</b>
<i>Peso específico</i>	3-7 4-8	Ribeiro, 2008* USACE, 1994*
<i>Peso unitario sumergido</i>	0-10	Duncan, 2000
<i>Cohesión</i>	40 (20 a 80)	
<i>Ángulo de fricción efectivo</i>	2-13 3,7-9,3 arenas y 7,5-10,1 arcillas	Ribeiro, 2008* USACE, 1994*
<i>Resistencia no drenada de arcillas</i>	13-40 11-45	Ribeiro, 2008* USACE, 1994*
<i>Coefficiente de permeabilidad (k)</i>	20-90	USACE, 1994*
<i>Coefficiente de consolidación (Cv)</i>	33-68	Duncan, 2000
<i>Presión de preconsolidación (Pp)</i>	10-35	Duncan, 2000
<i>Índice de compresión (Cc)</i>	10-37	Duncan, 2000
<i>Número de golpes SPT (N)</i>	15-45	Ribeiro, 2008*
<i>Resistencia a la compresión uniaxial de metalimolitas</i>	29-55	Hidalgo y Assis, 2003a
<i>Resistencia a la compresión uniaxial de metacalcáreos</i>	18-40	Hidalgo y Assis, 2003a, Hidalgo et al. 2003b

**Tabla 2 . Datos de referencia para la adopción del coeficiente de variación (CV) de los parámetros geotécnicos**

Fuente: Hidalgo y Assis (2011)

Con base en la Tabla 2, se adoptó un coeficiente de 10% para el ángulo de fricción, 50% para la cohesión y 5% para el peso unitario del suelo al momento de implementar el modelo, de acuerdo a los estudios de Hidalgo y Assis (2011), que corresponden con la variabilidad de los parámetros geotécnicos a nivel local.

### 2.3. Geomorfología

La geomorfología es un factor que muestra detalles interesantes de la estabilidad, ofreciendo características de inclinación y forma del paisaje, ayudando a distinguir tipos de movimientos en masa, además, de reflejar procesos físicos asociados. Un mapa de geomorfología puede reflejar bien las formaciones geológicas y las variaciones de las propiedades útiles en la ingeniería. (Varnes 1984)

El mapa de unidades geomorfológicas usado en este estudio fue el generado por el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá, el cual fue adaptado y se presenta en la Figura 4.

### 2.4. Pendientes

La pendiente es un factor preponderante en lo concerniente a la estabilidad de las laderas, puesto que proporciona información sobre la magnitud de las fuerzas gravitatorias actuantes sobre el bloque deslizante. Se considera asociada además, a características como el espesor de la capa de suelo residual, el potencial de deslizamiento, y la profundidad del nivel freático.

Según Aristizábal *et al.* (2010), se puede decir que no es necesariamente cierta la premisa de que:

“A mayor pendiente mayor es la probabilidad de ocurrencia del evento de movimiento en masa”, ya que debe existir un espesor de suelo suficiente, que comúnmente se presenta en pendientes intermedias.

En la Figura 5, se presenta el mapa de pendientes del municipio de Medellín, obtenido a partir de un modelo digital de elevaciones (DEM) del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

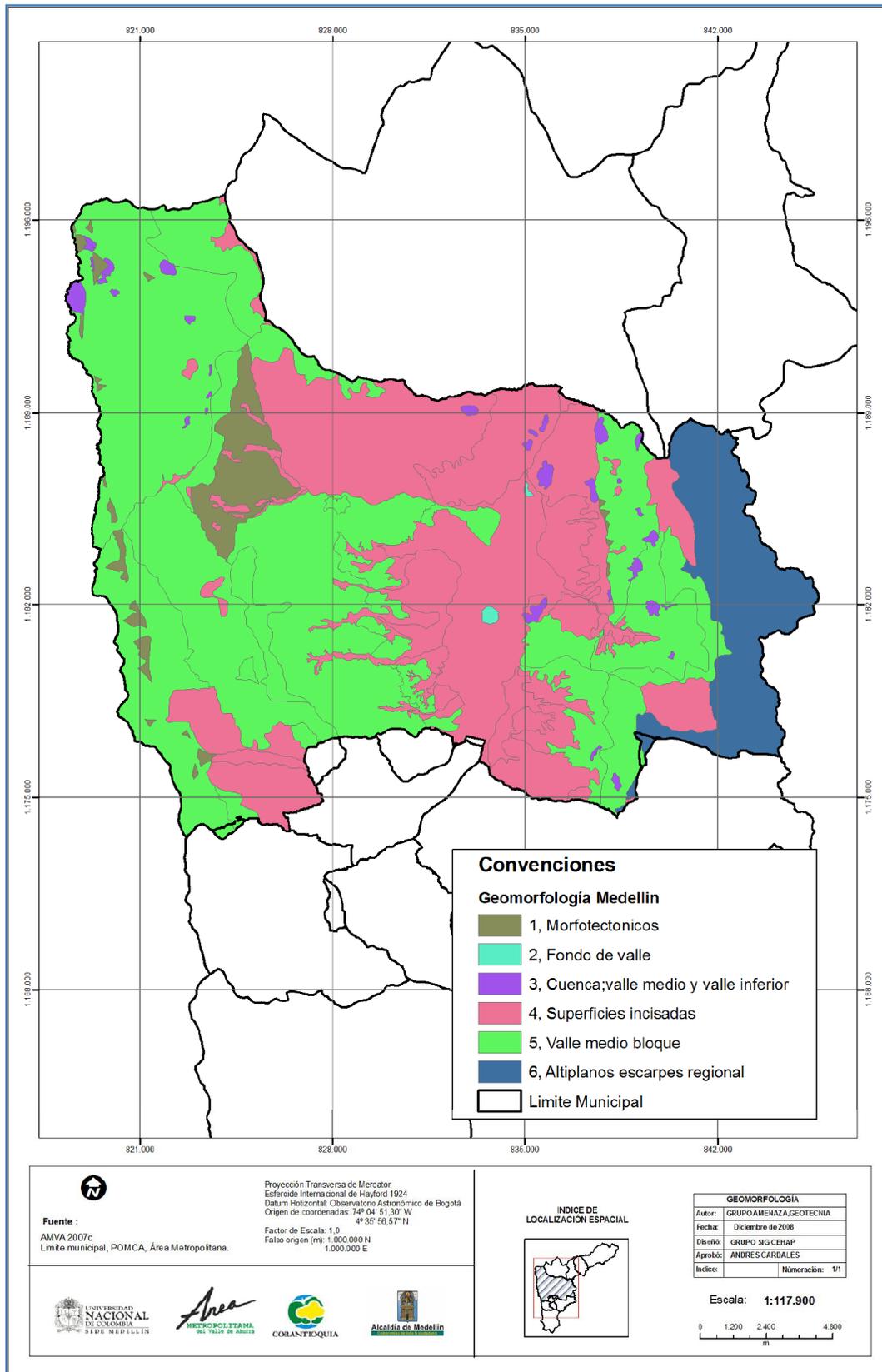


Figura 4. Mapa de unidades geomorfológicas del Municipio de Medellín.

Fuente: AMVA (2009)

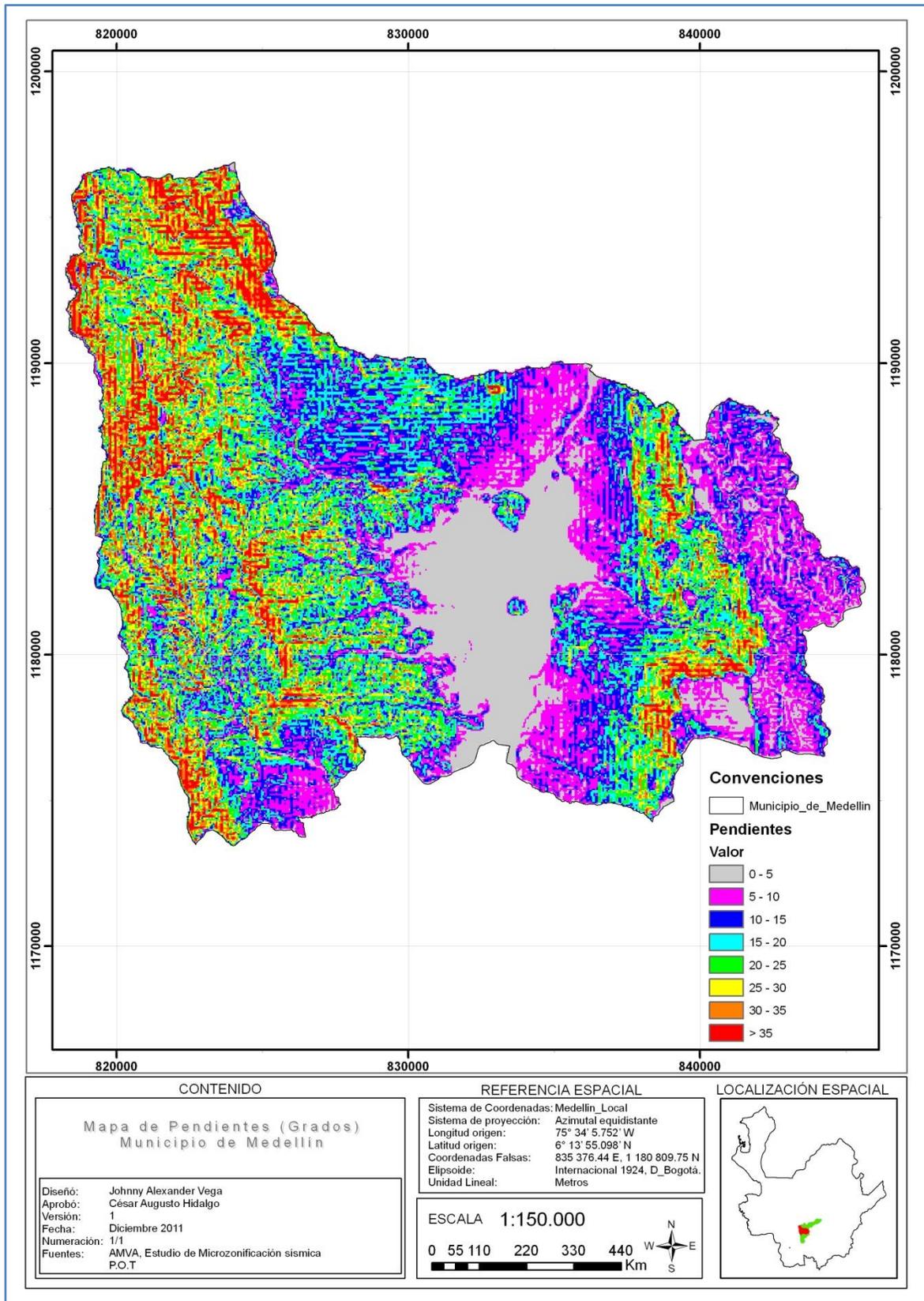


Figura 5 .Mapa de pendientes del municipio de Medellín en Grados.

Fuente: Elaboración propia a partir de DEM del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

## 2.5. Procesos Morfodinámicos

Considerado como un factor indispensable puesto que muestra la presencia o ausencia de algún tipo de inestabilidad del terreno en un periodo determinado de tiempo, lo cual lo convierte en una buena aproximación al análisis probabilístico de la ocurrencia de fenómenos de movimientos de masa.

Los registros de estos procesos corresponden a la base de datos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que contiene información digitalizada en tres geometrías diferentes (área, lineal y puntual), según el tipo de proceso.

La clasificación de los procesos morfodinámicos de acuerdo a AMVA (2009) es la siguiente:

- Tipo Areal
  - o Deslizamiento de rocas
  - o Movimiento de masa activo
  - o Movimiento de masa antiguo
- Tipo Lineal
  - o Movimiento de masa activo
  - o Movimiento de masa inactivo
- Tipo Puntual
  - o Deslizamiento

Para el municipio de Medellín existen registros en los inventarios del Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres (SIMPAD), mientras que para el resto de los municipios que conforman el área metropolitana, existen registros de la base de datos del proyecto DESINVENTAR del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En la Figura 6 se presentan los procesos morfodinámicos, producto de movimientos en masa ocurridos en un intervalo de tiempo de aproximadamente 20 años comprendidos entre 1985-2006.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

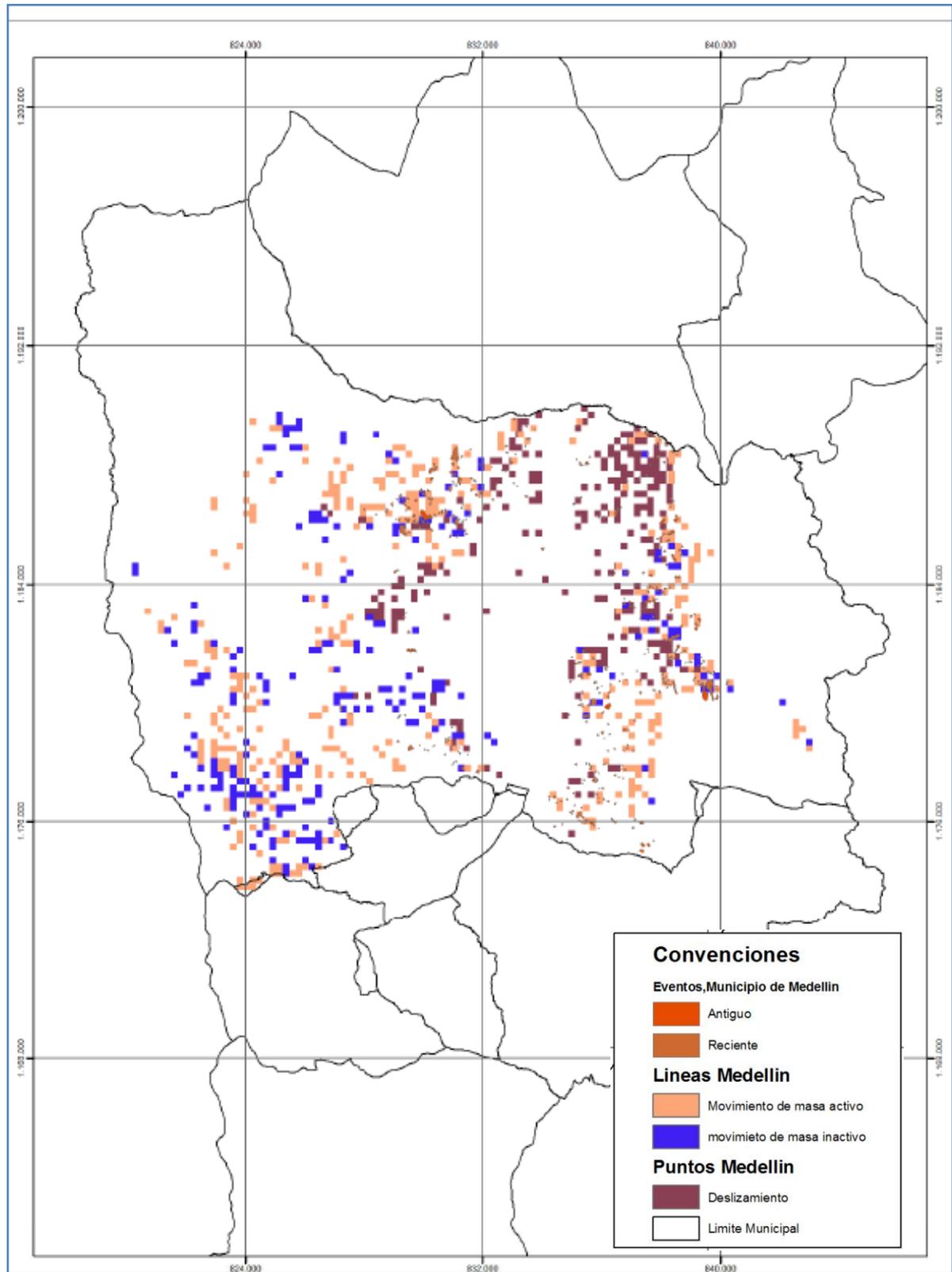


Figura 6. Mapa de procesos morfodinámicos en el Municipio de Medellín (1985-2006)

Fuente: AMVA (2009)

## CAPITULO TRES

### 3. Conceptos sobre deslizamientos de masas de tierra

En los últimos años, el crecimiento de la población y la expansión de asentamientos urbanos sobre áreas inestables han incrementado el impacto de los desastres naturales, especialmente en países en vía de desarrollo como Colombia, y localmente en el Valle de Aburrá, región habitualmente afectada por deslizamientos de masa.

Los deslizamientos son originados por la conjugación de diversos factores detonantes, y se constituyen en una causa frecuente de desastres alrededor del mundo. Los costos socioeconómicos suscitados por dichos desastres son considerables y van en aumento debido a la actual situación de los asentamientos irregulares urbanos que se localizan sobre laderas inestables aumentando la vulnerabilidad de dichos asentamientos.

De acuerdo a Aristizábal *et al.* (2010), la evaluación de la amenaza debe incluir en primera instancia, la evaluación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos y solo puede ser estimada con un conocimiento preciso de la evolución, dinámica y mecanismos geomorfológicos que han modelado el paisaje.

Factores como el uso del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente y la precipitación, afectan de manera directa la vulnerabilidad a deslizamientos.

Amenazas naturales como los eventos sísmicos, pueden considerarse como un factor crítico, puesto que generan inestabilidad del terreno y pueden accionar un deslizamiento de masa, cuando cierta aceleración pico supere la aceleración crítica del talud, ocasionando un proceso geodinámico.

Para el análisis de este tipo de amenaza, se debe realizar según Salgado (2005), una caracterización de los peligros derivados de terrenos inestables mediante análisis geomorfológico, recurriendo al uso de mapas, fotos aéreas, ortofotos y reconocimiento de campo.

En el Valle de Aburrá, los deslizamientos han causado considerables pérdidas económicas y humanas. En la Tabla 3 se resumen los eventos que han causado mayor impacto en cuanto al número de víctimas.

#### 3.1. Tipos de movimientos de masa

En general, los movimientos de masa se refieren a procesos geológicos exógenos, bien sea de forma natural o inducidos por acción antrópica, que involucran movimiento de volúmenes de material ladera abajo, debido a la acción gravitatoria.

Según la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS 2011), los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que van modificándose a lo largo del tiempo, para adaptarse a las nuevas condiciones geológicas y climáticas. Las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio y ante el cambio de condiciones, su morfología se va modificando buscando de nuevo el equilibrio.

<b>Movimiento en masa</b>	<b>Fecha</b>	<b>Localización</b>	<b>Daños</b>	
			<b>Muertos</b>	<b>Afectados</b>
Flujo de escombros	23 de Abril 1880	La Iguaná (Medellín)	9	2500
Flujo de lodos	18 de Junio 1927	Rosellón (Envigado)	18	25
Flujo de lodos	12 de Julio 1954	Media Luna (Santa Elena)	>100	67
Deslizamiento de escombros	25 de Junio 1973	La Manguala (San Antonio de Prado)	13	24
Flujo de lodos	29 de Sept 1974	Santo Domingo (Medellín)	>70	1500
Flujo de escombros	20 de Oct 1980	San Antonio (Medellín)	>18	250
Deslizamiento de escombros	23 de Nov 1984	Santa María (Itagüí)	10	200
Deslizamiento de lodo	26 de Sept 1985	Popular 2 (Medellín)	6	60
Deslizamiento y flujo de lodos	27 de Sept 1987	Villatina (Medellín)	>500	300
Deslizamiento de escombros	31 de Mayo de 2007	La Cruz (Medellín)	7	No Disponible
Deslizamiento rotacional y flujo	31 de Mayo 2008	El Socorro (Medellín)	27	No Disponible
Deslizamiento rotacional	17 de Nov 2008	El Poblado (Medellín)	12	No Disponible
Flujo de lodo	Diciembre 2010	Las Palmas (Medellín)	-	No Disponible
Flujo de lodo y escombros	Diciembre 2010	La Gabriela (Bello)	>30	No Disponible

**Tabla 3. Movimientos en Masa en el Valle de Aburrá.**

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de prensa local

En general los movimientos de masa en laderas, se clasifican de acuerdo al tipo de suelo o roca, la velocidad y el mecanismo o tipo de movimiento.

La velocidad con que se puede desplazar una masa de suelo o roca es un factor preponderante, debido a que una mayor velocidad representa mayor peligro, pero pese a esto, un deslizamiento lento puede ser imparable y destructivo, ya que este puede arrasar elementos en mayor o menor grado, de acuerdo a la vulnerabilidad y fragilidad de los mismos ante las nuevas solicitaciones de carga.

Keefer (1984) realiza una clasificación de los movimientos de masa de acuerdo a la velocidad, la cual se presenta en la siguiente tabla:

<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Velocidad</b>
Extremadamente lento	$v < 0.6$ m/año
Muy lento	$v = 0.6$ a $1.5$ m/año
Lento	$v = 1.5$ m/año a $1.5$ m/mes
Moderado	$v = 1.5$ m/mes a $1.5$ m/día
Rápido	$v = 1.5$ m/día a $0.3$ m/min
Muy rápido	$v = 0.3$ m/min a $3$ m/s
Extremadamente rápido	$v > 3$ m/s

**Tabla 4. Clasificación de los movimientos de masa de acuerdo a la velocidad**

Fuente: Keefer (1984)

El mecanismo o tipo de movimiento se clasifica usualmente en tres categorías principales, las cuales son: Desprendimientos que pueden ser caídas o vuelcos; deslizamientos que pueden ser rotacionales o traslacionales; y por último flujos y esparcimientos laterales, producidos por licuefacción del terreno. Existe además, la posible combinación de los anteriores, llamados movimientos complejos. En la Figura 7 se ilustran gráficamente varios de los tipos de movimientos de masa enunciados.

Wilson y Keefer (1985) encontraron para la zona de Los Ángeles, California, los siguientes índices que correlacionan las pendientes con el tipo de movimiento:

- ✓ Las caídas de rocas o suelos se suelen producir con pendientes mayores a  $40^\circ$
- ✓ Los deslizamientos traslacionales de rocas con mayores a  $35^\circ$
- ✓ Las avalanchas de rocas o suelos con mayores a  $25^\circ$
- ✓ Los deslizamientos traslacionales de suelos y los deslizamientos rotacionales o de bloques de rocas con mayores a  $15^\circ$
- ✓ Los deslizamientos rotacionales de suelos y los flujos lentos con mayores de  $10^\circ$
- ✓ Los deslizamientos de bloques de suelos con mayores de  $5^\circ$
- ✓ Los flujos rápidos con mayores de  $2^\circ$  a  $3^\circ$
- ✓ Los esparcimientos laterales con mayores de  $0.3^\circ$ .

Así mismo, Keefer (1984) en sus investigaciones sobre el tema a nivel global, encontró una relación de la frecuencia típica de los distintos tipos de movimientos ante acciones sísmicas, las cuales se resumen a continuación:

- ✓ Aproximadamente un 90% de los casos corresponden a caídas de rocas y deslizamientos traslacionales de suelo o rocas.
- ✓ Aproximadamente un 9% de los casos corresponden a esparcimientos laterales, deslizamientos rotacionales de suelos, deslizamientos de bloques de suelos y avalanchas de suelos.
- ✓ Aproximadamente un 0.9% de los casos corresponden a caídas de suelos, flujos rápidos y deslizamientos rotacionales de rocas.
- ✓ Aproximadamente un 0.1% al resto de tipos.

Puede apreciarse entonces que prevalecen los movimientos traslacionales, los cuales son los analizados mediante la metodología adoptada en esta investigación, la cual se expone más adelante, pues corresponde a los deslizamientos más probables de ocurrencia dentro de la zona de estudio.

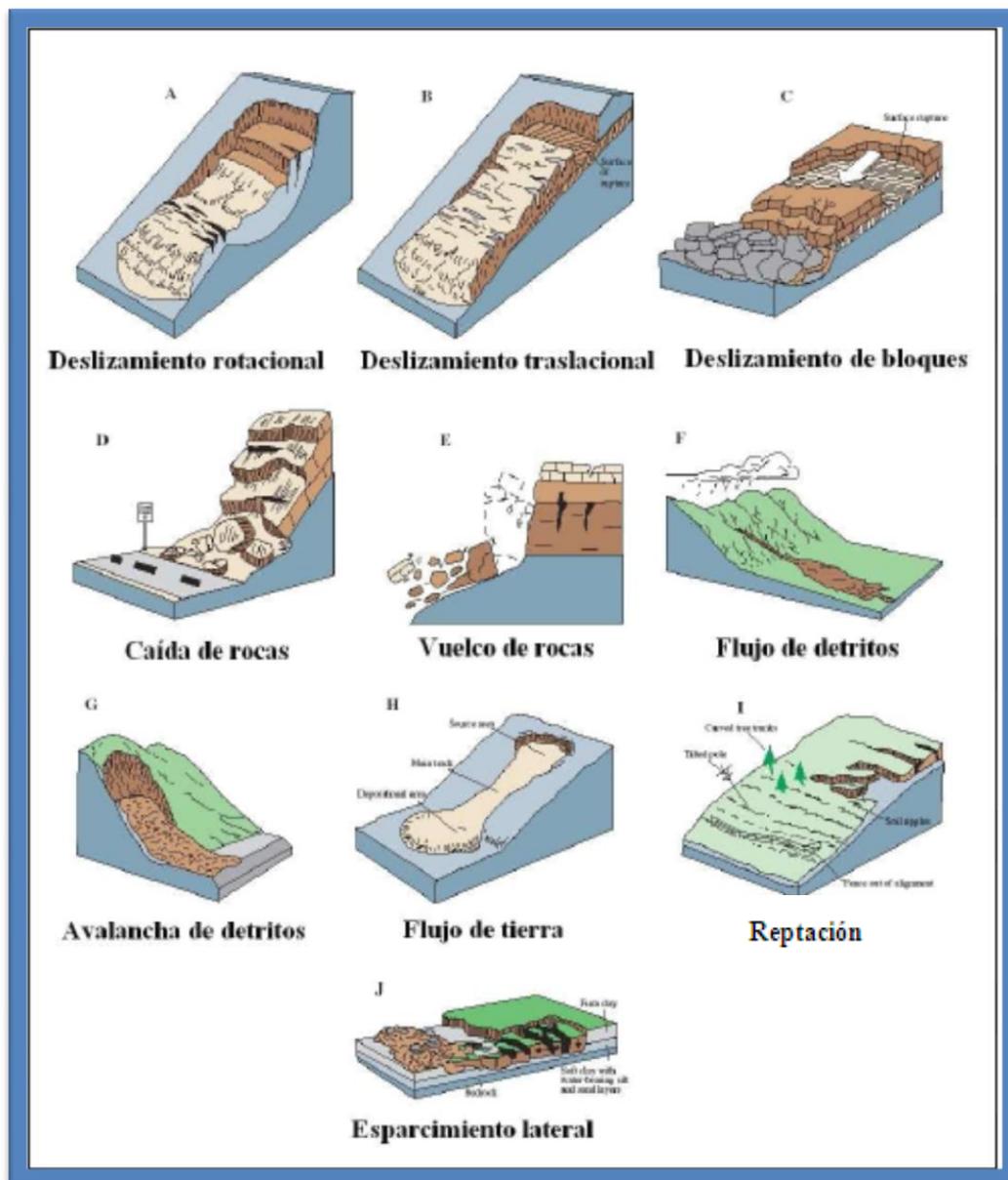


Figura 7. Tipos de movimientos de masa.  
Fuente: Adaptado de USGS (2008)

### 3.2. Factores que afectan la estabilidad del terreno

La estabilidad de los taludes está condicionada a la acción de fuerzas naturales o antrópicas que tienden a generar el movimiento del material que lo compone ladera abajo, y de las fuerzas opuestas que tienden a impedir dicho movimiento. El desequilibrio en estas fuerzas ejercidas sobre el terreno debido a la presencia de ciertos factores, produce los deslizamientos de masa de tierra.

De acuerdo a Coronado (2006), se clasifican estos factores en dos grupos según su función: Los factores de susceptibilidad (condicionantes) son aquellos factores que tienden a que un talud se torne inestable,

pero sin llegar a iniciar o accionar el deslizamiento. Estos factores corresponden a características intrínsecas y extrínsecas del terreno como el relieve (topografía), la geología, la geomorfología, la hidrología, el clima y la vegetación.

Los factores detonantes (desencadenantes) son aquellos factores que inducen la dinámica del deslizamiento, los cuales pueden generar en mayor o menor grado un deslizamiento. Entre ellos se encuentran las actividades volcánicas, los eventos sísmicos, la lluvia y la actividad antrópica.

Domínguez (2003), define los factores condicionantes como aquellos relacionados con la caracterización geológica, que hacen referencia a la propia naturaleza y estructura del terreno. Algunos condicionantes básicos, están relacionados con la orografía del terreno, como la pendiente, la altitud y la orientación, los cuales influyen en la aparición de inestabilidades. Características litológicas como la resistencia de los materiales, su estado tensional, junto con el comportamiento hidrogeológico del terreno, van a condicionar en gran medida las probabilidades de desestabilización.

Habitualmente las inestabilidades de taludes o laderas ocurren por causa de una modificación del estado de esfuerzos en el interior del talud, las cuales corresponden generalmente según Delgado *et al.* (2006), a los efectos del agua, sismos, las erupciones volcánicas, la erosión por la dinámica fluvial o costera, los procesos de meteorización y/o la acción del hombre.

Así mismo, Domínguez (2003) define como factores desencadenantes aquellos que cuando actúan provocan la aparición de un evento. Entre éstos caben las precipitaciones y la aplicación de cargas que modifican el estado tensional, como ocurre con los sismos. Para el desarrollo de este trabajo se consideran como factores desencadenantes, la lluvia y el efecto de los sismos sobre las laderas; y para el caso de los factores condicionantes, la pendiente del terreno, la geología y geomorfología local.

### 3.3. Deslizamientos asociados a eventos sísmicos

Los deslizamientos de ladera inducidos por terremotos están documentados desde el siglo IV AC y durante el siglo pasado causaron decenas de miles de muertos y billones de dólares en pérdidas económicas en todo el mundo. A pesar de su geomorfología e importancia económica, los deslizamientos inducidos por sismos aún no son bien comprendidos. (Figueras *et al.* 2005).

El riesgo en los deslizamientos de ladera generados por un evento sísmico, depende de varias variables, entre las cuales se encuentran, la magnitud y la propagación del evento, así como la distribución de la población y de la infraestructura expuesta al evento o desastre. Puesto que no abundan los trabajos de zonificación del riesgo de deslizamientos de laderas en los que se incluya la causa sísmica, el propósito de la presente investigación, busca abarcarlo desde un ambiente SIG, bajo una mirada práctica.

En ocasiones los eventos sísmicos de magnitud alta e incluso moderada desencadenan inestabilidad en los taludes o laderas, generando una probabilidad de daño asociado a la infraestructura y a la población expuesta. Tal como plantean Harp y Jibson (1996), una situación de este tipo es consecuencia de la simultaneidad en el tiempo de múltiples inestabilidades.

Según Rodríguez *et al.* (2008), los terremotos son uno de los principales factores desencadenantes de inestabilidades de ladera, las cuales son a menudo una de las causas principales de pérdidas humanas y materiales.

Según los mismos autores, las inestabilidades inducidas por terremotos no están bien comprendidas debido a la complejidad del tema, puesto que intervienen tanto factores relacionados con la liberación de energía del terremoto y su propagación, como parámetros propios de resistencia de la ladera, condiciones de estabilidad, tipo de rotura así como el comportamiento ante deformación de los materiales durante la vibración sísmica.

Delgado *et al.* (2006) afirma que debido a los largos periodos de recurrencia, incluso para terremotos moderados, hacen que se pierda la conciencia del problema que este fenómeno representa, y que por ende, aún son pocos los estudios dedicados a este problema, lo cual es cierto en áreas con una actividad sísmica moderada, como sucede en Colombia.

En Figueras *et al.* (2005), se tratan los resultados del estudio de Keefer (1984), en torno a los deslizamientos de ladera asociados a eventos sísmicos, las cuales se resumen a continuación:

- ✓ El número de deslizamientos causados por sismos generalmente se incrementa con el incremento de la magnitud, aunque las condiciones geológicas locales y otros parámetros sísmicos como la aceleración pico del suelo y la dirección de la máxima aceleración también han determinado el número de deslizamientos activados.
- ✓ Las reactivaciones son más probables durante movimientos sísmicos que son más fuertes que los que causaron los deslizamientos pre-existentes o durante un terremoto que ocurrió donde pre-existían debido a otras causas y que son marginalmente estables.
- ✓ Los deslizamientos más abundantes activados por sismos han sido la caída, vuelco y deslizamiento de bloques de roca y deslizamiento de tierra. Las avalanchas y flujos rápidos de tierra son las dos principales causantes de muertes. Las áreas afectadas por los deslizamientos presentan una fuerte correlación con la magnitud del terremoto.

Algunos eventos sísmicos a nivel mundial que causaron grandes deslizamientos de tierra y rocas, se resumen en la Tabla 5, que a pesar de no haber ocurrido en el país de estudio, sirven para contextualizar y dimensionar la magnitud de los desastres que pueden ocurrir al darse conjuntamente ambos eventos catastróficos, uno como detonante del otro.

<b>Año</b>	<b>Sismo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Característica</b>
1906	San Francisco	7.7	32000 Km <sup>2</sup> en deslizamientos, docenas de muertos
1933	Long Beach	6.2	Daños en terraplenes, caída de rocas
1952	Kern County	7.5	7000 Km <sup>2</sup> de deslizamientos
1971	San Francisco	6.6	3000 Km <sup>2</sup> de deslizamientos
1978	Santa Bárbara	5.6	200 Km <sup>2</sup> de deslizamientos, caída de grandes rocas
1994	Northdrige	6.7	10000 Km <sup>2</sup> de deslizamientos

**Tabla 5. Grandes deslizamientos activados por sismo.**

Fuente: Figueras *et al.* (2005)

Para el desarrollo de este trabajo se consideraron deslizamientos de tipo traslacionales debido al evento sísmico, ya que corresponden a parte del 90% de casos más frecuentes de deslizamientos, como se mencionó anteriormente. Así mismo cabe resaltar que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos profundos de un bloque deslizante no queda descartada pero no es del alcance de este trabajo, y requiere de un mayor nivel de análisis geotécnico e ingenieril.

## CAPITULO CUATRO

### 4. Conceptos sobre sismología

Durante la segunda mitad del siglo XX, se desarrollaron diversas metodologías para la estimación de la intensidad máxima que un movimiento sísmico puede llegar a registrar en una región, en un periodo de tiempo dado, las cuales se han refinado en los últimos años debido al impacto generado por diversos desastres que han aquejado a la sociedad.

Cardona (2001) plantea que con base en análisis estadísticos de terremotos en el pasado y su aceleración estimada para diferentes sitios, se puede obtener la probabilidad de ocurrencia de ciertas aceleraciones en el futuro. La aceleración del suelo causada por los sismos puede entenderse como un proceso discreto estocástico, y por lo tanto se puede concluir que es posible aplicar un análisis estadístico, en el que es necesario contar con un catalogo de registros históricos que permita definir la distribución de las aceleraciones, pero usualmente no se cuenta con dicho catalogo y es necesario desarrollar modelos que permitan determinar el valor de la aceleración probable en cada sitio de interés.

La amenaza sísmica se define como la probabilidad de que un parámetro como la aceleración, la velocidad o el desplazamiento del terreno producido por un sismo, supere o iguale un valor umbral de referencia.

En general la amenaza sísmica se podría expresar en términos de aceleración pico del suelo, la velocidad pico, el espectro de respuesta, la duración de la excitación, el contenido frecuencia y todos aquellos parámetros que puedan afectar las estructuras después de cierto umbral.

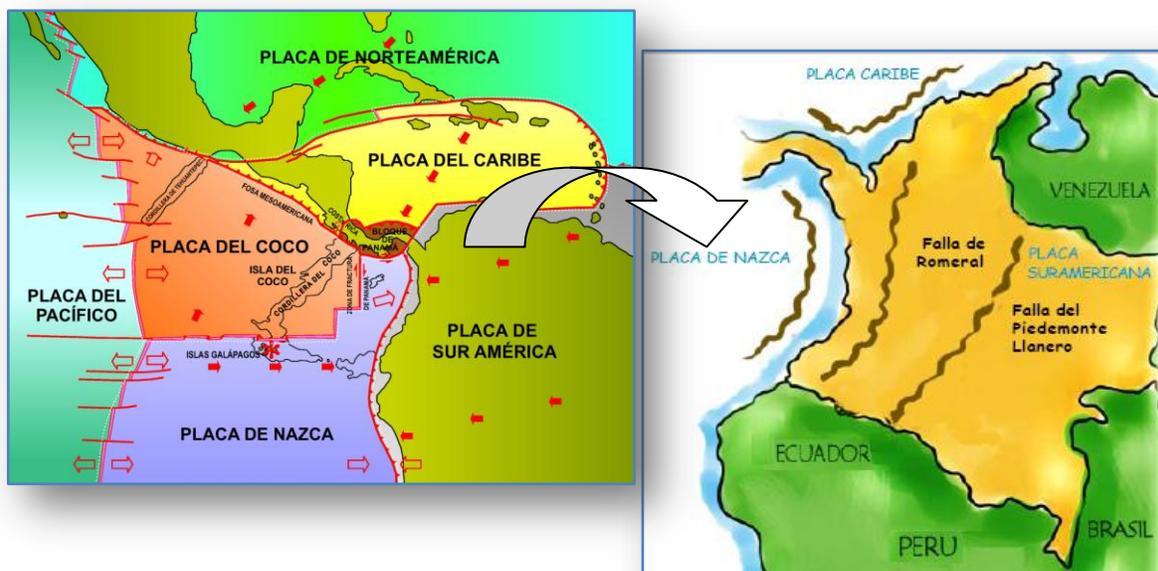
Los métodos utilizados más frecuentemente permiten tener las relaciones entre el parámetro representativo del movimiento del suelo y su periodo de retorno promedio para el sitio, considerando relaciones geográficas arbitrarias entre el sitio de análisis y la fuente potencial del movimiento.

La instrumentación y el desarrollo de técnicas de modelación del comportamiento dinámico del suelo, permitirán un mejor conocimiento de los efectos de amplificación sísmica, debido a las propiedades geotécnicas del suelo en cada sitio y las formas topográficas características. Es importante enfatizar que en la medida en que la amenaza sísmica sea evaluada de una forma más confiable, igualmente confiable será la evaluación del riesgo, el cual está relacionado directamente con los parámetros descriptivos de la amenaza.

#### 4.1. Amenaza Sísmica en el ámbito Nacional y Local

Colombia presenta una actividad sísmica importante debido a su localización geográfica, generada por un marco geodinámico de convergencia de las placas de Nazca, Caribe y Sur América, al igual que las dos microplacas de Panamá y el bloque Andino, lo cual se ilustra en la Figura 8. Toda la costa occidental de Sur América se ve afectada por la presión que ejercen tales placas tectónicas sobre el continente, lo cual da pie al conocido Cinturón de Fuego del Pacífico.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, en Colombia se presenta una serie de fallas geológicas en su corteza terrestre que generan zonas con diferente vulnerabilidad sísmica, es decir, zonas en las cuales la reacción de la corteza terrestre ante la acción de un sismo se presenta con mayor o menor intensidad. Estas zonas son denominadas zonas de amenaza sísmica, y están clasificadas como alta, intermedia y baja.



**Figura 8. Marco geodinámico de convergencia de placas tectónicas en Colombia**

Fuente: Adaptada de Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS 2011)

De acuerdo a Lantada (2007), la aceleración sísmica pico (*PGA*, *Peak Ground Acceleration*), que también suele conocerse como aceleración efectiva o aceleración básica, es empleada en estudios modernos de ingeniería sísmica, y se define por la máxima aceleración horizontal registrada en un acelerograma. En zonas de sismicidad baja o moderada se recurre a relaciones empíricas entre la intensidad y la aceleración, debido a la escasez o ausencia de datos de aceleración.

La aceleración pico efectiva ( $A_a$  o  $PGA$ ) es contemplada en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente -*NSR 10-* (AIS 2010), como un porcentaje de la aceleración de la gravedad terrestre. Por ejemplo para la ciudad de Medellín se estableció un  $A_a = 0.2g$  ( $g = 980 \text{ cm/s}^2$ ).

Estas aceleraciones tienen una probabilidad de ser excedidas del 10% en un lapso de 50 años, correspondiente a la vida útil de una edificación. El valor del parámetro  $PGA$  se utiliza para definir las cargas sísmicas de diseño que exige la Norma de Construcciones Sismo Resistentes.

En Colombia, en las cabeceras municipales aproximadamente el 35% de la población, se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta; el 51% de la población, en zonas de amenaza sísmica intermedia; y el 14% de la población, en zonas de amenaza sísmica baja. Para un adecuada zonificación del territorio nacional en lo que respecta a la amenaza sísmica, la NSR-10 considera tres categorías, como se puede apreciar en la Figura 9, la Figura 10 y la Figura 11. En el recuadro de la Figura 11, se hace énfasis en la ubicación de la ciudad de Medellín.

- ✓ Zona de Amenaza Sísmica Baja: Definida para aquellas regiones cuyo sismo de diseño no excede una aceleración pico efectiva (PGA) de 0.10g. Aproximadamente el 55% del territorio Colombiano se encuentra incluido en esta zona de amenaza.
- ✓ Zona de Amenaza Sísmica Intermedia: Definida para regiones donde existe la probabilidad de alcanzar valores de aceleración pico efectiva mayores de 0.10g y menores o iguales de 0.20g. Alrededor del 22% del territorio se encuentra incluido en esta zona.
- ✓ Zona de Amenaza Sísmica Alta: Definida para aquellas regiones donde se esperan temblores muy fuertes con valores de aceleración pico efectiva mayores de 0.20g. Aproximadamente el 23% del territorio Colombiano queda incluido en la zona de amenaza sísmica alta.

En el marco tectónico descrito anteriormente se sitúa el Valle de Aburrá y en especial el Municipio de Medellín, localizado sobre la microplaca del bloque Andino en el extremo del norte de la cordillera Central. (AMVA 2007)

El Valle de Aburrá y específicamente el Municipio de Medellín, está clasificado como un área de amenaza sísmica intermedia, afectado durante su historia por sismos de intensidad baja o media, provenientes fundamentalmente de las sismofuentes de Murindó, el Viejo Caldas, el Nido de Bucaramanga y el sistema de fallas de Romeral, el cual cruza el suroccidente del valle.

En Medellín y sus alrededores no hay registros históricos de gran intensidad y magnitudes superiores a Ms 5. De acuerdo al Ingeominas, solo pueden ser generados por fallas cercanas como la falla de Romeral, cuyos ramales orientales se encuentran a menos de 15 km de Medellín.

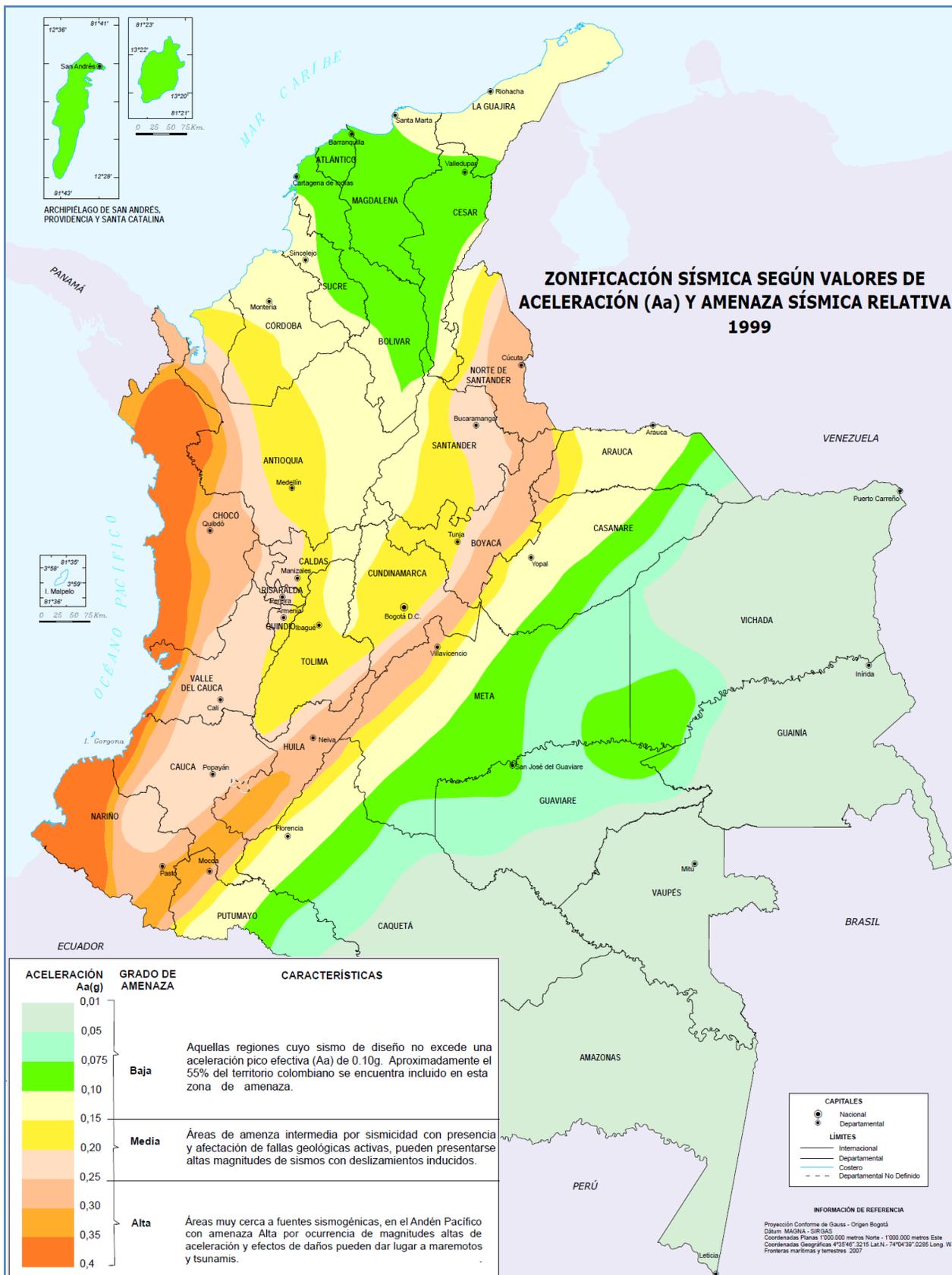
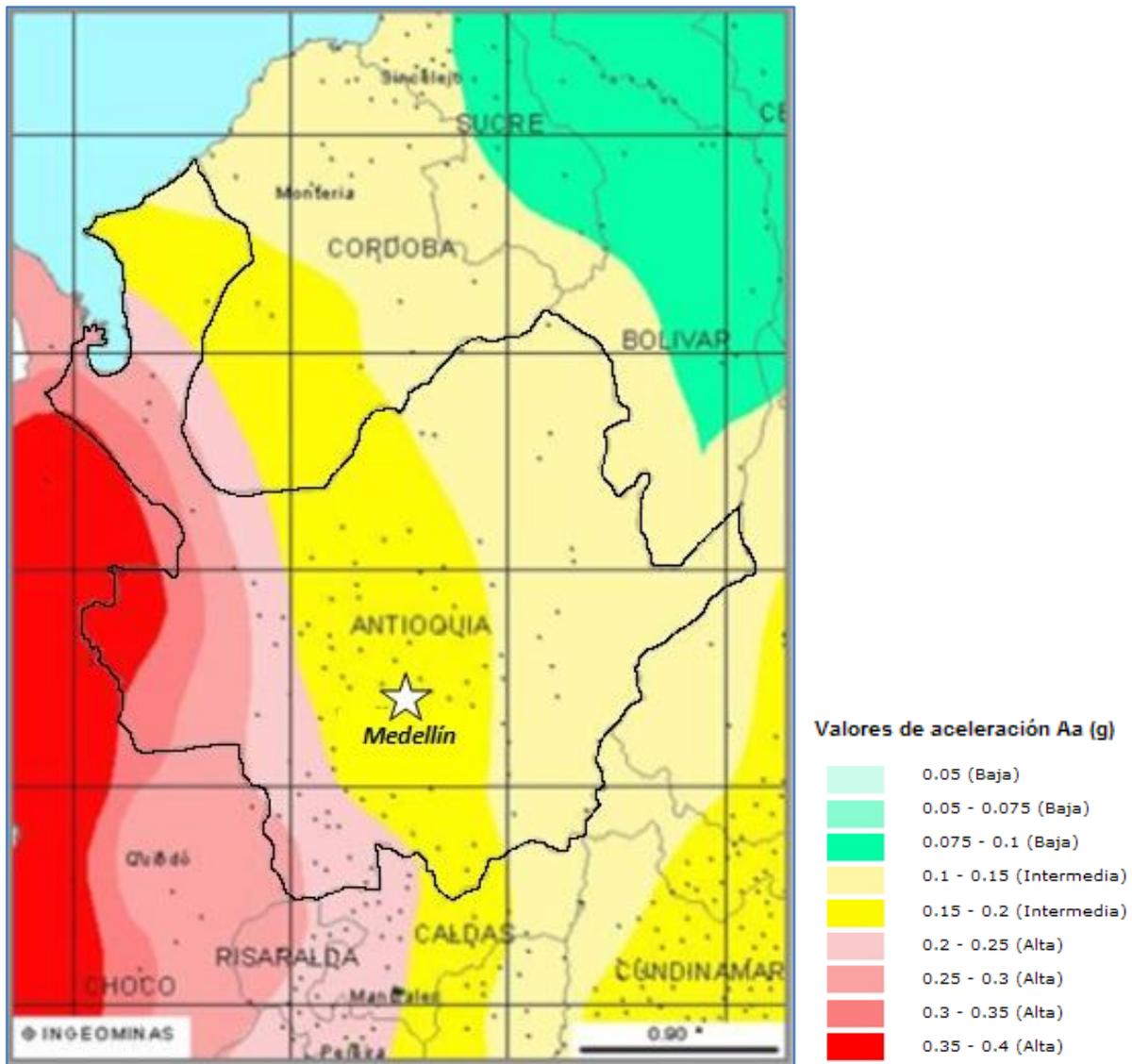


Figura 9 . Mapa de zonificación sísmica a nivel nacional

Fuente: Adaptada de SIGOT (2012)



**Figura 10 . Mapa de zonificación sísmica departamento de Antioquia**

Fuente: Adaptada de Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS 2012)

De acuerdo a la NSR-10 de validez y cumplimiento Nacional, la ciudad de Medellín se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia, en la cual se le asigna un valor de aceleración pico efectivas entre 0,15g y 0,2g para efectos de diseño de estructuras. Sin embargo, a nivel Local se cuenta con un estudio de Microzonificación Sísmica que establece valores continuos de aceleración pico efectiva, representados para un periodo de retorno de 9,3 años (período de retorno del sismo de control de daños, según AMVA 2007) y de 475 años (período de retorno del sismo de diseño, según la NSR-10), donde es posible apreciar la variabilidad de la PGA dentro de la zona de amenaza sísmica intermedia definida por la norma y corroborada por el Ingeominas, donde incluso se alcanzan valores que superan los 0,2g dentro de la zona urbana de la ciudad, tal y como se indica en la Figura 12 y la Figura 13.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

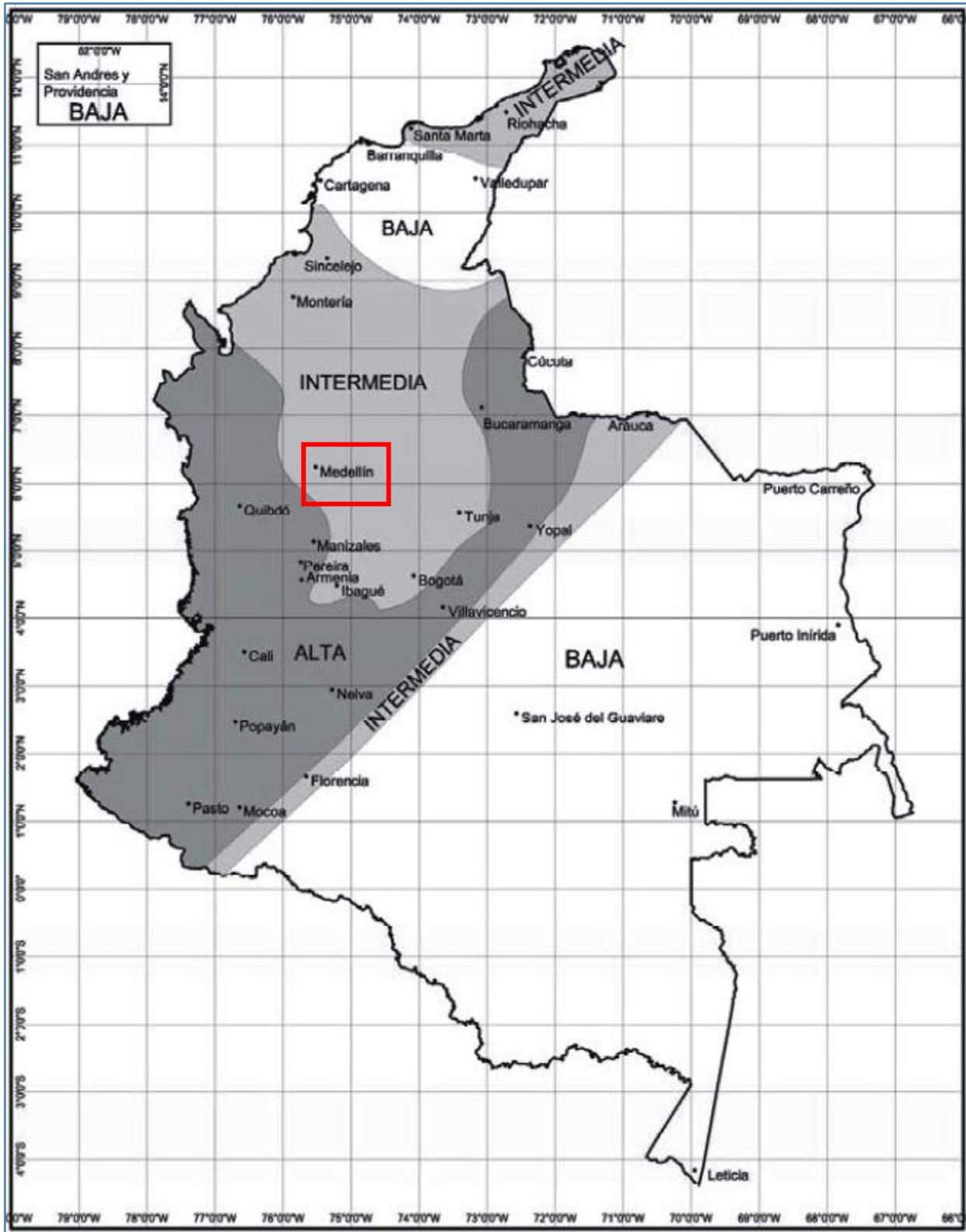


Figura 11 . Mapa de zonificación sísmica a nivel nacional (NSR - 10)

Fuente: Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente 2010 (AIS 2010)

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

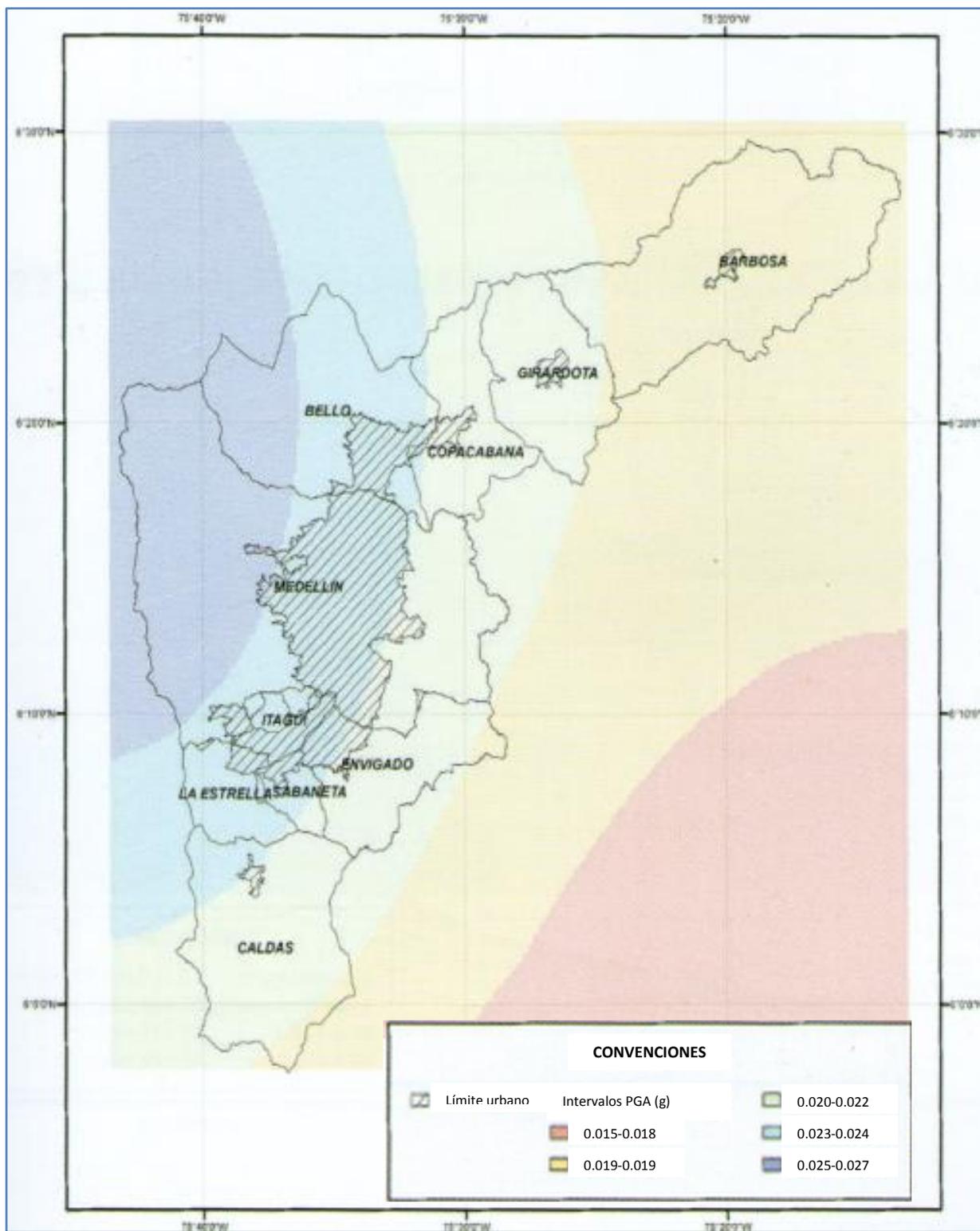
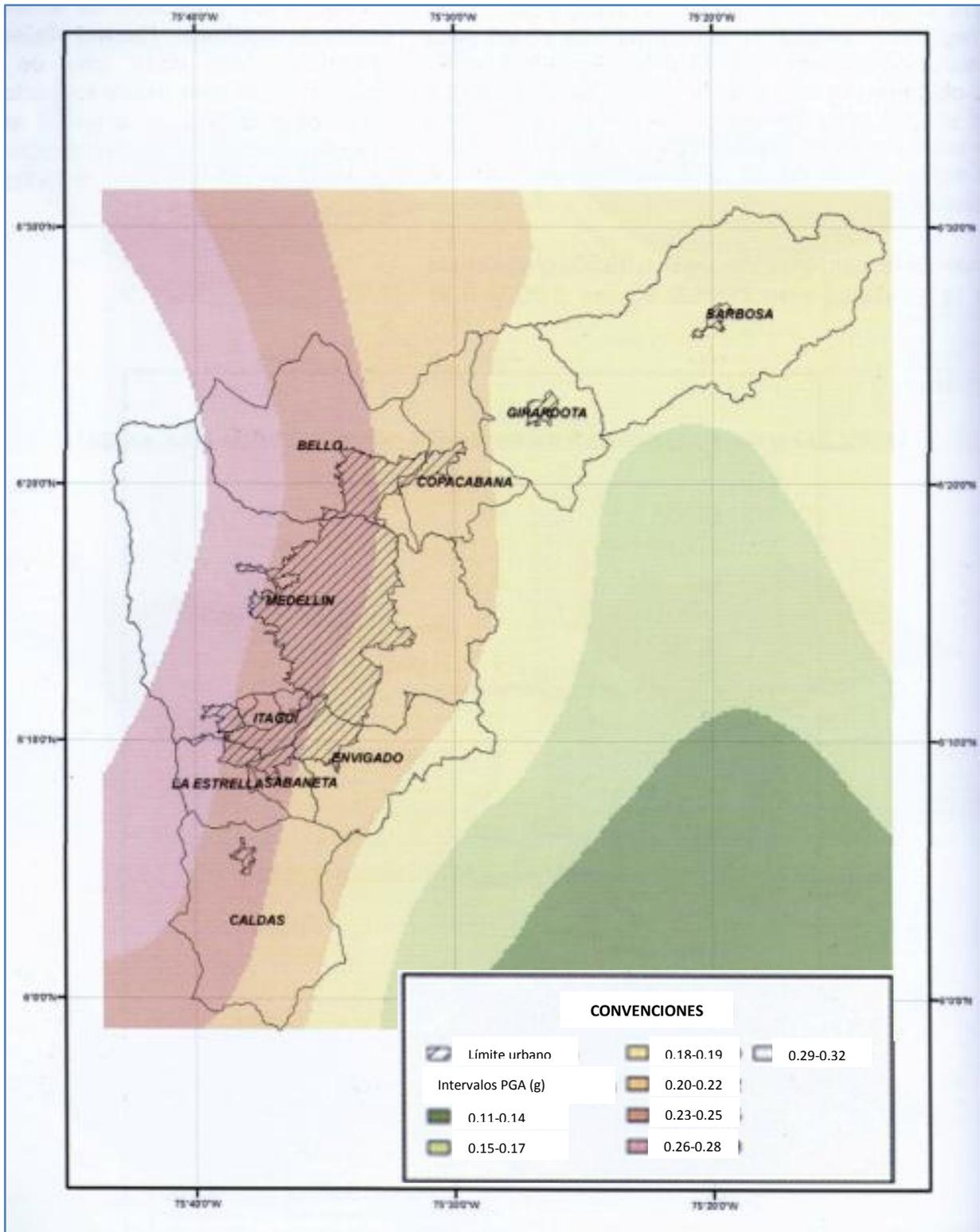


Figura 12. Amenaza Sísmica en el Valle de Aburrá. Valores de PGA con un periodo de retorno de 9,3 años. Fuente: Adaptada de Estudio de Microzonificación y Evaluación de Riesgo Sísmico en el Valle de Aburrá. (AMVA 2007)

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]



**Figura 13. Amenaza Sísmica en el Valle de Aburrá. Valores de PGA con un periodo de retorno de 475 años.**  
Fuente: Adaptada de Estudio de Microzonificación y Evaluación de Riesgo Sísmico en el Valle de Aburrá. (AMVA 2007)

## CAPITULO CINCO

### 5. Análisis y gestión del riesgo

El concepto de riesgo consiste en las posibilidades de ocurrencia de daños y pérdidas tanto humanas como materiales en situaciones concretas de concurrencia de características del territorio junto a su forma de ocupación o transformación y construcción. Partiendo de esta concepción, el proceso de generación de riesgo está inmerso en todas las formas de actividad humana en diversos grados, pero en particular en el diseño y construcción de su hábitat. Así, el conocimiento y reducción hasta límites aceptables del riesgo es lo que se considera una gestión apropiada. Ello implica una rectificación de las prácticas destructivas, del diseño que lo evade sin resolverlo y de la normativa que permita una determinación del impacto ambiental (y su control) de la actividad humana, ya sea esta la construcción de estructuras o ciudades, el desarrollo regional y lo productivo en general. (Argüello 2004)

La UNDRRO, al igual que la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), promovieron un consenso de expertos cuyo objetivo fue el de proponer la unificación de las definiciones en torno al tema de desastres, con lo cual se generó el reporte “Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad”.

De acuerdo al Taller regional de capacitación para desastres de la UNDRRO, se definen los siguientes términos relativos al análisis y estimación de riesgos:

- ✓ La Amenaza (A), corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.
- ✓ La Vulnerabilidad (V), está definida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresado en una escala desde cero (sin daño) hasta uno (pérdida total)
- ✓ El Riesgo Específico (Rs), está definido como grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la Amenaza (A) y la Vulnerabilidad (V).
- ✓ Los Elementos Bajo Riesgo (E), corresponden a la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
- ✓ El Riesgo Total (Rt), corresponde al número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir, el producto del Riesgo Específico (Rs) y los Elementos Bajo Riesgo (E).

De esta manera la evaluación del Riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación:

$$Rt = \Sigma(E \times Rs) = \Sigma(E \times (A \times V)) = \Sigma(A \times \Sigma(V \times E)) \quad \text{Ec. 1} \quad (\text{Cardona 2001})$$

Es usual encontrar en la literatura referente al tema, que se omita el término correspondiente a los Elementos Bajo Riesgo (E), por considerarlo implícito dentro de la variable Vulnerabilidad, sin modificar la concepción original del concepto.

De esta manera, una vez conocida la amenaza “*A<sub>i</sub>*”, la cual se definió como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso con una intensidad mayor o igual a “*i*” durante un periodo de exposición “*t*”, y conocida la Vulnerabilidad “*Ve*”, definida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto “*e*” a ser afectado, o ser susceptible de sufrir algún daño ante la ocurrencia de un evento con una intensidad “*i*”, es posible entender el riesgo “*Rie*”, como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento “*e*”, como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a “*i*”, es decir, la probabilidad de exceder unas consecuencias sociales y económicas durante un periodo de tiempo dado “*t*”.

$$Rie = f(A_i, Ve) \quad \text{Ec. 2} \quad (\text{Cardona 2001})$$

### 5.1. Características y efectos de los desastres

La evaluación del riesgo entraña disponer de un conocimiento detallado de las características cuantitativas y cualitativas del riesgo, como también de los factores que lo determinan y de sus consecuencias físicas, sociales, económicas y ambientales. Esto es un primer paso necesario para cualquier estudio serio de las estrategias de reducción de desastres. (EIRD/ONU 2004)

El término desastre suele referirse a un evento o suceso que ocurre generalmente en forma repentina causando alteraciones y todo tipo de pérdidas y daños sobre la población y el medio ambiente. Pueden ser ocasionados por la manifestación de un fenómeno natural o por acción antrópica, es decir, generada por el accionar del hombre.

Según su origen, los fenómenos naturales pueden ser clasificados en: atmosféricos, geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos), hidrológicos, hidrogeológicos y biológicos. Los sucesos peligrosos pueden variar en magnitud o intensidad, frecuencia, duración, extensión, velocidad de aparición, dispersión espacial y espacio-temporal. (Lantada 2007)

En el texto de Moreno y Múnera (2000), se define desastre como un evento identificable en el tiempo y el espacio, en el cual una comunidad ve afectado su funcionamiento normal, con pérdida de vidas y daños considerables en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales de la sociedad. Y expresa que un desastre sólo ocurre cuando la comunidad afectada es incapaz de transformar sus propias estructuras, adecuar sus ritmos y redefinir la dirección de sus procesos como una respuesta ágil, flexible y oportuna a los cambios del medio ambiente.

Generalmente los desastres originados por fenómenos naturales no pueden ser neutralizados debido a su origen, pero si pueden ser controlados parcialmente, para atenuar su impacto.

Algunos fenómenos naturales que causan desastres son: Terremotos, Inundaciones, Deslizamientos de tierra, Volcanes, Huracanes, Sequía, entre otros.

Algunas acciones antrópicas que causan desastres son: Explosiones, Incendios, Colapsos, Choques, Terrorismo, entre otros.

La magnitud del impacto que un desastre puede ocasionar depende de las características de la población expuesta y de la naturaleza del evento mismo, ya que puede ocasionar diferentes alteraciones.

Según el Taller regional de capacitación para desastres de la UNDRR, los efectos pueden clasificarse en pérdidas directas e indirectas. Las pérdidas directas están relacionadas con el daño físico, expresado en víctimas, en daños en la infraestructura de servicios públicos, daños en las edificaciones, el espacio urbano, la industria, el comercio y el deterioro del medio ambiente, es decir, la alteración física del hábitat.

Las pérdidas indirectas generalmente pueden subdividirse en efectos sociales tales como la interrupción del transporte, de los servicios públicos, de los medios de información y la desfavorable imagen que puede tomar una región respecto a otras; y en efectos económicos que representan la alteración del comercio y la industria como consecuencia de la baja en la producción, la desmotivación de la inversión y la generación de gastos de rehabilitación y reconstrucción.

De acuerdo a Villalón (2003), para determinar el costo de los elementos en riesgo, se realiza una diferenciación entre los costos de las construcciones y los costos del contenido de las edificaciones. Los costos de las edificaciones son determinados usando información de agencias de bienes raíces y especialistas en el área. El costo por metro cuadrado puede ser ingresado en una tabla de atributos vinculada al mapa de catastro, y el costo por parcela puede ser obtenido multiplicando el área por el número de pisos. Una estimación del costo del contenido de las edificaciones es hecha sobre la base de muestreos para diferentes tipos de edificaciones y clases socioeconómicas en la ciudad.

## 5.2. Evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo

De acuerdo al informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres (EIRD/ONU 2004), la evaluación del riesgo es una metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de amenazas potenciales y evaluación de condiciones existentes de vulnerabilidad que pudieran representar una amenaza potencial o daño a la población, propiedades, medios de subsistencia y al ambiente del cual dependen.

La evaluación del riesgo según el informe mundial, implica utilizar en forma sistemática la información disponible para determinar la posibilidad de que ocurran determinados sucesos así como la magnitud de sus posibles consecuencias. En general, se dice que este proceso abarca lo siguiente:

- Identificar la naturaleza, ubicación, intensidad y probabilidad de una amenaza
- Determinar la existencia y el grado de vulnerabilidad y exposición a esas amenazas
- Definir las capacidades y los recursos de que se dispone para enfrentar o manejar las amenazas
- Determinar el grado de riesgo aceptable
- Estimar las pérdidas asociadas a la ocurrencia de un evento catastrófico

Una evaluación de amenazas y vulnerabilidad conlleva un conjunto de procedimientos que por lo general están implícitos en el concepto de análisis del riesgo, el cual es el aspecto central del proceso de evaluación del riesgo, y que consiste en proporcionar información relativamente objetiva y técnica, a partir de la cual puedan proyectarse los niveles de riesgo.

El objetivo en la evaluación de las amenazas radica en establecer la probabilidad de que ocurra una amenaza específica en un período de tiempo determinado, así como su intensidad y área de impacto, lo cual muchas veces requiere de hardware y software para dicha evaluación.

La evaluación de la vulnerabilidad, es el complemento indispensable de la evaluación de las amenazas, y generalmente se han centrado en la evaluación de los aspectos físicos de la vulnerabilidad, principalmente en relación con las amenazas más convencionales tales como las tormentas, terremotos e inundaciones. Para analizarlos habitualmente se utiliza la superposición de las zonas de amenaza con la ubicación de elementos de infraestructura urbana.

## CAPITULO SEIS

### 6. Conceptos sobre Geomática

Se puede definir la Geomática como la ciencia que se ocupa de la automatización para la representación de la información georreferenciada incluyendo su utilización.

La Geomática definida como el conjunto de ciencias y técnicas para la adquisición, procesamiento, análisis y gestión de información georreferenciada es hoy en día una de las áreas del conocimiento de mayor crecimiento mundial.

Puede decirse que el vocablo Geomática utilizado fundamentalmente en Canadá, es una ampliación del que corresponde a la cartografía, la diferencia estriba fundamentalmente en que a la comunicación gráfica estática se le pueden agregar ampliaciones de escala que, además del aumento de tamaño de los sectores representados, queden susceptibles de estar respaldados por mayor detalle y densidad de información, siempre y cuando el almacenamiento de las bases de datos así lo permitan.

Los sensores remotos, los sistemas de posicionamiento satelital, la cartografía, la geoestadística y la geodesia, son algunas de las disciplinas que integran la Geomática, y que al igual que los sistemas de información geográfica están en continuo desarrollo, y el avance tecnológico obliga a los especialistas a esfuerzos cada vez más grandes para mantenerse actualizados tanto en cuanto a los fundamentos matemáticos y físicos subyacentes, como a las posibilidades de los programas informáticos que se usan para manejarlos.

#### 6.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG es una base de datos constituida por un conjunto de variables con referencia espacial, las cuales se relacionan entre sí para explicar una situación en particular, que surgieron como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y responder a preguntas de modo inmediato. Se emplean de acuerdo a fines particulares del proceso de investigación en este caso, para la estimación del riesgo por deslizamientos de masas de tierra generados por eventos sísmicos.

Salgado (2005), define un SIG como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

El Centro Nacional para el Análisis de Información Geográfica (NCGIA) define los SIG como "un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión".

La Asociación para la Información Geográfica (AGI) y el Departamento de Geografía de la Universidad de Edimburgo lo definen como: "un sistema de cómputo para obtener, almacenar, integrar, manipular, analizar y representar datos relativos a la superficie terrestre".

Diversas definiciones coinciden al referirse a un Sistema de Información Geográfica como un sistema integrado que permite trabajar con información espacial y georreferenciada, herramienta esencial para

el análisis y toma de decisiones en diversas áreas para el desarrollo, entre ellas el análisis de riesgo por desastres naturales.

Los SIG permiten centralizar e integrar información normalmente dispersa en diferentes formatos, al igual que ofrecen sistemas dinámicos de información, puesto que los datos pueden ser actualizados periódicamente para producir nueva información de acuerdo a las necesidades de diferentes aplicaciones y usuarios.

De acuerdo a Moreno y Múnera (2000), un Sistema de Información Geográfica, es un instrumento que apoya la toma de decisiones en las entidades, organizaciones y gobiernos locales, regionales y nacionales; permite gran rapidez en la formulación de políticas y en la evaluación de los posibles resultados de las acciones. Además, es el instrumento necesario para la intervención urbana desde la perspectiva de los riesgos y la vulnerabilidad en nuestras ciudades.

La representación de los elementos que componen la realidad a través de un SIG, se realiza habitualmente a partir de dos formatos de representación conocidos como formato vectorial y formato Raster, cada uno empleado independientemente o en conjunto para dar solución a complejos problemas espaciales como los que trata la presente investigación. En la Figura 14, se aprecian ambos tipos de formatos de representación.

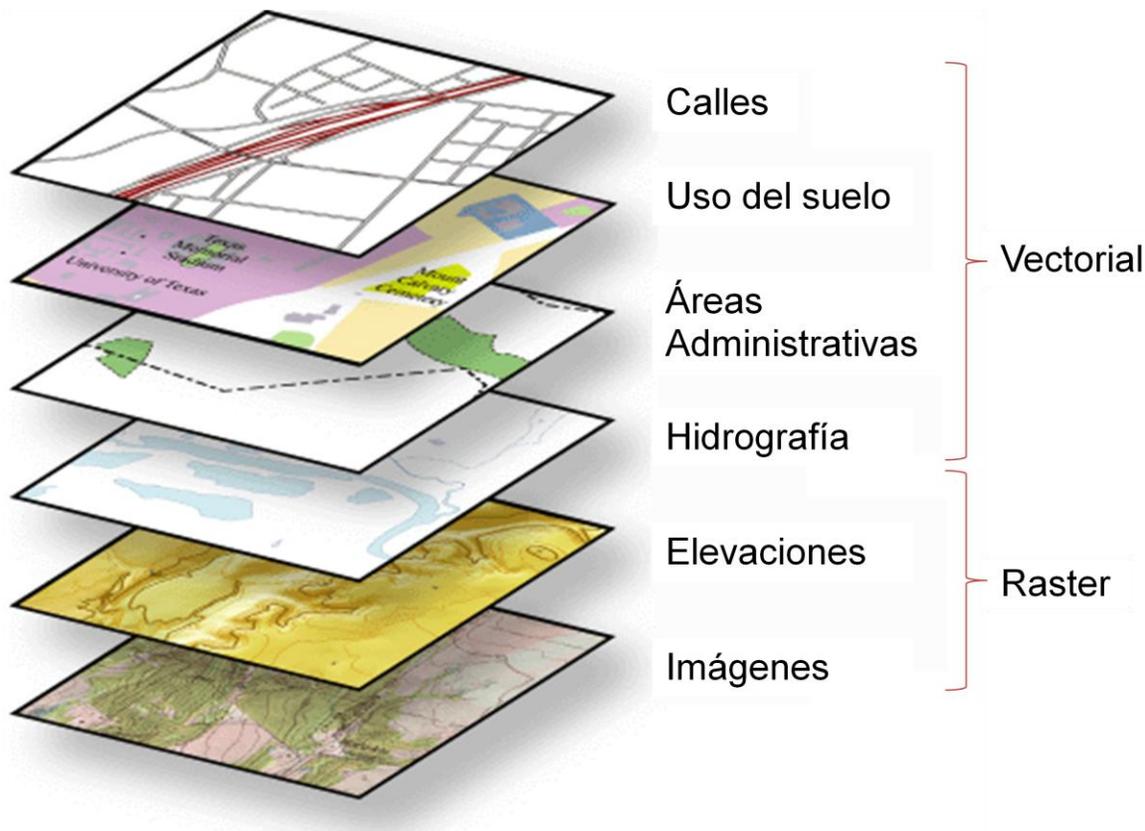
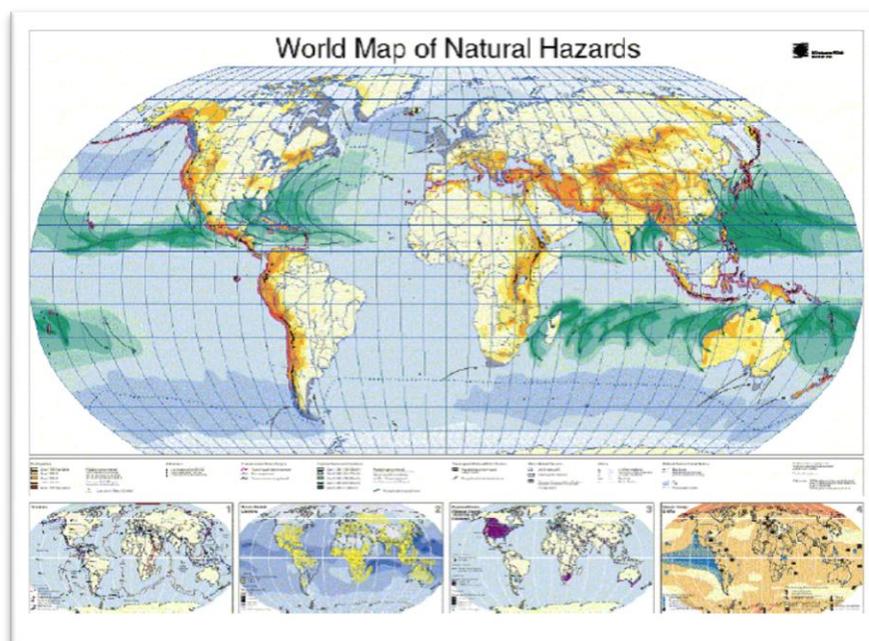


Figura 14. Formatos de representación en un SIG  
Fuente: Adaptada de ESRI, 2012.

## 6.2. Aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) en la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo.

En el año de 1998, fue publicado en Alemania, específicamente en Munich, la tercera edición del mapa mundial de riesgos naturales, el cual se ilustra en la Figura 15, y muestra la distribución geográfica y la magnitud de los riesgos naturales a nivel mundial. Dicha publicación incluye un catálogo histórico de los eventos con sus respectivas dimensiones, al igual que una lista de pérdidas humanas y económicas, producidas por cada uno de ellos, generado todo ello con ayuda de una herramienta SIG.



**Figura 15 . Mapa mundial de riesgos naturales**

Fuente: Prevention (2012)

Cualquier estudio de riesgos naturales requiere de la información espacial de la superficie de la zona de estudio, sus características topográficas, la geología, la hidrología y los usos del suelo, entre otros. Para gestionar todo este volumen de información, se requiere disponer de Sistemas de Información Geográfica, ya que estas herramientas permiten administrar tal volumen de datos, de manera rápida y detallada, y permiten además la presentación gráfica de resultados. En la actualidad, la integración en un SIG con modelos matemáticos facilita procesos de simulación, y acelera el análisis espacial de las variables y de los parámetros requeridos.

La utilización de imágenes multiespectrales de alta resolución, tales como la del satélite Ikonos o QuickBird, ha permitido efectuar estudios detallados del efecto de los riesgos atmosféricos en grandes extensiones. La combinación de técnicas SIG e imágenes multiespectrales de percepción remota, permiten detectar el cambio de la vegetación antes y después del paso de un tornado por ejemplo.

La capacidad de los SIG para trabajar con datos en 3D, permite generar Modelos Digitales de Elevaciones (DEM) y obtener mapas derivados de estos, tales como mapas de pendientes y mapas de orientaciones.

Las herramientas SIG facilitan la obtención de los parámetros morfométricos necesarios para realizar estudios de deslizamientos superficiales mediante técnicas multivariantes, así como la evaluación de las

condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, y las condiciones de movilidad del desplazamiento. (Lantada 2007)

Así pues, es claro que tanto los sistemas de información geográfica como las demás ramas que competen a la Geomática se han constituido como una herramienta imprescindible para la cartografía y la gestión de riesgos naturales y la manera en que éstos inciden en nuestra sociedad.

Villalón (2003) afirma que los SIG han emergido como una efectiva herramienta de trabajo, especialmente en procesos de evaluación de vulnerabilidad y riesgo ante sismos, inundaciones, deslizamientos, huracanes y otras amenazas naturales, pues precisamente los elementos en riesgo, como población, propiedades, infraestructura y las propias amenazas tienen asociado una localización espacial que es almacenada conjuntamente con sus características más relevantes, aspectos físico-estructurales y socioeconómicos e información sobre las amenazas, como magnitud, frecuencia, periodo de recurrencia, entre otras. Así, su interrelación espacial puede ser analizada y representada por medio del SIG a través de modelos computarizados.

La Organización de los Estados Americanos (OEA) fue una de las instituciones pioneras en utilizar técnicas mediante los sistemas de información geográfica para evaluar aspectos físicos de la vulnerabilidad en América Latina y el Caribe, centrándose en la infraestructura urbana y en los servicios fundamentales.

La evaluación del riesgo mediante los SIG permite contar con una visión de conjunto y multivariedad del riesgo, establecer relaciones espaciales y vincular distintos tipos de información, contar con información digital de consulta directa, y realizar actualizaciones que respondan al dinamismo del problema. (Salgado 2005).

El análisis de riesgos en un ambiente SIG, involucra el uso de varias técnicas. En primera instancia se considera la construcción de índices probabilísticos de riesgo, mediante una combinatoria de diferentes capas temáticas las cuales representan diferentes variables a las cuales se les asigna un peso. De esta manera, cada capa describe las características espaciales, temporales, atributos y topología de una variable asociada con el riesgo.

Esta técnica es empleada principalmente para determinar áreas con niveles relativos de riesgo, sobre todo a una baja resolución, y a medida que se requiera un mayor nivel de detalle, se deben incorporar más capas, lo que implica mayor complejidad en su combinación. La limitante es que esta técnica permite indicar los niveles probables de riesgo en determinadas zonas en forma relativa, pero no permite estimar posibles pérdidas, a no ser que el análisis se realice a una resolución más alta y se combine con datos específicos sobre los elementos en riesgo, y es precisamente en el campo que se desea incursionar en el desarrollo de este proyecto.

Otra técnica considera la combinatoria de capas temáticas sobre los elementos en riesgo con otras capas sobre las amenazas, de manera que permitan estimar las pérdidas que podrían ocasionarse en caso de presentarse una amenaza de una magnitud determinada. Se utiliza frecuentemente en aplicaciones a nivel local o urbano, y para estudiar la factibilidad y la relación costo - beneficio antes de la construcción de proyectos de infraestructura.

La mejor manera de permitir una reducción de desastres, es por medio de su prevención. Los Sistemas de Información Geográfica son una de las herramientas más usadas para el análisis y evaluación de los fenómenos que generan riesgo, ya que permiten un modelado de la susceptibilidad del área, y la

elaboración de mapas de susceptibilidad y amenaza, de una manera sistemática, rápida y eficiente. (Coronado 2006)

Para el caso de la evaluación de las amenazas, a menudo se utilizan medios tecnológicos para monitorear y almacenar información acerca de condiciones por ejemplo como geológicas y atmosféricas. En cambio, para evaluar la vulnerabilidad se aplican métodos más tradicionales, tales como técnicas cartográficas de carácter local.

Datos obtenidos mediante la utilización de sensores remotos, imágenes de satélites y fotografías aéreas, conjuntamente con información de trabajos de campo son introducidos y analizados en SIG para la identificación de amenazas naturales como fallas tectónicas, deslizamientos, zonas propensas a sufrir inundación, etcétera. Para el caso de sismos, datos como localización de fallas activas, valores de aceleración máxima del suelo, distribución de epicentros, valores de magnitud e intensidad, perfil geológico, entre otros, pasan a formar parte de bases de datos almacenadas en SIG. Para caso de inundaciones se requiere datos sobre redes de drenajes, uso de suelo, modelos de elevación digital, capa de cubierta vegetal, geomorfología, topografía, etcétera. Luego estos datos son combinados dentro del SIG en forma de capas de datos para generar mapas de amenazas. (Villalón 2003)

El uso de las técnicas de los SIG ha aumentado las posibilidades de efectuar evaluaciones multi amenazas y permiten combinar eficientemente varios conjuntos de datos espaciales en modelos y escenarios para diferentes grados de amenazas.

Los mapas de amenazas o peligros combinados son un instrumento importante cuando se trata de evaluar un conjunto de amenazas. Estas evaluaciones deben presentarse utilizando clasificaciones sencillas, como por ejemplo, indicando si el peligro es alto, mediano o bajo, o existe ausencia de peligro.

El uso de técnicas SIG han mejorado la cartografía relativa a las amenazas y a las variables ambientales, pero las variables sociales y económicas aún se deben seguir desarrollando debido a su subjetividad en algunos casos.

El informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres (EIRD/ONU 2004), definió que en el caso de los aspectos sociales y económicos de la vulnerabilidad, no siempre es posible cuantificar algunas de las variables que se analizan en los modelos espaciales de SIG. Además, la diversidad de escalas en que operan los distintos aspectos de vulnerabilidad socioeconómica dificulta mucho su representación espacial mediante estas técnicas. Así mismo, en muchos casos, y particularmente en los países menos desarrollados, no se dispone de información de calidad y detalle requeridos por los SIG.

Uno de los aspectos fundamentales de la evaluación de peligros o amenazas corresponde a la presentación de resultados en forma de mapas. Dichos mapas se pueden elaborar en forma manual utilizando técnicas cartográficas estándar o digitalmente mediante un SIG. Para cada tipo de amenaza se requerirá de técnicas cartográficas diferentes, pero lo importante es que la información generada sea clara y fácil de entender.

Delgado *et al.* (2006) manifiesta que la cartografía en el tema de riesgos está enfocada a una disminución de las pérdidas a través de la selección de emplazamientos con baja propensión a sufrir desastres naturales. También, a una reducción de la vulnerabilidad, mediante la adopción de medidas de protección de los elementos expuestos a riesgo cuando el territorio ya está ocupado o cuando no existe más alternativa que ocuparlo, pese a lo inapropiado del emplazamiento.

Actualmente el tema de la evaluación de la peligrosidad de deslizamientos se trata desde diferentes metodologías, entre las que sobresalen las técnicas que se basan en la determinación directa de la peligrosidad usando mapas geomorfológicos, mientras que otras se basan en la determinación indirecta de la peligrosidad mediante modelos estadísticos y determinísticos, que interrelacionan los factores de relieve y la distribución de los deslizamientos.

De igual modo, existen metodologías que combinan las dos técnicas, directas e indirectas, pero que dejan en evidencia que en la mayoría de los países no existen normativas específicas sobre la obtención de estos mapas de zonificación.

De acuerdo a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS (2011), la zonificación de la amenaza por deslizamientos es una herramienta básica para enfrentar este tipo de fenómenos. Las cartografías de estas zonas, están enfocadas a una disminución de las pérdidas a través de dos medidas fundamentales: El crecimiento y establecimiento urbano hacia las zonas con baja propensión a sufrir procesos de remoción en masa y la identificación de las zonas expuestas a peligro por estos procesos, para la aplicación de medidas correctivas y de protección cuando las mismas ya estén habitadas.

Generalmente se tienen varias modalidades cartográficas, entre las cuales se destacan los mapas de susceptibilidad, de peligrosidad y de riesgo, los cuales se elaboran de acuerdo a la disponibilidad de información con que se cuenta.

Los primeros, están enfocados en la sectorización o zonificación del territorio de acuerdo a la propensión o susceptibilidad del territorio a sufrir un fenómeno o desastre, bien sea natural o antrópico, permitiendo una estimación de la localización donde se espera que ocurra.

Los mapas de peligrosidad por su parte, están enfocados en conocer la probabilidad de ocurrencia de que se produzca un fenómeno o desastre, al igual que su grado, en un periodo de tiempo determinado. Por lo tanto, no sólo establecen la localización de ocurrencia, sino que también involucran la componente temporal.

Por último, y en conjugación de los anteriores, los mapas de riesgo están enfocados en una valoración de la vulnerabilidad de los elementos expuestos al fenómeno o amenaza, así como los costos de recuperación en una localización caracterizada por un cierto nivel de peligrosidad. De acuerdo a Crozier y Glade (2005), estos mapas tienen dos componentes, en primer lugar la probabilidad de que algo adverso ocurra, y el otro corresponde a las consecuencias económicas derivadas de ello.

## **PARTE III. Conceptos y metodologías aplicadas**

## CAPITULO SIETE

### 7. Evaluación por inestabilidad de taludes y deslizamientos accionados por sismos

Según el informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres (EIRD/ONU 2004), la evaluación estadística de la amenaza de terremotos tiene por objeto evaluar la probabilidad de que en un período específico el movimiento del suelo en un sitio, alcance o supere un nivel determinado. Un método de evaluación alternativo es estimar el movimiento del terreno que produciría un terremoto con la máxima intensidad imaginable a la distancia más desfavorable en un lugar específico.

Esta evaluación puede ser llevada a cabo, mediante la adopción de una metodología apoyada en una plataforma SIG, de manera que se posibilite la realización de un análisis de comparación entre el campo de aceleraciones pico (PGA) que se pueden presentar para un sismo de una magnitud dada y el campo de aceleración crítica y desplazamientos debido al evento sísmico.

Con la metodología propuesta se plantea geográficamente, estimar la amenaza a partir del cálculo de la probabilidad de falla de los taludes para aquellos casos en el que la aceleración pico y el desplazamiento asociado sean mayores que la aceleración crítica que genere el efecto dinámico en el talud, y el desplazamiento crítico que genere el mismo efecto, respectivamente.

Así mismo, para la estimación de la vulnerabilidad se busca calcular la probabilidad de que se produzcan daños, dado que se dio una falla, mediante la utilización de métodos como matrices de daño y el método de índices de vulnerabilidad, empleando como fuente base la información catastral y del Plan de Ordenamiento Territorial.

Finalmente se calculará el riesgo aceptable para el caso de estudio de acuerdo a una ecuación del tipo:

$$R=P[A] \times P[B/A] \times C \quad \text{Ec. 3} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

Donde P[A] corresponde a la probabilidad de que se presente la falla, P[B/A] corresponde a la probabilidad de que ocurran daños dado que se presentó la falla, y C a los costos suscitados por dichos daños.

El campo de aceleración pico (PGA) es obtenido a partir de registros históricos y modelos elaborados para efectos de microzonificación. La aceleración crítica (AC) puede ser obtenida mediante un análisis de estabilidad de taludes pseudo-estáticos basados en la metodología de Newmark (1965) y la deformación puede ser calculada por medio del método simplificado de Newmark. (Godt *et al.* 2008).

Para el desarrollo de la evaluación, se hace necesaria la obtención de mapas geológicos y topográficos de las zonas de interés, que en este caso corresponde a la zona definida por el área metropolitana del Municipio de Medellín.

Igualmente, se debe definir la distribución de materiales geotécnicos y sus parámetros en la zona de estudio. Cabe resaltar que la incertidumbre en los parámetros geotécnicos debe ser modelada, lo cual se puede realizar mediante un método probabilístico como el FOSM, que se trata más adelante.

A partir de registros estadísticos de aceleraciones o calculando la probabilidad de falla, se calcula la probabilidad de que la aceleración crítica sea excedida.

Un factor adicional a considerar es el efecto de la lluvia y la saturación del suelo al momento del sismo, lo cual también es considerado dentro del análisis, a partir de registros de precipitación de varias estaciones pluviométricas dentro y fuera de la zona de estudio.

La distribución de desplazamientos es estimada, y se calcula la probabilidad de que se produzca la falla de los elementos de la infraestructura urbana susceptibles de sufrir daño por el evento sísmico y sus efectos (viviendas, ductos, puentes, entre otros), debido a desplazamientos superiores al desplazamiento crítico.

Para la determinación de la probabilidad de que se produzca la falla o desplazamientos excesivos tanto en los elementos en los cuales se evalúa el riesgo a sufrir daño, como en el medio donde se encuentran localizados, se requiere entonces de algunos parámetros e insumos cartográficos como: Localización de elementos de la infraestructura urbana susceptibles de sufrir daño por el evento sísmico y sus efectos, mapas de pendientes y/o modelos digitales de elevación, mapas de formaciones superficiales, curvas de aceleración pico, mapas geomorfológicos, mapas de coberturas vegetales, entre otros, y otros parámetros de interés como momentos estadísticos de la cohesión efectiva del suelo ( $c'$ ), el ángulo de fricción efectivo del suelo ( $\phi'$ ), y el peso específico del material del talud o ladera ( $\gamma$ ), métodos probabilísticos, registros pluviométricos y criterios de daño específico (Para cada elemento evaluado, en este caso viviendas).

### 7.1. Peligrosidad o amenaza de deslizamientos asociados a sismos. Método de Newmark.

En el año 1965, el Ingeniero Civil Nathan M. Newmark, propuso una metodología para estimar el desplazamiento permanente generado por un movimiento sísmico en presas de tierra. En esta metodología se modela el talud como un bloque rígido de suelo que puede deslizarse a lo largo de un plano situado en su base bajo cierto grado de inclinación.

Este método analítico permite estimar las deformaciones de taludes y laderas ante la acción sísmica, y corresponde a un modelo simplificado en que el suelo se asume con respuesta rígida-plástica. Así mismo, se asume que el suelo no sufre deformaciones hasta cierto valor crítico de la fuerza solicitante, y cuando ésta es superada se deforma plásticamente.

La fuerza crítica se asocia a una aceleración crítica ( $AC$ ) de la masa potencialmente deslizante y mientras las aceleraciones sean inferiores a ésta, no se producen deformaciones debido a su comportamiento rígido. Cuando  $AC$  es excedida, la masa se deforma irreversiblemente.

De acuerdo a FUNVISIS (2011), mientras que en el método clásico de equilibrio se considera que el suelo falla al excederse  $AC$ , en el método de Newmark la evaluación de la posibilidad de falla y el grado de la misma dependen del desplazamiento final, el cual debe ser valorado. Así mismo, la relativa exactitud de este método depende de la suposición de conducta rígida-plástica, pero el resto de problemas geotécnicos, derivados del análisis de las posibles superficies de falla y de las propiedades del material, está reunido en el factor de seguridad ( $FS$ ). Es decir, es de aplicación general en cuanto a la geotecnia.

Este método es aplicado cuando el bloque de masa de suelo se desliza en forma traslacional, pero con algunas modificaciones puede aplicarse a deslizamientos rotacionales.

El análisis de Newmark, se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace más de 15 años, y recientemente se ha calibrado y comparado en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico. (Figueras *et al.* 2005).

### 7.1.1. Evaluación de la estabilidad de taludes

Desde los años 50, el peligro sísmico fue evaluado tradicionalmente a partir de la evaluación del equilibrio de un bloque de masa potencialmente deslizante, bajo condiciones estáticas. Bajo esta condición, se asume que la acción sísmica corresponde a una fuerza estática equivalente, igual a la masa de suelo por una aceleración sísmica equivalente sobre el bloque deslizante.

El valor pico de aceleración del terreno se reduce para el análisis de estabilidad, puesto que dicha aceleración no ocurre ni simultáneamente ni uniformemente en toda la masa y de igual manera por el comportamiento dúctil de muchos suelos. Debido a todas estas consideraciones se habla de un análisis de equilibrio pseudo-estático.

A grandes rasgos, puede decirse que ese método de equilibrio al atender a un único valor de la aceleración, no considera los efectos de deterioro acumulado del suelo que es el que realmente lo convierte en inestable. La aceleración efectiva puede tanto subestimar como sobreestimar el potencial de inestabilidad, debido a que para una misma aceleración efectiva pueden ser diferentes la duración del sismo, el número de ciclos severos, etc., reales condicionantes del deterioro. (FUNVISIS 2011)

En la actualidad, es común la utilización del método de equilibrio para la evaluación de la estabilidad de laderas cuyo comportamiento sea frágil, es decir, con deformaciones casi despreciables.

La resistencia al corte o cizalladura, es el punto de partida para el tratamiento de los problemas de estabilidad de taludes de suelos en terraplenes y cortes.

Coulomb establece en 1773 mediante una ecuación, que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección dada de éste llega a igualar a la resistencia a la cizalladura en esa misma dirección, la cual depende de la cohesión y de la fricción interna entre los granos. La ecuación de Coulomb es la siguiente:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{Ec. 4} \quad (\text{Duque 2002})$$

En la cual  $\tau$  es la resistencia al corte del suelo en un punto y una dirección dada,  $c'$  es la resistencia efectiva por cohesión entre las partículas de suelo,  $\sigma' \tan \phi'$  es la resistencia por fricción interna entre los granos,  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo normal a la dirección considerada,  $\phi'$  el ángulo de fricción efectiva del suelo y  $\tan \phi'$  el coeficiente de fricción interna del material.

En dicha fórmula se supone que la cohesión  $c'$  y la fricción  $\tan \phi'$  son constantes e independientes, pero a pesar de que no son ni lo uno ni lo otro, esta ecuación es tan útil como simple.

La cohesión  $c'$  viene a ser la resistencia al corte del suelo bajo presión normal nula. Ella no existe entre granos de arena y en los limos es relativamente baja y aún nula. El ángulo de fricción interna  $\phi'$  resulta de la fricción mecánica directa entre granos y de la trabazón entre ellos.

El problema de la estabilidad de un talud está supeditado por la acción simultánea de una serie de factores, que como consecuencia generan un desequilibrio entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno, como se puede apreciar en la Figura 16, en la cual se presenta el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas actuantes en un talud o ladera.

Para la evaluación estática de la estabilidad del talud, es decir sin tener en cuenta el efecto sísmico, consideramos un hipotético deslizamiento de un bloque de suelo típico donde actúan dos fuerzas en el centro de masa, una es la fuerza gravitacional " $L$ ", a la que se opone una fuerza " $R$ ", que es la resistencia del talud.

La máxima resistencia " $R_{max}$ ", está en función de la resistencia del suelo del talud y puede expresarse como la integral del esfuerzo cortante por el área de la superficie deslizante.

Durante la acción de un evento sísmico, la aceleración del mismo es tratada como una fuerza desestabilizante más que actúa en dicho bloque, lo que se considera un análisis pseudo-estático, y esta fuerza " $\Delta L$ " es incorporada en el análisis como el producto de la aceleración inducida " $a(t)$ " por la masa " $m$ " del bloque deslizante de suelo o roca.

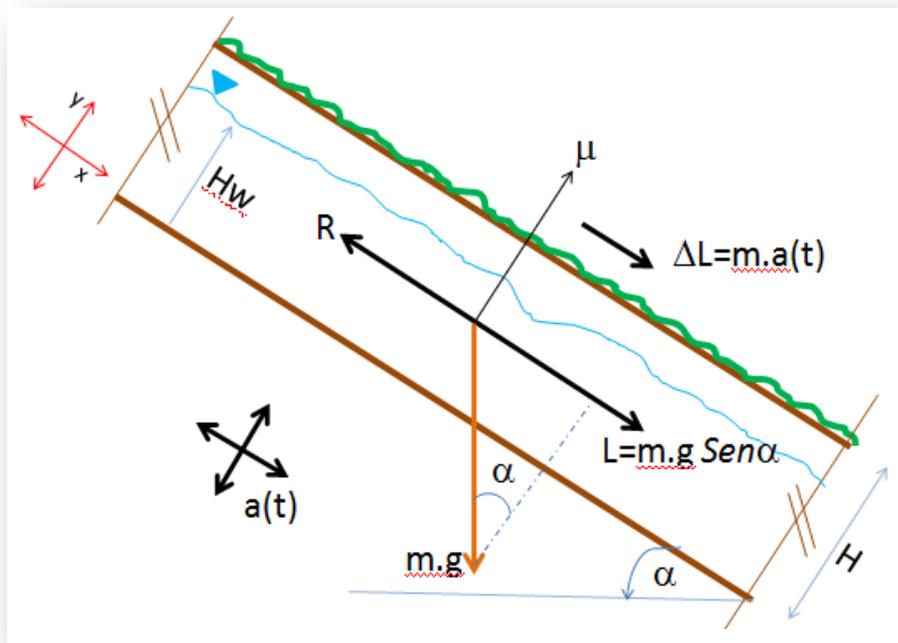


Figura 16 . Diagrama de cuerpo libre del bloque deslizante

Fuente: Elaboración propia

Los efectos inducidos por un sismo suelen producirse durante o después del mismo. La falla de taludes, caídas de rocas y otros deslizamientos así como la licuefacción son efectos inducidos.

Un sismo induce en el suelo condiciones no drenadas, es decir, debido a la aplicación de la carga cíclica y rápida, se produce un incremento de la presión en los poros entre las partículas que puede provocar que las tensiones efectivas tiendan a cero, es decir, se produce una pérdida de la tensión en el contacto entre las partículas. Esto provoca una transformación en el estado del suelo, ya que adquiere la forma de una suspensión.

### 7.1.1.1. Factor de seguridad (FS)

Desde el punto de vista estático, es posible expresar la estabilidad del talud como la relación entre la máxima resistencia del material del talud ( $R_{max}$ ) y la carga ( $L$ ), mediante la siguiente fórmula:

$$FS = \frac{R_{max}}{L} \quad \text{Ec. 5} \quad (\text{Figueras 2005})$$

Para el caso en que la fuerza gravitacional  $L$  sea menor que la fuerza resistente máxima ( $L < R_{max}$ ), el talud se encuentra bajo un equilibrio estable; pero si la fuerza gravitacional  $L$  es mayor que la fuerza resistente máxima ( $L > R_{max}$ ), el talud se encuentra bajo una condición de equilibrio inestable y el desplazamiento del bloque de suelo puede ocurrir.

Para el caso en que la fuerza gravitacional  $L$  sea igual a la fuerza resistente máxima ( $L = R_{max}$ ), el talud se encuentra en un estado crítico en el cual un pequeño incremento en la fuerza gravitacional  $L$  o un decremento en la fuerza resistente  $R$ , puede ocasionar que el talud esté sometido a un desplazamiento permanente que corresponde a una deformación permanente de tipo inelástico en el suelo.

Para el cálculo del factor de seguridad, se asume un modelo de equilibrio simple en un talud infinito de acuerdo al criterio de rotura o de falla de Mohr – Coulomb, para lo cual se requieren los parámetros resistentes de suelo al igual que la pendiente de la ladera.

Numéricamente se calcula mediante la ecuación:

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \text{ sen} \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{H_w \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad \text{Ec. 6} \quad (\text{Jibson et al. 2000})$$

donde  $c'$  es la cohesión efectiva del suelo,  $\phi'$  es el ángulo de fricción efectivo del suelo,  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del terreno,  $\gamma$  es el peso específico del material del talud,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $H$  es el espesor normal a la superficie de rotura medido perpendicularmente a la superficie del terreno y  $H_w$  es la altura de la lámina de agua medida desde la superficie de rotura.

Se puede notar que en la ecuación dada por Jibson *et al.* (2000), el primer término corresponde al componente cohesivo del suelo, el segundo al componente friccionante del suelo y el tercer término es una reducción del esfuerzo debido a la presión de poros.

Cuando se incorpora el efecto del sismo al diagrama de cuerpo libre del bloque deslizante, esta fuerza se incorpora como una fuerza desestabilizadora más, cuyo efecto está asociado a la masa del bloque deslizante, por lo tanto la ecuación del factor de seguridad ( $FS$ ) queda de la siguiente forma:

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos \alpha (\sin \alpha + PGA \cos \alpha)} + \frac{(\gamma H - \gamma_w H_w) \cos \alpha \tan \phi'}{\gamma H (\sin \alpha + PGA \cos \alpha)} \quad \text{Ec. 7} \quad (\text{Hidalgo 2012})$$

Donde  $H$  es el espesor de la zona que falla [m], y  $H_w$  es la altura de la lámina de agua medida desde la superficie de rotura [m],  $c'$  es la cohesión del suelo [kPa],  $\phi'$  es el ángulo de fricción interna del suelo [°],  $\gamma$  es el peso unitario del suelo [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ],  $\gamma_w$  es el peso unitario del agua [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ] y PGA es la aceleración producida por el sismo dada como fracción de la aceleración de la gravedad.

Este parámetro “ $FS$ ” es fácilmente implementado en un SIG, para lo cual se requiere de la generación de los mapas de los parámetros inherentes al suelo, al igual que de la pendiente del terreno.

El espesor del bloque deslizante de suelo de 5 metros se estableció con base en valores similares como el valor límite indicado por Keefer (1984) para los deslizamientos típicos traslacionales que corresponde a 3 metros, al valor de 10 pies (3.0 metros) utilizado por Miles y Keefer (2001) en sus estudios del tema, y por último considerando que las inestabilidades de ladera más frecuentes en la zona de estudio corresponden en su mayoría a desprendimientos y deslizamientos superficiales.

La diferencia entre el valor adoptado para el bloque deslizante y los propuestos por los diferentes autores, radica en que al incrementar la profundidad de falla, se tiene un mayor peso del bloque deslizante, razón por la cual se obtienen valores del factor de seguridad más bajos, que justamente implican mayor inestabilidad del bloque deslizante que es en definitiva lo que se pretende establecer. Esto implica que al realizar el ajuste de los valores de los parámetros resistentes del suelo para obtener factores de seguridad estáticos mayores de uno (1), se obtengan valores extremadamente altos de los parámetros resistentes del suelo, los cuales son poco reales.

Cabe destacar además, que un valor de 5 metros de espesor del bloque deslizante no será una variable fija en ningún evento sísmico, por lo tanto se adopta como un valor considerado factible, omitiendo la posibilidad de deslizamientos rotacionales profundos.

Así mismo, el porcentaje de saturación del terreno del bloque deslizante se consideró variable, tomando como valores de referencia una condición seca y otra condición totalmente saturada de manera simultánea con la ocurrencia del evento sísmico.

#### 7.1.1.2. Aceleración crítica (AC)

Si bien ya se analizó la condición estática de estabilidad del talud, para considerar una condición dinámica, es decir, teniendo en cuenta la acción del evento sísmico, se debe considerar que durante un sismo las ondas pasan a través del talud generando un campo de aceleraciones  $a(t)$ , que aplica una fuerza adicional sobre la masa ( $m$ ) del deslizamiento potencial.

Durante el periodo de tiempo del movimiento fuerte, se induce una fuerza variable y esporádicamente se incrementa la carga cuesta abajo de la ladera. Si esta fuerza sísmica es bastante grande, la carga total hacia abajo sería igual a la fuerza solicitante " $L$ " más la fracción solicitante inducida por el sismo " $\Delta L$ " que puede exceder la máxima resistencia y el talud sufrirá un desplazamiento, tal cual se muestra en la Figura 16.

Se expresa este nivel de movimiento del suelo en términos de una aceleración crítica  $AC$ , que es la aceleración sísmica que multiplicada por la masa es igual a la diferencia entre la máxima resistencia ( $R$ ) y la carga gravitacional ( $L$ ). (Figueras *et al.* 2005).

Para cierto valor de aceleración generada por la acción sísmica, llamada aceleración crítica  $AC$ , se alcanza una situación de equilibrio límite entre las fuerzas resistentes del material (resistencia al corte) y las fuerzas desestabilizantes (componente paralela al talud del peso del bloque más la aceleración del sismo). (Delgado *et al.* 2006)

Por tanto, la aceleración crítica para una ladera, corresponde a aquella para la cual comienza a acumular deformaciones irreversibles, depende del factor de seguridad estático (FS) y de la pendiente ( $\alpha$ ), supuesto un comportamiento simplificado rígido-plástico. Representa el inverso de la susceptibilidad al deslizamiento sísmico de las laderas.

Asumiendo la situación límite considerada, dicha aceleración sísmica horizontal es numéricamente:

$$AC = (FS - 1)g \operatorname{sen} \alpha \quad \text{Ec. 8} \quad (\text{Rodríguez et al. 2008})$$

donde  $AC$  es la aceleración crítica (unidades  $g$ ,  $g = 980 \text{ cm/s}^2$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $FS$  es el factor de seguridad bajo condiciones estáticas y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del terreno.

El caso particular en el cual el  $FS$  es igual a la unidad, implica que  $AC$  sea igual a cero, lo cual significa que el talud ha alcanzado un estado de equilibrio límite, y en este estado cualquier aceleración adicional por mínima que sea, desencadenaría un desplazamiento irreversible o permanente, bajo cualquier geometría (pendiente) del talud o ladera.

La aceleración crítica es una expresión de la capacidad de la ladera para resistir la acción sísmica y depende exclusivamente de su geometría (pendiente) y de los parámetros resistentes del material que la constituyen (factor de seguridad). Por tanto, este parámetro es un índice de susceptibilidad de las laderas a inestabilidades inducidas sísmicamente. (Rodríguez et al. 2008).

Es una medida numérica de la estabilidad del talud, por ende, es un parámetro que describe las propiedades intrínsecas del talud y no depende del escenario sísmico, razón por la cual se constituye en el parámetro apropiado para expresar la susceptibilidad o predisposición de las laderas a presentar inestabilidad en condiciones dinámicas generadas por eventos sísmicos.

En conclusión, la aceleración crítica corresponde a la mínima aceleración del suelo requerida para superar la máxima resistencia del bloque o talud deslizante, para la consideración de que el factor de seguridad es igual a la unidad ( $FS = 1$ ), y por lo tanto un deslizamiento en una ladera de pendiente particular se presenta, en el momento en que la aceleración del suelo excede la aceleración crítica para un intervalo de tiempo finito. De acuerdo a Figueras et al. (2005), si esta fuerza inercial fuera constante en el tiempo, en un cálculo estático se finalizaría el inicio del movimiento de caída, pero la aceleración es ondulatoria, es decir, sus picos se convierten en acciones de pulsación.

### 7.1.1.3. Desplazamiento de Newmark (DN)

Una vez sea determinada la aceleración crítica que establece la condición límite en el talud o ladera, puede realizarse la estimación del desplazamiento que se produce en la ladera a causa del evento sísmico. A dicho desplazamiento se lo conoce como desplazamiento de Newmark (DN).

El desplazamiento del bloque de masa deslizante está calculado para dos entradas: La aceleración crítica ( $AC$ ), calculada previamente y un sismograma de un movimiento sísmico fuerte, donde está registrada la aceleración del suelo en función del tiempo  $a(t)$ .

Si la  $a(t) < AC$ , el bloque deslizante estará estacionario respecto a la pendiente, y cuando la magnitud del movimiento supera la aceleración crítica ( $a(t) > AC$ ), el bloque se ve afectado por el desplazamiento inducido por la pulsación de toda la fracción que supera la aceleración crítica.

Se llama desplazamiento de Newmark ( $DN$ ) a la doble integración de la parte del acelerograma que supera el límite de la aceleración crítica. Con este cálculo se cuantifica el exceso de energía acumulada respecto a la condición de equilibrio.

En principio, el desplazamiento acumulado (*DN*) está dado por la doble integral sobre el tiempo (*t*) de la aceleración del sismo como se ilustra en la Figura 17.

$$DN = \int_0^t \int_0^t [|a(t) - AC|] dt^2 \quad \text{Ec. 9} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

Donde *AC* es la aceleración crítica dada en unidades de la aceleración de la gravedad *g*.

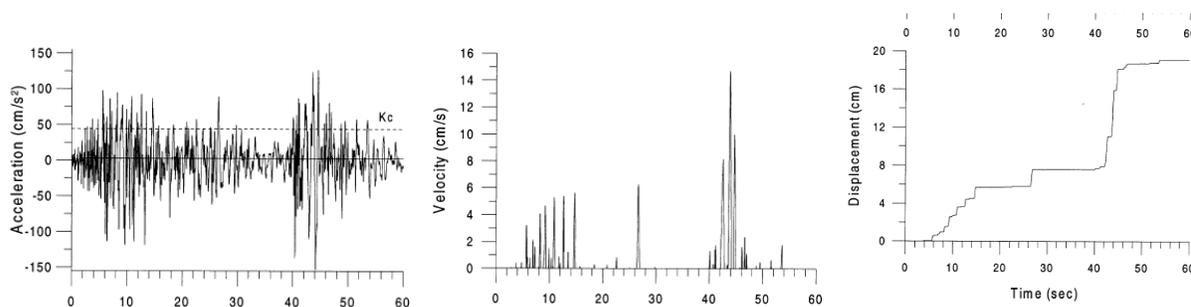


Figura 17. Ejemplo del registro acelerométrico del sismo de Irpinia (PGA 0.156g), Ms 6.8 con aceleración crítica AC=0.045g Fuente: Romeo (2000)

Para aplicaciones a nivel regional, es más conveniente emplear el método de Newmark con ecuaciones de regresión del *DN*, con parámetros del movimiento del suelo tales como la Intensidad de Arias (*IA*) o la Aceleración Sísmica Pico (*PGA*, *Peak Ground Acceleration*).

El colapso del suelo asociado a los deslizamientos y movimientos de falla provocados por el sismo afectan a la estructura cuando se halla en la zona de influencia de la rotura. Este fenómeno se cuantifica mediante el desplazamiento permanente del suelo.

En una solución bajo ambiente SIG, la construcción de un mapa de desplazamiento de Newmark se obtiene mediante técnicas de análisis espacial de mapas georreferenciados, los cuales corresponden a un mapa de aceleración crítica generado a partir del mapa de factor de seguridad con el mapa de pendientes, y además, diversos mapas de desplazamiento de Newmark para diferentes escenarios sísmicos.

La intensidad de Arias (*IA*) corresponde a una medida de la energía total absorbida por el terreno determinada a partir del acelerograma registrado, la cual es calculada numéricamente mediante la ecuación:

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) dt \quad \text{Ec. 10} \quad (\text{Delgado 2006})$$

en donde *g* es la aceleración de la gravedad, *t<sub>0</sub>* la duración total del acelerograma y *a(t)* la aceleración del terreno.

A partir de la Intensidad de Arias, es posible determinar el desplazamiento de Newmark, representando la contribución del terremoto como elemento desencadenante, de manera que al aumentar, mayor es el desplazamiento *DN* resultante.

$$\log DN = 1.521 \log IA - 1.993 \log AC - 1.546 \quad \text{Ec. 11} \quad (\text{Funvisis 2011})$$

donde  $DN$  está expresado [cm],  $IA$  en [m/s] y  $AC$  en unidades de  $g$ .

Se ha podido comprobar que el uso de la intensidad de Arias, actuando como parámetro representativo de la intensidad sísmica, conduce a estimaciones cercanas a las de la integración particular de acelerogramas. Es decir, se pueden correlacionar los desplazamientos que producen los acelerogramas con su intensidad de Arias. (FUNVISIS 2011)

Se reconocen a Wilson y Keefer (1985) como los pioneros del uso de la correlación entre la intensidad de Arias y los deslizamientos de laderas, quienes desarrollaron también una ley de atenuación que relaciona las intensidades de Arias con la magnitud y distancia de los sismos, lo que permite calcular valores esperados en los sitios, mediante una evaluación particular de la amenaza sísmica.

### 7.1.2. Valores umbrales para el desplazamiento de Newmark

Calculado el  $DN$ , es preciso determinar si el desplazamiento acumulado es significativo o no para producir inestabilidad, puesto que no necesariamente se produce la falla o rotura del talud, a pesar de que sea excedida la  $AC$  durante un evento sísmico.

En el estudio realizado por Delgado *et al.* (2006), se comentan resultados obtenidos por Jibson *et al.* (2000), en los cuales analizando la relación entre  $DN$  y la presencia o ausencia de inestabilidades, obtuvieron una expresión para calcular la probabilidad de rotura del talud, que es la base de sus cartografías de peligrosidad.

Para establecer el criterio de falla y el inicio del movimiento, se debe fijar un límite de  $DN$  que puede acumular la masa del bloque deslizante como máximo, hasta salir de la condición de equilibrio en reposo. El valor crítico adoptado para el desplazamiento puede variar extensamente, puesto que es muy dependiente de parámetros como el tipo de falla del talud, la litología, la geometría del talud y de los movimientos anteriores registrados en el talud.

Los desplazamientos de Newmark no representan por si mismos valores exactos de las deformaciones esperadas en las laderas, sino índices de dichas deformaciones, por lo cual se establecen valores de  $DN$  que sirvan como umbrales que representen la condición de estabilidad.

Wilson y Keefer (1985), propusieron caracterizar las condiciones de inestabilidad en términos de superación de valores umbral de  $DN$  para diversas tipologías de inestabilidad: 10 cm para movimientos denominados coherentes en suelos dúctiles y 2 cm para movimientos en masas desorganizadas en rocas o suelos frágiles. Dichos autores sugieren valores de  $IA$  a partir de los cuales se producen inestabilidad: 0.11 m/s para deslizamientos y desprendimientos superficiales, 0.32 m/s para deslizamientos rotacionales y flujos en suelos, y para deslizamientos traslacionales en roca, y 0.54 m/s para extensión lateral.

Según Rodríguez *et al.* (2008), los desplazamientos de Newmark obtenidos en un trabajo a escala regional no se deben tomar como una medida efectiva del desplazamiento sísmico de las laderas durante un terremoto, sino como un índice de inestabilidad potencial. En general, valores de

desplazamiento superiores a 5 cm, implican potencialmente la aparición de deslizamientos, mientras que desplazamientos inferiores son característicos de desprendimientos. Sin embargo, dado que estos valores pueden tener una dependencia muy fuerte según las características del territorio estudiado y de los materiales considerados, es importante contrastarlos con casos reales. Este análisis de contraste puede realizarse, por una parte, comparando los mapas de desplazamiento de Newmark con mapas de inestabilidades conocidas y, por otra, comparando con casos puntuales de inestabilidades asociadas unívocamente a terremotos concretos.

### 7.1.3. Simplificaciones y consideraciones del método de Newmark

Entre las diversas simplificaciones del método, Delgado *et al.* (2006) consideran que la masa potencialmente inestable no sufre deformación interna, ni experimenta desplazamientos permanentes cuando es sometida a aceleraciones inferiores a  $AC$ .

Se considera que la resistencia al corte del terreno en condiciones estáticas y dinámicas son iguales, no contempla el efecto que la presión de poros inducida por la acción sísmica pueda tener en las propiedades resistentes del material y, por último, considera que  $AC$  es independiente del nivel de deformación inducida en el terreno y es, por tanto, constante a lo largo del análisis.

Este método permite una buena estimación del desplazamiento de la masa inestable si se conoce bien la geometría del talud, sus propiedades geotécnicas y el movimiento del terreno inducido por el sismo.

## 7.2. Métodos probabilísticos para la estimación de probabilidades de falla o deslizamiento

Dentro del contexto del presente trabajo, el proceso de análisis de riesgos implica tener que recurrir a los métodos probabilísticos de análisis, para modelar la incertidumbre de ciertos parámetros geotécnicos que se toman como parámetros iniciales del modelo de cálculo, al igual que en la estimación de la probabilidad de falla de los taludes.

En la resolución de un problema determinado en el cual sean consideradas diferentes tipos de variables, bien sea de carácter geométrico, de resistencia, entre otras, las cuales son asumidas como un vector de un espacio  $n$ -dimensional  $(X_1, X_2, X_n)$ , se define una función de resistencia  $R(x_1, x_2, x_n)$  que favorece la seguridad, y una función de sollicitación  $L(x_1, x_2, x_n)$  que favorece la condición de falla, por lo que se puede definir una función adimensional  $G(x_1, x_2, x_n)$  que satisfaga la ecuación:

$$G(x_1, x_2, x_n) = \frac{R(x_1, x_2, x_n)}{L(x_1, x_2, x_n)} \quad \text{Ec. 12} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

De acuerdo a este análisis y observando la Figura 18, un punto definido dentro del espacio  $n$ -dimensional se encuentra en la región segura si se cumple la condición:

$$G(x_1, x_2, x_n) > 1 \quad \text{Ec. 13} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

De lo contrario, el punto considerado dentro de este espacio queda en la región de falla si:

$$G(x_1, x_2, x_n) < 1 \quad \text{Ec. 14} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

La frontera que separa la región de seguridad de la región de falla se denomina estado límite como se aprecia en la Figura 18, y corresponde a la situación definida por el plano n-dimensional:

$$G(x_1, x_2, x_n) = 1 \quad \text{Ec. 15} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

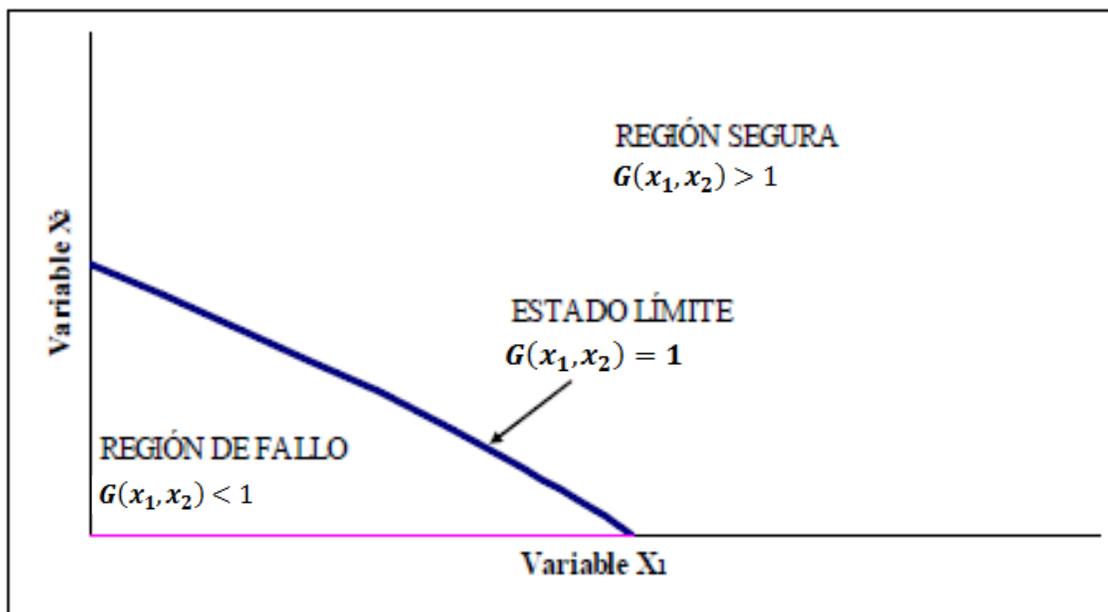


Figura 18. Región de seguridad, de falla y estado límite (Caso Bidimensional)

Fuente: Adaptada de Altarejos et al. (2008)

La notación más habitual para definir la ecuación de estado corresponde a:

$$G(x_1, x_2, x_n) = F \quad \text{Ec. 16} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

En el caso específico tratado en este trabajo respecto a la estabilidad de taludes, la función adimensional  $G(x_1, x_2, x_n)$  que relaciona las fuerzas resistentes y solicitantes en un talud, es tratada como el factor de seguridad ( $FS$ ), para efectos de dar continuidad a la notación empleada.

Definiendo un valor de (1) como umbral del factor de seguridad ( $FS$ ) para efectos de la estabilidad, en la región segura se cumple que:

$$G(x_1, x_2, x_n) - 1 > 0 \quad \text{Ec. 17} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

En la Figura 19, se ilustra gráficamente el concepto de coeficiente de seguridad, la utilización de esta metodología supone adoptar valores fijos para las variables consideradas ( $X_1, X_2, X_n$ ), que se denominan valores representativos.

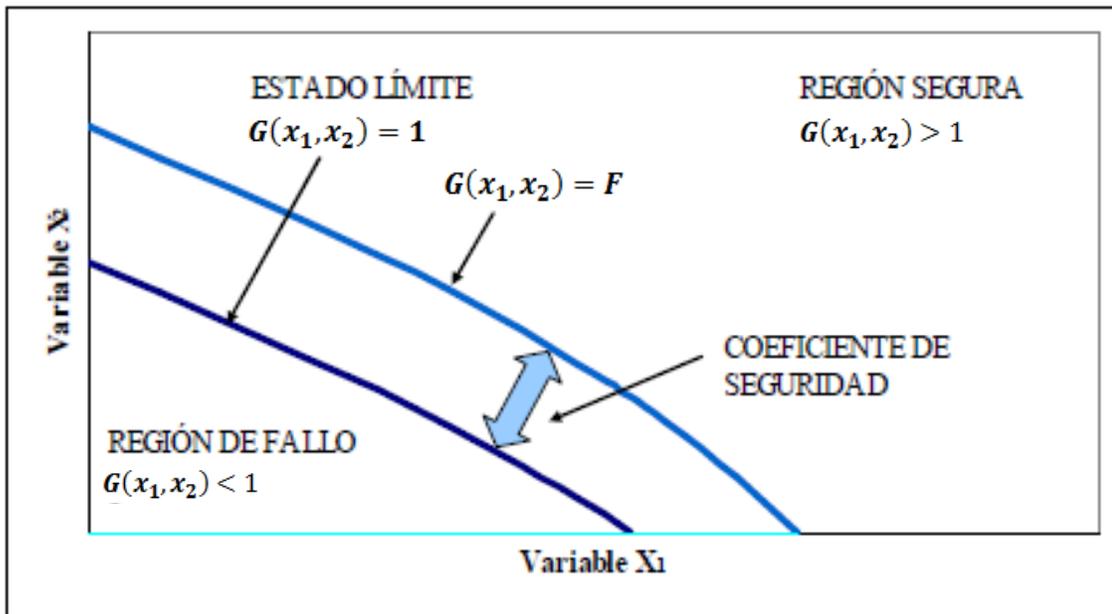


Figura 19 . Incremento del margen de seguridad mediante el FS  
Fuente: Adaptada de Altarejos *et al.* (2008)

El estudio de los modos de falla se realiza a menudo mediante modelos matemáticos, y es común la utilización de diferentes métodos de evaluación de la seguridad que suelen clasificarse como métodos deterministas, estadísticos, adaptativos y probabilísticos. Las principales características de cada uno de ellos se presentan con detalle en Altarejos *et al.* (2008), y se resumen a continuación:

- ✓ **Métodos deterministas:** Son aquellos que están basados en leyes físicas y principios generales de la mecánica, como por ejemplo, la resistencia de materiales y la mecánica de suelos, la hidráulica, entre otras. Estos métodos hacen uso de modelos matemáticos y técnicas numéricas como los elementos finitos y las diferencias finitas, entre otras.
- ✓ **Métodos estadísticos:** Son aquellos que están basados en el proceso de los datos disponibles de comportamiento de las estructuras analizadas, mediante modelos matemáticos estadísticos.
- ✓ **Métodos adaptativos:** Son aquellos que están basados en técnicas de inteligencia artificial. Las dos familias de modelos principales son los sistemas expertos y las redes neuronales. Resuelven problemas mediante técnicas de aprendizaje a partir de ejemplos previos similares.
- ✓ **Métodos probabilísticos:** Son aquellos que introducen la incertidumbre en la formulación de los problemas para obtener la probabilidad de que un sistema o estructura no cumpla los requisitos de diseño o estabilidad. Utilizan técnicas de confiabilidad estructural, de estimación de probabilidades y de análisis de riesgos. Estos son los adoptados para modelar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos para estimar la probabilidad de falla de los taludes.

### 7.2.1. Niveles de análisis en los métodos probabilísticos

El objetivo de estos métodos de acuerdo a lo propuesto por Altarejos *et al.* (2008), radica en determinar la probabilidad de falla definida por:

$$P(f)[G(x_1, x_2, x_n) \leq 1] = \int_{G(x_1, x_2, x_n) \leq 1} f_{x_1, x_2, x_n}(x_1, x_2, x_n) dx_1 dx_2 dx_n \quad \text{Ec. 18}$$

Donde  $f_{x_1, x_2, x_n}(x_1, x_2, x_n)$  corresponde a la función de densidad de probabilidad conjunta de las variables aleatorias y  $G(x_1, x_2, x_n) \leq 1$  representa la región de integración que corresponde a la región de fallo.

Dichos autores agrupan los métodos para estimar la probabilidad de falla de un sistema o estructura en distintos niveles, conocidos como Nivel I, Nivel II y Nivel III.

El método de Nivel I o clásico, es el de los factores de seguridad parciales, el cual no proporciona la probabilidad de fallo y la incertidumbre se mide mediante factores arbitrarios, por tal motivo, no se hace un profundo análisis en este apartado. Corresponde al caso determinista que involucra la determinación de los valores esperados del factor de seguridad basados en la metodología de talud infinito.

Los métodos de Nivel II por su parte, abarcan los denominados métodos de los momentos estadísticos de segundo orden, los cuales pueden proporcionar la probabilidad de fallo. Aproximan la función de densidad de probabilidad conjunta, mediante sus dos primeros momentos (media y desviación típica). Uno de estos métodos corresponde al FOSM, explicado en detalle más adelante, y el cual fue adoptado para el desarrollo de este trabajo debido a su aplicabilidad de acuerdo a la información inicial disponible para la estimación de la probabilidad de falla de los taludes de la zona de estudio.

Por último, están los métodos de Nivel III, que son los denominados métodos exactos, los cuales proporcionan la probabilidad de fallo y utilizan la función de densidad conjunta global y métodos específicos para poder realizar la integración.

A continuación se resumen las características más importantes de cada nivel.

NIVEL	Métodos de cálculo	Distribuciones estadísticas	Ecuaciones de estado limite	Incertidumbres asociadas	Resultados
Nivel 1	Calibración de códigos con métodos de nivel 2 ó 3	No se utilizan	Ecuaciones lineales usualmente	Factores arbitrarios	Coefficientes Parciales
Nivel 2	Álgebra de segundo orden	Sólo distribuciones normales	Lineales o aprox. lineales	Puede incluirse como distribuciones normales	Probabilidad de fallo
Nivel 3	Transformaciones	Distribuciones normales equivalentes	Lineales o aprox. lineales	Puede incluirse	Probabilidad de fallo
	Integración numérica y simulación	Cualesquiera	Cualesquiera	Variables aleatorias	

Tabla 6 . Niveles de medidas de confiabilidad estructural

Fuente: Altarejos *et al.* (2008)

## 7.2.2. Métodos probabilísticos de análisis de Nivel II

### 7.2.2.1. Método FOSM de Series de Taylor

Los métodos de Nivel II son aquellos que hacen uso de aproximaciones de la función correspondiente a la región de fallo  $G(x_1, x_2, x_n)$  de tipo lineal (es decir, de primer orden, o First Order en inglés) y de igual modo, en lugar de trabajar con la función de densidad de probabilidad conjunta, utilizan únicamente los dos primeros momentos de la misma (Second Moment). De ahí su nombre como método FOSM (First Order Second Moment).

Mediante la aplicación de este método, el resultado obtenido es un índice de confiabilidad ( $\beta$ ), el cual se define como el número de desviaciones estándar que separan el valor esperado, es decir, la media de la función  $G(x_1, x_2, x_n)$ , del valor correspondiente al estado límite  $G(x_1, x_2, x_n) = 1$ .

De este modo, el valor obtenido proporciona una medida relativa de la confiabilidad, ya que considera la distancia del valor más probable a la región de falla, de forma que cuanto mayor sea  $\beta$ , más segura es la estructura analizada (talud o ladera en este caso), pero no proporciona el valor buscado de la probabilidad de falla.

Numéricamente, el índice de confiabilidad esta dado por:

$$\beta = \frac{E[G] - (G)_{Fall\alpha}}{\sigma_G} = \frac{E[G] - 0}{\sigma_G} = \frac{E[G]}{\sigma_G} \quad \text{Ec. 19} \quad (\text{Adaptada de Altarejos et al. 2008})$$

Donde  $E[G]$  corresponde a la esperanza de  $G$  y  $\sigma_G$  a la desviación estándar de  $G$ .

Dado que  $X_1, X_2, X_n$  son variables aleatorias, la función correspondiente a la región de falla  $G(x_1, x_2, x_n)$  es una variable aleatoria, que tendrá una función de distribución de probabilidad determinada, que habitualmente es desconocida. Para la determinación de la probabilidad de falla, se suele realizar una hipótesis sobre cómo es la función de distribución de  $G(x_1, x_2, x_n)$ , que en el presente trabajo fue asumida como una distribución normal y otra lognormal y se puede apreciar en los Anexos digitales 4 y 5.

Realizada esta hipótesis y con los dos primeros momentos estadísticos de la distribución, obtenidos a partir de los dos primeros momentos de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias  $X_1, X_2, X_n$ , es posible obtener el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla.

### 7.2.2.2. Método de Estimación Puntual

Este método consiste en una aproximación de los dos primeros momentos estadísticos de la función correspondiente a la región de falla  $G(x_1, x_2, x_n)$ , mediante la discretización de las funciones de probabilidad de las variables aleatorias  $X_1, X_2, X_n$ .

Este proceso se realiza mediante algunos puntos para cada una de ellas, usualmente dos o cuanto más tres, donde se concentra la probabilidad, de modo que la suma de las probabilidades concentradas en los puntos es igual a la unidad para cada variable.

La formulación general de este método consiste en aproximar hasta el tercer momento de las distribuciones, lo que permite el análisis con variables aleatorias asimétricas, pero también admite el tratamiento de variables aleatorias correlacionadas. A diferencia del método de las series de Taylor descrito anteriormente, no es preciso evaluar las derivadas parciales de la función  $G(x_1, x_2, x_n)$ .

Una desventaja que presenta este método es que precisa evaluar la función  $G(x_1, x_2, x_n)$   $2n$  veces, siendo  $n$  el número de variables aleatorias consideradas. Por lo tanto si  $n$  es grande, la aplicación del método requiere un gran esfuerzo de cálculo, sobre todo si la evaluación de  $G(x_1, x_2, x_n)$  no es inmediata.

Mediante la aplicación de este método, es posible estimar la media y la varianza de la distribución de probabilidad de  $G(x_1, x_2, x_n)$ , pero, al igual que con el método anterior FOSM, la forma de la distribución es desconocida, lo cual implica que para obtener una estimación de la probabilidad de falla, se requiere de nuevo una hipótesis sobre el tipo de función de probabilidad de  $G(x_1, x_2, x_n)$ , y proceder de forma análoga al procedimiento descrito para el FOSM.

Una limitante de este método es que pierde exactitud cuando hay no linealidades crecientes de la función  $G(x_1, x_2, x_n)$ , y para la estimación de momentos estadísticos de orden superior al segundo. No proporciona un criterio sobre el aporte a la varianza de  $G(x_1, x_2, x_n)$  de cada una de las variables aleatorias  $X_i$ , por lo que no es adecuado para identificar las variables más significativas en el análisis.

### **7.2.2.3. Método del Elipsoide de Hasofer - Lind**

Los índices de confiabilidad que se obtienen mediante la utilización de los dos métodos enunciados anteriormente, tienen la particularidad de no ser invariantes, sino que dependen de cómo se haya definido la función  $G(x_1, x_2, x_n)$ , por lo cual Hasofer y Lind propusieron una definición invariante del índice de confiabilidad.

Este método tiene en cuenta el vector de las variables aleatorias que intervienen  $(X_1, X_2, X_n)$ , que son asumidas normales,  $\mu_x$  el vector de las medias,  $\sigma_x$  la matriz de varianzas covarianzas y  $G(x_1, x_2, x_n)$  la función de estado, que se asume lineal.

El punto del espacio  $n$ -dimensional que verifica la condición establecida, se denomina punto de diseño, el cual se encuentra sobre el límite de la región de falla, y corresponde al punto más probable de todos los puntos de dicha superficie. Es decir, aquel punto para el cual la función de densidad conjunta de todas las variables aleatorias que intervienen  $f_{x_1, x_2, x_n}$  es la máxima, de todos los que se encuentran en dicha superficie.

Para aplicar el método de Hasofer y Lind es común transformar las variables aleatorias normales correlacionadas  $(X_1, X_2, X_n)$  en variables aleatorias normales independientes y estandarizadas, de media cero y varianza la unidad  $(Z_1, Z_2, Z_n)$ .

Para resolver el problema se pueden utilizar diversos algoritmos como el de Newton, el gradiente conjugado, entre otros. Al igual que en los casos anteriores, la probabilidad de falla se obtiene a partir del índice de confiabilidad, haciendo una hipótesis sobre la función de probabilidad de  $G(x_1, x_2, x_n)$ . Si las variables aleatorias son normalmente distribuidas y  $G(x_1, x_2, x_n)$  es una función lineal, entonces  $G(x_1, x_2, x_n)$  se distribuye normalmente.

### 7.2.3. Métodos probabilísticos de análisis de Nivel III

#### 7.2.3.1. Simulaciones de Monte Carlo.

Los métodos de nivel III permiten una evaluación más exacta de la probabilidad de falla, debido a que trabajan con las funciones de densidad de probabilidad completas de las variables aleatorias y no solamente con los dos primeros momentos de las mismas, pero requieren gran capacidad computacional.

El problema que persiste es la evaluación de la integral definida de la probabilidad de falla que se indicó al comienzo. Para calcular el valor de dicha integral se adoptan dos tipos de métodos. Por un lado están los métodos que utilizan transformaciones especiales de las variables aleatorias y siguen una metodología similar a los métodos FOSM, basada en obtener el índice de confiabilidad  $\beta$ . Entre ellos están los métodos denominados FORM (First Order Reliability Methods) y SORM (Second Order Reliability Methods). El otro gran grupo de métodos de nivel III lo forman aquellos mediante los cuales se pretende evaluar directamente el valor de la integral definida de la probabilidad de falla. Entre ellos se encuentran los métodos de integración numérica (regla trapezoidal, regla de Simpson, Gauss-Laguerre, Gauss-Hermite, etc.) y los métodos de simulación (métodos de Monte Carlo).

Puesto que se trata de evaluar una integral cuyo significado es la probabilidad de falla, con los métodos de simulación lo que se hace es generar  $n$  simulaciones de las variables aleatorias mediante técnicas estadísticas, de forma que los valores generados son consistentes con las distribuciones supuestas o conocidas de los mismos y con las posibles correlaciones existentes entre las variables.

La concepción de estas simulaciones de las variables aleatorias se lleva a cabo mediante técnicas estadísticas como el método de la transformación inversa, el método de la composición, el método de aceptación y rechazo, entre otros. Se evalúa la función de estado para cada una de estas simulaciones, obteniendo el número de veces  $m$ , en que se verifica la condición de fallo  $G(x_1, x_2, x_n) < 1$ .

Estos métodos de nivel III se denominan exactos porque proporcionan el valor exacto de la probabilidad cuando el número de simulaciones tiende al infinito, razón por la cual implica gran esfuerzo computacional. Para valores menores de  $n$ , lo que proporciona es una estimación del valor de la integral de probabilidad de falla.

Es habitual utilizar técnicas de simulación para realizar inferencias acerca de la función de estado  $G(x_1, x_2, x_n)$ , y por ende del factor de seguridad. En efecto, las  $n$  simulaciones realizadas de  $G(x_1, x_2, x_n)$  constituyen una muestra de dicha variable aleatoria, siendo posible por tanto realizar estimaciones acerca de parámetros importantes que permitan conocer cómo se distribuye  $G(x_1, x_2, x_n)$  en términos probabilísticos (media, varianza, sesgo, etc.). Una vez ajustada o deducida una función de distribución para la función de estado,  $F G(x_1, x_2, x_n)$ , la probabilidad de falla se obtiene de forma inmediata.

Una aparente ventaja de esta forma de proceder es que, una vez deducida  $F G(x_1, x_2, x_n)$ , para lo que puede bastar con un valor de  $n$  moderado, se conoce completamente el dominio de probabilidad, y se pueden estimar probabilidades muy bajas, situadas en las colas de la distribución.

La desventaja principal de este método radica en que la función deducida  $F G(x_1, x_2, x_n)$ , puede no ser adecuada en la cola de la distribución, región menos conocida pero más importante a efectos de estimar la probabilidad de falla, por lo que las estimaciones así realizadas pueden arrojar resultados con errores importantes.

#### 7.2.4. Incertidumbre en Geotecnia

En geotecnia los procedimientos y análisis están colmados de cierta incertidumbre cuya fuente es diversa. Usualmente las fuentes de incertidumbre en geotecnia se han clasificado en incertidumbre de los datos y de los modelos, pero de acuerdo a Hidalgo y Assis (2011), la incertidumbre ha sido subdividida en tres grandes categorías: variabilidad natural, incertidumbre en el conocimiento e incertidumbre en los modelos de decisión, las cuales se detallan a continuación.

Respecto a la variabilidad natural, está asociada con la aleatoriedad inherente a los procesos naturales, manifestándose como variabilidad en el tiempo para fenómenos que toman lugar en un único lugar (variación temporal), o variabilidad en el espacio para eventos que se producen en diferentes lugares al mismo tiempo (variación espacial), o la combinación de ambas.

En cuanto a la incertidumbre en el conocimiento, es atribuida a la carencia de datos, ausencia de información acerca de eventos y procesos, o a la falta de entendimiento de las leyes físicas que limitan la habilidad para modelar el mundo real.

Así mismo, la incertidumbre en el conocimiento se puede dividir en tres subcategorías: incertidumbre en la caracterización del sitio, incertidumbre en los modelos e incertidumbre en los parámetros.

En la primera sub categoría, la incertidumbre en la caracterización del sitio, depende de la adecuada interpretación que se hace de la geología sub superficial. Esto resulta de la incertidumbre de los datos y de la exploración, incluyendo errores de medición; inconsistencia y heterogeneidad de los datos; manipulación de los datos y errores de transcripción; e inadecuada representatividad del muestreo debido a limitaciones de tiempo y espacio.

La segunda sub categoría, la incertidumbre de los modelos, depende del nivel de precisión con que el modelo matemático escogido representa la realidad. Esta incertidumbre, refleja la inhabilidad de un modelo o técnica de diseño para representar precisamente el verdadero comportamiento físico del sistema, o la inhabilidad del diseñador para identificar el mejor modelo.

Finalmente, la incertidumbre en los parámetros depende de la precisión con que los parámetros del modelo pueden ser estimados. Resulta de la inexactitud en la determinación de los valores de los parámetros a partir de ensayos o calibración de datos y es exacerbado por el número limitado de observaciones, resultando en imprecisión estadística.

La variabilidad espacial de los parámetros es la diferencia real de características del comportamiento debidas a diferencias de composición, meteorización e historia de tensiones entre un punto y otro.

La variabilidad de los parámetros geotécnicos que tienen influencia en los procesos de análisis de riesgo por deslizamiento puede ser manejada mediante técnicas estadísticas y probabilísticas.

Según el USACE (1999), los valores de los momentos probabilísticos pueden ser estimados de varias formas entre las cuales se pueden citar:

- ✓ Análisis estadísticos de determinaciones en ensayos del parámetro deseado
- ✓ Ensayos índice que pueden ser correlacionados con el parámetro deseado
- ✓ Basados en criterio y experiencia cuando no hay datos disponibles.

#### 7.2.4.1. Análisis probabilista de las propiedades geotécnicas

Puesto que las propiedades geotécnicas del suelo no son constantes en el espacio y presentan una alta variabilidad, la incertidumbre inherente a los datos geotécnicos, al tratarse de un estudio regional, requieren tratarse a partir de métodos de simulación estadísticos, como por ejemplo el método de Monte Carlo o el método de Primer Orden Segundo Momento (FOSM), descritos anteriormente.

Parámetros como la pendiente de la ladera ( $\alpha$ ), puede considerarse como un parámetro determinista, pero como se mencionó anteriormente, las propiedades geotécnicas se caracterizan por una variabilidad natural, existiendo una cierta incertidumbre acerca de cuál es el valor representativo cuando se trabaja en un área extensa.

Delgado *et al.* (2006) establecen que la concepción original del método de Newmark considera un valor constante para cada parámetro del talud que interviene en el cálculo de la aceleración crítica o del desplazamiento de Newmark, y que por ende se trata de un método de análisis determinista, el cual presenta limitaciones en el cálculo de estabilidad de taludes debido a la necesidad de contemplar la variabilidad intrínseca de las propiedades geotécnicas.

Por otro lado, los métodos probabilísticos permiten la evaluación de la distribución de probabilidades de una variable dependiente, en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes que la generan.

De acuerdo a Hidalgo y Assis (2011), tradicionalmente, en la práctica de la ingeniería geotécnica, la incertidumbre de los parámetros y de los modelos se ha tratado de manejar por medio de la magnitud de los factores de seguridad o confiando en la experiencia de los ingenieros a cargo de los diseños, pero exigencias normativas como las establecidas por el denominado “Eurocódigo 7”, solicitan la evaluación de la variación de los parámetros involucrados en análisis de estado límite y la determinación de las causas y/o los modos de obtener un estado límite (falla), las posibles consecuencias de la falla en términos de riesgos de vida, lesiones y potenciales pérdidas económicas y los costos y procedimientos necesarios para reducir el riesgo de falla.

#### 7.2.4.2. Método Probabilístico adoptado para la estimación de la probabilidad de falla. Método FOSM (First Order, Second Moment)

El denominado método del primer orden y segundo momento (FOSM First Order, Second Moment), utiliza la serie de Taylor para la determinación de la distribución de probabilidad de una función con un número de variables aleatorias. (Baecher y Christian 2003).

Este método tiene como base un truncamiento de la función de expansión de la Serie de Taylor, y tanto la entrada como la salida de datos son expresadas por valores esperados y su desviación estándar.

Este tipo de método tiene como ventaja, que los cálculos matemáticos son simplificados y se requiere solamente el conocimiento de los valores de los momentos de las distribuciones estadísticas de las variables que forman la función.

Para  $n$  variables aleatorias no correlacionadas,  $G(x_1, x_2, x_n)$ , conservando solamente los términos lineales en la Serie de Taylor, se obtiene:

$$E[G] = G(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_n) \quad \text{Ec. 20} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

$$V[G] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial G}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad \text{Ec. 21} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

$$\bar{x}_i = E[x_i] \quad \text{Ec. 22} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

donde  $\bar{x}_i$  es el valor esperado de la variable, el cual corresponde a su valor medio;  $V(x_i)$  es la varianza de la variable  $x_i$  y  $E[G]$  corresponde a la esperanza de  $G$ . La función  $G$  es evaluada para los valores medios de todas las variables, al igual que su varianza  $V[G]$ .

Los valores de las derivadas pueden ser obtenidos mediante el cálculo analítico, pero es más usual y recomendable usar la aproximación numérica sugerida por Christian *et al.* (1994).

$$\frac{\partial G}{\partial x_i} = \frac{G(x_i + \Delta x_i) - G(x_i)}{\Delta x_i} \quad \text{Ec. 23} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

Para el caso de estudio, se adoptó como valor de incremento, un 10% del valor medio de cada parámetro geotécnico.

En las expresiones anteriores, la serie de Taylor fue truncada a partir de sus términos de segundo orden, despreciándose por lo tanto, los efectos de los terceros y cuartos momentos probabilísticos. Esta aproximación es plenamente aceptable para fines prácticos. (Baecher y Christian 2003).

#### 7.2.4.3. Índice de Confiabilidad y Probabilidad de Falla

En estadística se puede definir la confiabilidad como:

$$IC = 1 - P(f) \quad \text{Ec. 24} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

donde  $IC$  es la confiabilidad y  $P(f)$  es la probabilidad de que se produzca una falla.

Actualmente, es común expresar la confiabilidad en la forma de un índice de confiabilidad, que se relaciona con una probabilidad de falla. Se puede entender en este contexto que la falla incluye no solamente fallas catastróficas sino cualquier diferencia inaceptable entre el comportamiento esperado y

el observado, por lo que se deben establecer a priori los valores umbrales de lo que se considera aceptable o inaceptable.

Hidalgo y Assis (2011) establecen que el índice de confiabilidad " $\beta$ " del coeficiente o factor de seguridad ( $FS$ ), se puede calcular por la siguiente expresión, toda vez que el factor de seguridad crítico del talud ( $FS_{cr}$ ) o umbral es igual a 1,0.

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma[FS]} \quad \text{Ec. 25} \quad (\text{Hidalgo y Assis 2011})$$

donde  $E[FS]$  es el valor esperado del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes y  $\sigma[FS]$  es la desviación estándar del factor de seguridad.

El método relaciona el índice " $\beta$ " con la probabilidad de falla, lo que permite una evaluación más consistente de la estabilidad. Es claro que la del índice de confiabilidad solo es válida si la distribución de probabilidad del factor de seguridad es normal, lo cual implica que las distribuciones de la resistencia del suelo o de la roca y de las cargas aplicadas también lo sean.

La probabilidad de falla está dada por la porción del área bajo la curva unitaria de distribución de frecuencia (función densidad de probabilidad) del  $FS$  correspondientes a los valores de  $FS$  inferiores a 1.0. Esta se puede determinar de cualquier tabla de función de distribución de probabilidades normal con media 0 y desviación estándar 1 o utilizando herramientas computacionales.

En la Tabla 7 se presentan las probabilidades de falla para diferentes valores de  $\beta$  determinadas considerando una distribución normal y comparada con los resultados de distribuciones como la lognormal y la triangular. En la Figura 20 se ilustra la variación de la probabilidad de falla en función del índice de confiabilidad. Se observa que la distribución normal arroja siempre valores de probabilidad mayores que las otras, por lo cual su uso resulta por el lado de la seguridad.

Índice de Confiabilidad ( $\beta$ )	Probabilidad de Falla				
	Distribución Normal	Distribución Triangular	Distribución LogNormal		
			$\Omega = 0.05$	$\Omega = 0.10$	$\Omega = 0.15$
0.0	$5.000 \times 10^{-1}$	$5.000 \times 10^{-1}$	$5.100 \times 10^{-1}$	$5.199 \times 10^{-1}$	$5.297 \times 10^{-1}$
0.5	$3.085 \times 10^{-1}$	$3.167 \times 10^{-1}$	$3.150 \times 10^{-1}$	$3.212 \times 10^{-1}$	$3.271 \times 10^{-1}$
1.0	$1.586 \times 10^{-1}$	$1.751 \times 10^{-1}$	$1.583 \times 10^{-1}$	$1.571 \times 10^{-1}$	$1.551 \times 10^{-1}$
1.5	$6.681 \times 10^{-2}$	$7.513 \times 10^{-2}$	$6.236 \times 10^{-2}$	$5.713 \times 10^{-2}$	$5.111 \times 10^{-2}$
2.0	$2.275 \times 10^{-2}$	$1.684 \times 10^{-2}$	$1.860 \times 10^{-2}$	$1.437 \times 10^{-2}$	$1.026 \times 10^{-2}$
2.5	$6.210 \times 10^{-3}$	0.0	$4.057 \times 10^{-3}$	$2.298 \times 10^{-3}$	$1.048 \times 10^{-3}$
3.0	$1.350 \times 10^{-3}$	0.0	$6.246 \times 10^{-4}$	$2.111 \times 10^{-4}$	$4.190 \times 10^{-5}$
3.5	$2.326 \times 10^{-4}$	0.0	$6.542 \times 10^{-5}$	$9.831 \times 10^{-6}$	$4.415 \times 10^{-7}$
4.0	$3.167 \times 10^{-5}$	0.0	$4.484 \times 10^{-6}$	$1.977 \times 10^{-7}$	$6.469 \times 10^{-10}$
4.5	$3.398 \times 10^{-6}$	0.0	$1.927 \times 10^{-7}$	$1.396 \times 10^{-9}$	$4.319 \times 10^{-14}$
5.0	$2.867 \times 10^{-7}$	0.0	$4.955 \times 10^{-9}$	$2.621 \times 10^{-12}$	

$\Omega = \text{COV} = \text{Coeficiente de variación.}$

Tabla 7. Probabilidad de falla para varios valores del índice de confiabilidad y para varias distribuciones de probabilidad  
Fuente: Adaptación de Baecher y Christian (2003)

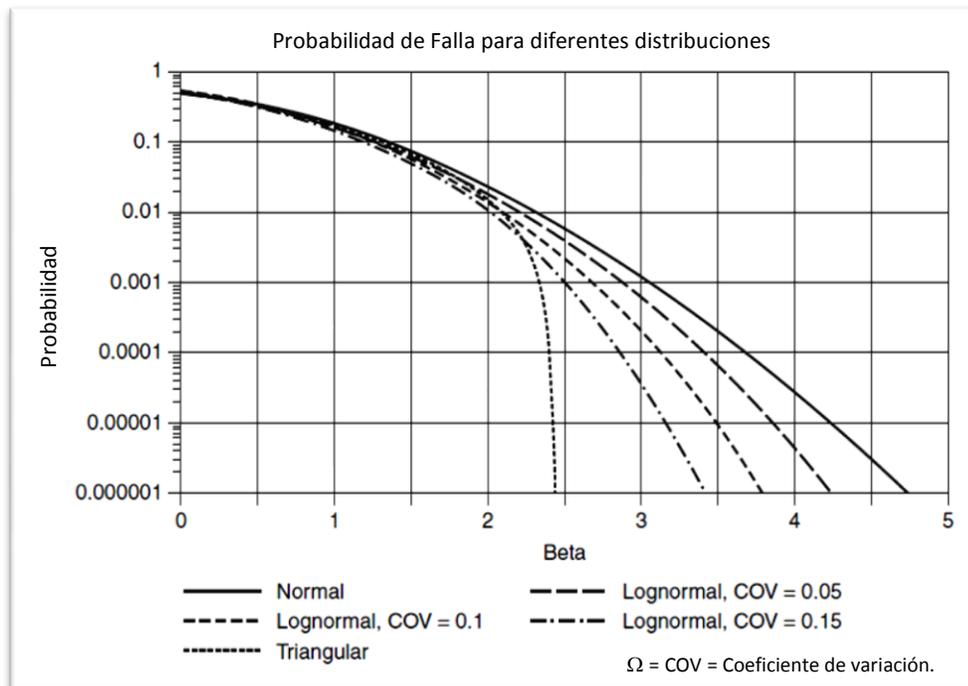


Figura 20. Probabilidad de falla versus índice de confiabilidad para varias distribuciones de probabilidad  
Fuente: Adaptación de Baecher y Christian (2003)

### 7.3. Consideración del efecto de la lluvia como detonante del deslizamiento de laderas

Varios fenómenos se involucran en lo concerniente a la remoción o movimientos de masa, entre los cuales se destacan la geología, la geomorfología, la mecánica de suelos, la hidrología entre otros. Uno de los factores condicionantes corresponde al factor hidrológico, ya que un alto porcentaje de estos movimientos son desencadenados por intensas o continuas precipitaciones. Aristizábal *et al.* (2010) afirman que de cada diez eventos de movimiento de masa que se presentan en el Valle de Aburrá, ocho son de origen hidrometeorológico.

Son relativamente pocos los estudios acerca de la precipitación como factor detonante de los movimientos en masa en el Valle de Aburrá, y muchos menos en lo referente a la causa sísmica como detonante de dichos movimientos, siendo esta última el objeto de la presente investigación, razón por la cual el tema del efecto lluvia y la saturación correspondiente del suelo, se tratará de una manera práctica y sin ser muy exhaustivos en el tema, pero considerando su efecto como uno de los componentes de la probabilidad de falla de los taludes analizados. Esta propuesta se encuentra sustentada en Hidalgo (2012).

El modelo físico de evaluación de la estabilidad de taludes implementado mediante la metodología propuesta por Newmark, hasta ahora ha considerado la ocurrencia de movimientos de masa suponiendo dos situaciones. La primera situación corresponde al caso en el cual el terreno se encuentra húmedo pero sin agua libre en la zona de falla, y la otra situación corresponde al caso en el cual se considera la presencia de agua libre a una profundidad de 5 m que afecta la zona de falla, denominada condición saturada.

En los capítulos anteriores se ha considerado la ocurrencia de movimientos de masa bajo dos situaciones como se mencionó anteriormente, pero hasta ahora no se ha considerado que la eventual condición de saturación del suelo sea un fenómeno aleatorio que se debe tener en cuenta en la evaluación de la probabilidad de remoción en masa, es decir, se debe considerar la probabilidad de que el suelo este saturado o no. Por ello, es importante incorporar la lluvia como un factor detonante más y considerar que la cantidad de agua presente en el suelo está relacionada con las precipitaciones inmediatas (anteriores) y acumuladas (precedentes) a la fecha de ocurrencia de un deslizamiento producto del evento sísmico.

Se define la probabilidad de falla total de un talud, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_{ft} = P_{fs} * P_s + P_{fns} * (1 - P_s) \quad \text{Ec. 26} \quad (\text{Hidalgo 2012})$$

En la cual  $P_{ft}$  corresponde a la probabilidad de falla total,  $P_{fs}$  es la probabilidad de falla del talud debido a la acción del sismo en condición saturada,  $P_{fns}$  es la probabilidad de falla del talud debido a la acción del sismo en condición no saturada,  $P_s$  es la probabilidad marginal de que el suelo esté saturado y  $(1-P_s)$  es la probabilidad marginal de que el suelo no esté saturado.

Se requiere conocer la probabilidad marginal de que el suelo esté saturado, lo cual es difícil de determinar debido a la complejidad del fenómeno de variación de las condiciones de humedad del

suelo, en especial en el caso de los suelos del Valle de Aburrá, puesto que existe poca o nula información que permita determinar la probabilidad de que el suelo esté saturado.

Para la determinación de cada una de las dos situaciones mencionadas, es necesario tener en cuenta la relación existente entre la lluvia y el movimiento en masa, mediante la consideración de umbrales de lluvia críticos. Dicha consideración de umbrales críticos de lluvia, combinados con las series históricas de precipitación de varias estaciones pluviométricas localizadas dentro y fuera del área de estudio, permiten una aproximación práctica de la probabilidad de saturación del suelo bajo efectos de la lluvia.

De acuerdo a Aristizábal *et al.* (2010), los umbrales se definen como el mínimo o máximo nivel crítico de lluvia, para que un proceso ocurra, en este caso la saturación del suelo. Los parámetros investigados más comunes son la lluvia total o acumulada, la lluvia antecedente (preevento) y duración e intensidad de lluvia, o la combinación de estos. Partiendo de dicha información, los umbrales y parámetros considerados para este estudio corresponden a la lluvia acumulada precedente de 15 días y la lluvia acumulada antecedente de 3 días.

Las lluvias antecedentes relacionadas a un evento de un movimiento en masa, se caracterizan por tener una mayor frecuencia aunque una menor intensidad, lo que genera una mayor disposición del suelo a la infiltración de agua, generando la formación de humedad en el suelo, que se acumula a medida que aumenta la frecuencia de la lluvia; lo anterior tiene como efecto la elevación de las presiones de poros en el suelo y la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante, generando inestabilidad.

La metodología adoptada para la evaluación de la probabilidad de que el suelo se sature por efecto de la lluvia consiste en una primera instancia en la adopción de la ecuación expuesta en Aristizábal *et al.* (2010), la cual considera la existencia de cuatro regiones representativas de lluvia antecedente para movimientos en masa denominadas regiones A, B, C, y D, como se puede apreciar en la Figura 21. Esta metodología es la misma adoptada en el Sistema de Alerta Temprana del Área Metropolitana (SIATA) propuesta para el Valle de Aburrá.

La ecuación que define la frontera entre la región A, establecida como umbral de saturación, y las demás regiones corresponde a:

$$I_3 = 70 - 0.47I_{15} \quad \text{Ec. 27} \quad (\text{Aristizábal et al. 2010})$$

Donde  $I_3$  corresponde a la lluvia acumulada antecedente de 3 días [mm], y  $I_{15}$  corresponde a la lluvia acumulada precedente de 15 días [mm].

Para este caso se considera que la condición dada por el umbral de falla representa una situación de saturación propicia para los movimientos de masa, en este trabajo se considera que la probabilidad de saturación del suelo está relacionada con la probabilidad de que el umbral de falla sea excedido.

Este tipo de análisis ha sido usado anteriormente por Restrepo *et al.* (2005) quienes consideraron que la probabilidad de que el suelo estuviese saturado está dada por la probabilidad de que se exceda la duración de la lluvia crítica determinada por Castellanos (1996).

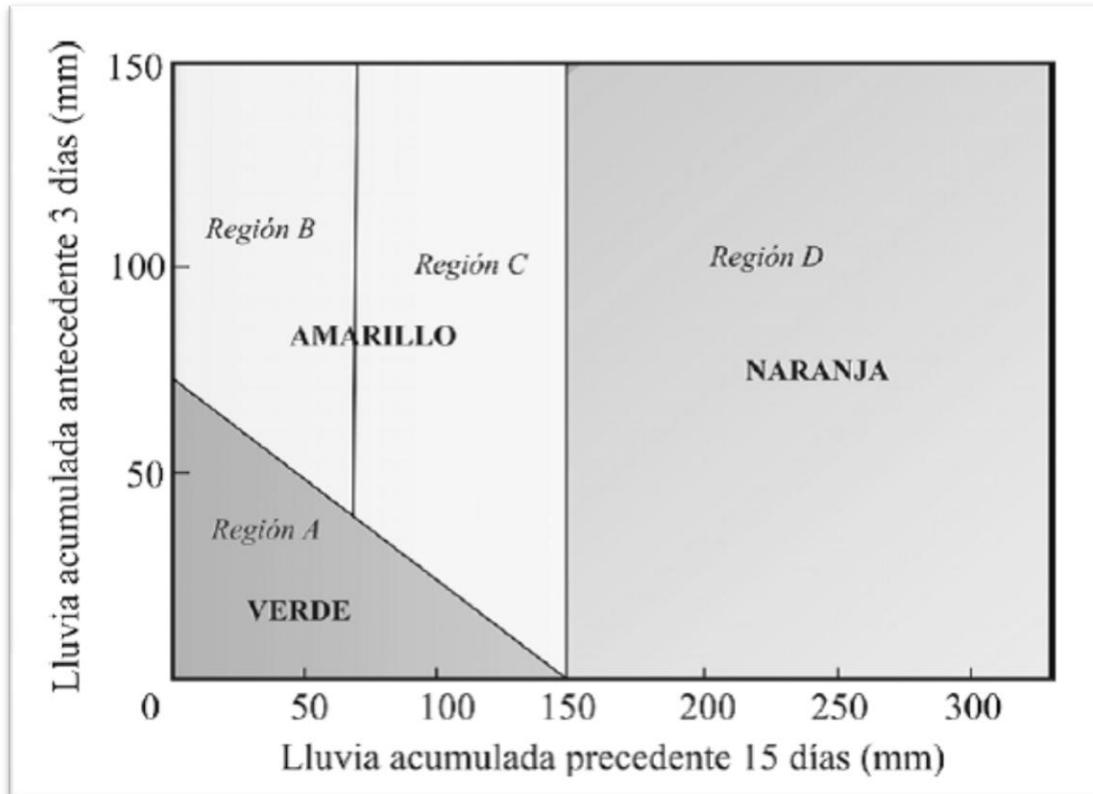


Figura 21 . Regiones representativas de lluvia para movimientos en masa  
Fuente: Aristizábal *et al.* (2010)

Restrepo *et al.* (2005), calcularon la probabilidad de saturación como la probabilidad marginal dada por la ecuación 28.

$$P_s = \frac{D}{365 T_r} \quad \text{Ec. 28} \quad (\text{Restrepo et al. 2005})$$

$$D = 3.2829(LL_{cr})^{0.4157} \quad \text{Ec. 29} \quad (\text{Restrepo et al. 2005})$$

$$LL_{cr} = 51.42 + 0.4035LL_{an} \quad \text{Ec. 30} \quad (\text{Restrepo et al. 2005})$$

Donde  $P_s$  corresponde a la probabilidad de saturación,  $D$  es la duración de la lluvia crítica medida en [días],  $T_r$  es el periodo de retorno [años] de la lluvia crítica determinado a partir de una curva de masas de lluvias con la duración crítica. La lluvia crítica ( $LL_{cr}$ ) se adoptó en función de la lluvia anual ( $LL_{an}$ ) de acuerdo con la ecuación 30. Tanto  $LL_{cr}$  como  $LL_{an}$  están medidas en [mm].

La segunda instancia adoptada para la evaluación de la probabilidad de que el suelo se sature por efecto de la lluvia radica en la consideración cuantitativa de la precipitación con base en los registros históricos de precipitación de varias estaciones pluviométricas dentro y fuera del área de estudio.

La información pluviométrica obtenida corresponde a los registros históricos de precipitación correspondientes a 40 años, tanto de lluvia acumulada precedente de 15 días como de la lluvia acumulada antecedente de 3 días.

Las estaciones pluviométricas de las cuales se obtuvieron las series históricas de precipitación se detallan en la Tabla 8. Estaciones pluviométricas empleadas para la consideración de la variable lluvia.

Nombre	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
LA IGUANA	6,0° 18,0'	75,0° 39,0'
LA CUCHILLA	6,0° 22,0'	75,0° 27,0'
ASTILLEROS	6,0° 15,0'	75,0° 40,0'
TULIO OSPINA	6,0° 19,0'	75,0° 33,0'
PIEDRAS BLANCAS	6,0° 18,0'	75,0° 30,0'
HDA EL PROGRESO	6,0° 24,0'	75,0° 23,0'
LA SALADA	6,0° 2,0'	75,0° 37,0'
BOQUERON	6,0° 21,0'	75,0° 41,0'
LA MESETA SAN PEDRO	6,0° 23,0'	75,0° 36,0'
SANTA ELENA	6,0° 11,0'	75,0° 31,0'

**Tabla 8. Estaciones pluviométricas empleadas para la consideración de la variable lluvia.**

Fuente: Elaboración propia. Datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Considerando los valores de precipitación de cada serie histórica y evaluándolos en la ecuación 27, es posible verificar si el valor obtenido excede o no el valor umbral de saturación considerado, correspondiente a la región A ilustrada en la Figura 21.

En el caso tratado por Restrepo *et al.* (2005) se calculó la probabilidad de que fuera excedida la lluvia crítica anual, pero en el caso tratado en el presente trabajo se calculó la probabilidad de saturación como la probabilidad de que el par ordenado ( $ll_{15}$ ,  $ll_3$ ), correspondiente a la lluvia acumulada de 15 y 3 días respectivamente, esté por encima de la recta que define el umbral de falla establecido, de acuerdo a la propuesta de Hidalgo (2012). Por tanto, se considera que el suelo estará saturado si se cumple la relación de la ecuación 31:

$$ll_{3m} \geq ll_3 \quad \text{Ec. 31} \quad (\text{Hidalgo 2012})$$

Donde  $ll_{3m}$  es la lluvia acumulada de 3 días calculada a partir de los registros de los pluviómetros y  $ll_3$  es la lluvia acumulada de 3 días calculada con la ecuación 27.

Para cada estación pluviométrica se organizaron los registros de las series de precipitación, se calcularon las ventanas móviles de lluvia acumulada de 15 días y 3 días para cada fecha. Igualmente para cada fecha se calculó el valor de lluvia de 3 días usando el umbral definido en la ecuación 27 y se estableció la comparación entre los valores de lluvia de 3 días como se indica en la ecuación 31.

Para organizar los registros se genera una nueva serie de precipitación mediante la suma de la precipitación de 3 días consecutivos, comenzando por el primer registro de la serie original. La Figura 22 ilustra este procedimiento. El primer valor de la serie nueva corresponde a la precipitación acumulada de los tres días antecedentes, de igual forma se calcula el segundo valor de la serie y así sucesivamente hasta el último registro de la serie original. Cuando aparecen días sin información, situación común en

las series originales, se descarta la sumatoria correspondiente. De manera similar se construyó la serie de precipitación precedente o de 15 días.

DIA	1	2	3	4	5	....	N-2	N-1	N
PRECIPITACIÓN		$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	....	$\Sigma$		
	25	15	34	12	10	....	55	4	12
ANTECEDENTE (3 DIAS)			74	61	56	....			71

Figura 22 . Esquema de cálculo de las ventanas móviles de lluvia

Fuente: Aristizábal *et al.* (2010)

Se determina el número de veces que el umbral es excedido durante el periodo de registros analizados y este número de ocurrencias se divide por el número total de registros de lluvia para establecer la probabilidad de que el umbral fuese excedido, lo que para este caso significa que el suelo alcanza la condición de saturación crítica.

Es importante destacar que mediante esta metodología, solo se logra obtener la probabilidad puntual de saturación del suelo por efecto lluvia en cada estación pluviométrica, razón por la cual es necesario aplicar algún método geoestadístico de interpolación, con el fin de distribuir espacialmente la probabilidad de saturación del suelo obtenida dentro de toda el área de estudio, tal como lo plantea Hidalgo (2012).

### 7.3.1. Análisis geoestadístico de los valores de probabilidad de saturación del suelo

Para el estudio de variables regionalizadas en un espacio geográfico se utilizan diversos procedimientos geoestadísticos de estimación y simulación, de tal manera que a partir de un conjunto de muestras tomadas en una determinada zona de estudio, que a su vez pueden ser consideradas como una buena representación de la realidad, permiten la descripción o caracterización de las variables con el fin de proporcionar valores estimados en puntos de interés, y que además permitan generar valores que presenten características similares en cuanto a la dispersión de los datos originales.

El método de interpolación empleado en el desarrollo de este trabajo corresponde al método de Kriging ordinario, el cual corresponde a un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de semivariograma para la obtención de datos.

El método de Kriging calcula los pesos que se darán a cada punto de referencia usado en la valoración, en este caso el valor de probabilidad de saturación del suelo obtenido para cada estación, para generar un modelo continuo de valores de probabilidad de saturación del suelo dentro del área de estudio. El resultado de dicha operación se ilustra en la Figura 23.

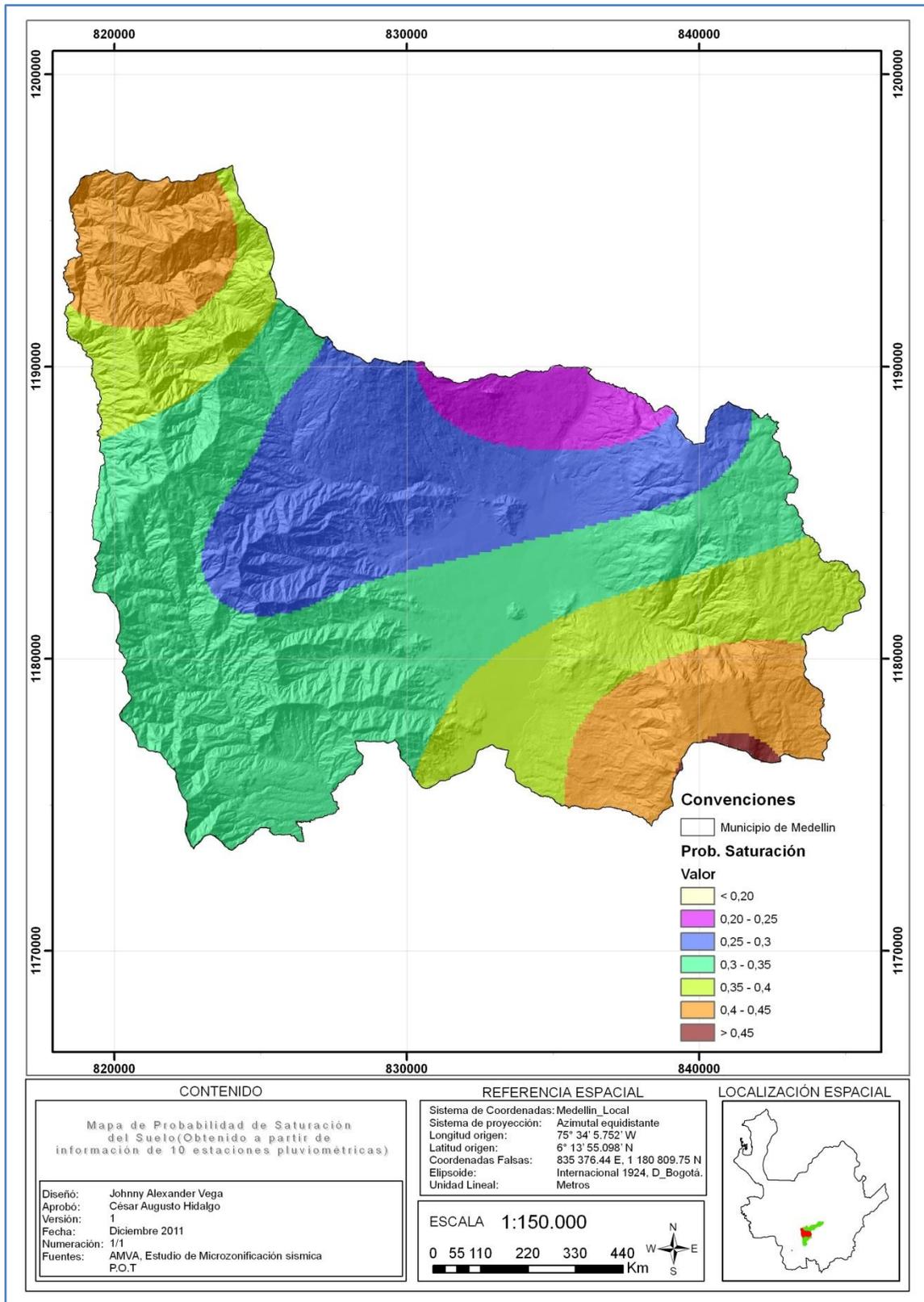


Figura 23 . Probabilidad de saturación del suelo obtenido por el método de Kriging  
 Fuente: Elaboración propia

#### 7.4. Modelos de evaluación de la vulnerabilidad

En lo concerniente al tema de la vulnerabilidad, varios acercamientos han sido desarrollados para su análisis. Botero (2009) trata los aportes de varios autores en lo referente a este tema, entre los que se consideran varios marcos conceptuales desarrollados a partir de diferentes enfoques, los cuales se describen brevemente a continuación.

Uno de estos enfoques corresponde al modelo RH (Risk Hazard) propuesto por Turner *et al.* (2003), que explica el impacto de una amenaza como una función de la exposición de dicho sistema y su respuesta ante las amenazas consideradas.

Este modelo describe detalladamente los factores que componen la vulnerabilidad, donde el primer factor corresponde a la exposición, la cual está relacionada con los componentes físicos del sistema y las características de la amenaza. El segundo factor corresponde a la sensibilidad, relacionada con los componentes humanos en el sentido social, económico, cultural, entre otros, y por último considera el factor de resiliencia, asociado a la respuesta del sistema y a su grado de recuperación.

El modelo propuesto por Pelling (2003), define la vulnerabilidad humana como el resultado de la exposición, la resistencia y la resiliencia. Este modelo es muy similar al modelo RH, si se asocia el concepto de resistencia con el concepto de sensibilidad.

Otro modelo de vulnerabilidad como el modelo PAR, trata el tema como una serie de niveles de factores sociales y procesos de diversa índole que juntos conllevan a condiciones de inseguridad, configurando una cadena de causas o progresión de la vulnerabilidad.

El Instituto para el Ambiente y la Seguridad Humana (UNU-EHS) desarrolló dos marcos o modelos para tratar el tema de la vulnerabilidad, conocidos como Onion Framework y BBC Conceptual framework, en los cuales se abarca el tema desde una interrelación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, desde varias esferas como la económica, la social y la ambiental.

Los modelos enunciados anteriormente constituyen una base para la explicación de la vulnerabilidad, aunque no necesariamente para su medición directa, pero han permitido desarrollar metodologías para la medición de diferentes parámetros que se requieren en la conceptualización de la vulnerabilidad.

En general, todos los modelos tienen en mayor o menor medida aspectos en común, como por ejemplo los elementos en riesgo definidos en algunos modelos como exposición y las capacidades y condiciones inherentes a la sociedad, definidos en algunos modelos como sensibilidad, resistencia y resiliencia.

El conocimiento de los diferentes factores permiten identificar el uso de los mismos en diferentes etapas de la evaluación, prevención y tratamiento de desastres, puesto que el adecuado conocimiento de la resistencia de un sistema ante un evento que se considera potencialmente nocivo, permite una adecuada preparación y mitigación de su impacto en términos de la identificación de la población que se verá afectada al ocurrir un evento catastrófico, y el adecuado conocimiento de la exposición de los elementos expuestos ante una posible amenaza. Además, permite la implementación de normativas o programas de control o de alerta temprana, para contrarrestar las deficiencias físicas de los elementos

expuestos de la infraestructura urbana como por ejemplo las edificaciones, las redes de transporte y comunicaciones, sistemas de servicios públicos, entre otras.

A pesar de que la vulnerabilidad puede ser tratada desde diferentes enfoques (social, económica, cultural, política, etc.), en el desarrollo de este trabajo solo se considerará lo concerniente a la vulnerabilidad física de elementos de la infraestructura urbana, como lo son viviendas ubicadas en las comunas populares de la ciudad adoptadas como prueba piloto, desde una perspectiva práctica a partir de la información catastral vigente.

#### 7.4.1. Vulnerabilidad física de edificaciones

Al igual que en muchas ciudades de Latinoamérica, en Colombia los desarrollos urbanos dentro de las esferas urbanas se han diseminado de manera desordenada y sin planificación alguna, en algunas regiones de manera caótica, pues se originan de las necesidades básicas de vivienda de sus habitantes.

Por ende, es pertinente y fundamental desarrollar un estudio de la vulnerabilidad de estas zonas de asentamientos irregulares ante amenazas naturales como lo son deslizamientos de masas y movimientos tectónicos, que permitan clarificar y cuantificar el nivel de riesgo al que se encuentran expuestas. Para ello, es importante aplicar una metodología que sea consecuente con las características propias del tipo de desarrollo de estas poblaciones, por lo que es importante construir o aplicar modelos propios o locales.

A pesar de que generalmente la vulnerabilidad de un elemento está relacionada con un evento desastroso y con el daño esperado por su ocurrencia, conviene entender la vulnerabilidad como una característica intrínseca del elemento expuesto, puesto que depende únicamente de sus características de diseño y construcción.

En este sentido se puede afirmar que cada estructura (o tipo de estructura), independientemente de la peligrosidad del lugar donde se halla, se puede caracterizar mediante un parámetro o función que cuantifica su capacidad resistente, la cual depende sólo de sus características. (Lantada 2007)

##### 7.4.1.1. Indicadores de la vulnerabilidad física

El nivel o grado de daño que pueden sufrir las edificaciones del área de estudio sometidas a una determinada fuerza natural, se puede obtener mediante diferentes procedimientos, bien sea por medio de matrices de probabilidad de daño, de funciones de vulnerabilidad o por medio de índices o indicadores. Los métodos utilizados difieren básicamente en los datos de entrada y en la forma como se obtienen las probabilidades asociadas a cada estado de daño.

De acuerdo a la información con la que se cuente es posible emplear uno u otro método, o también es posible emplear una combinación de los mismos para lograr un mejor ajuste a la realidad física de la zona de estudio.

Con la modelación de las características estructurales de las edificaciones, las cuales definen su respuesta ante la acción de una fuerza natural, y mediante la estimación del grado de vulnerabilidad propuesto por expertos a cada uno de los parámetros del modelo de vulnerabilidad, es posible determinar el grado o propensión de vulnerabilidad expresado en términos de la probabilidad de que las edificaciones sufriesen daño o falla, dado que se produjo con antelación un deslizamiento de masas de tierra accionado por un evento sísmico.

Cabe anotar, que es preciso modelar también la probabilidad de daño de la edificación durante el evento sísmico, puesto que no solo se puede presentar daño luego del movimiento telúrico, sino también por los efectos ocasionados durante el evento.

Lantada (2007) trata algunos métodos para la evaluación de la vulnerabilidad como lo son las Escalas Macrosísmicas, el Método Italiano y el Método del Índice de Vulnerabilidad, los cuales definen la acción sísmica mediante la intensidad macrosísmica, y el elemento expuesto mediante un sólo parámetro que puede ser una clase alfanumérica o una cantidad numérica.

La escala Medvedev-Sponheuer-Karnik, también conocida como escala MSK-64, es una escala de intensidad macrosísmica que es empleada para la evaluación de la fuerza de los movimientos de tierra con base en los efectos destructivos en las edificaciones y en el cambio de aspecto del terreno, y que a su vez tiene en cuenta el grado de afectación a la población.

Lantada (2007) define la escala MSK-64 como precursora del concepto de vulnerabilidad, a pesar de que no habla de vulnerabilidad pero clasifica los edificios con base a sus características resistentes, cuyas categorías de mayor a menor vulnerabilidad son: edificaciones de muros en mampostería rústica, mampostería en ladrillo y bloques, y por últimos considera las edificaciones en hormigón armado y en estructura metálica.

La escala MSK-64 revisada y actualizada mediante la Escala Macrosísmica Europea, dio lugar a una versión preliminar en 1992 conocida como EMS-92, que se publicó en forma definitiva en 1998 como EMS-98, en la cual se incorporaron algunas sugerencias de la comunidad sismológica internacional. La Escala EMS-98 mantiene la clasificación de los edificios pero incorpora de forma explícita el concepto de vulnerabilidad. Esta nueva escala realiza una mayor discretización de los materiales que componen el sistema estructural y los rangos de vulnerabilidad más probables durante su desempeño ante un evento sísmico.

Por su parte, la propuesta de Benedetti y Petrini (1984), también conocida como el Método Italiano, define la vulnerabilidad de un edificio mediante un índice de vulnerabilidad  $I_v$ , obtenido a partir de la evaluación y ponderación de diferentes parámetros relacionados con sus componentes estructurales y no estructurales ( $K_i$ ). Básicamente el método consiste en la evaluación de once parámetros a partir de trabajo de campo. Éstos parámetros corresponden al sistema resistente de la edificación, su calidad, su resistencia, la posición, presencia de diafragmas horizontales, configuración en planta, configuración en elevación, separación entre muros, tipo de cubierta, elementos no estructurales y al estado de conservación de la edificación.

En este método, las categorías van respectivamente desde condiciones favorables a desfavorables y su evaluación permite asignar un valor numérico  $K_i$  a cada parámetro evaluado. El índice de vulnerabilidad  $I_V$  es obtenido mediante la suma ponderada del producto de todos los factores considerados ( $K_i$ ) con su respectivo peso específico ( $W_i$ ). Cuanto mayor es el índice de vulnerabilidad peor es la capacidad resistente del edificio.

Este tipo de métodos tienen la posibilidad de considerar la opinión de expertos para la evaluación de los parámetros, de manera que permite adaptar la metodología a diferentes entornos urbanos.

La ecuación del  $I_V$  puede normalizarse para obtener índices en el rango entre cero (nada vulnerable) y uno (nada resistente), mediante la expresión:

$$I_V = \frac{(\sum_{i=1}^n K_i \cdot W_i) + 1}{N} \quad \text{Ec. 32} \quad (\text{Adaptada de Lantada 2007})$$

donde  $n$  corresponde al número de parámetros relacionados con componentes estructurales y no estructurales considerados en el análisis, y  $N$  corresponde al máximo valor de  $I_V$  que desea normalizarse en un rango entre 0 y 1.

Mediante una especie de combinación de los anteriores métodos explicados Lantada (2007) describe ampliamente un método denominado Método del Índice de Vulnerabilidad (*MIV*), desarrollado en la Universidad de Génova, que parte de las clases de vulnerabilidad definidas en la EMS-98 y, al igual que el Método Italiano, cuantifica cada edificio particular mediante un índice de vulnerabilidad. Este índice varía entre 0 y 1, siendo más cercano a 1 cuanto más vulnerable es el edificio.

Se trata de un método cuya principal ventaja reside en la facilidad para describir la vulnerabilidad de los edificios, con un gran nivel de detalle, y que permite captar, además de sus calidades estructurales, aquellas que se derivan de su geometría en planta, en altura y de su posición. El principal inconveniente reside en su calibración. La aplicación a zonas de sismicidad moderada o baja se fundamenta en funciones de daño calibradas en zonas de alta frecuencia de catástrofes sísmicas.

El método considera funciones de pertenencia para cada una de las seis clases de vulnerabilidad establecidas en la EMS-98, que se definen mediante el uso de la lógica difusa, con funciones de pertenencia definidas mediante unos rangos plausibles y unos rangos posibles que definen la transición entre dos clases de vulnerabilidad adyacentes.

De esta manera, para cada edificio, además de diferentes valores probables de vulnerabilidad, el método contempla rangos de índices posibles y de índices menos probables.

Este método no se considera dentro del alcance del presente trabajo de investigación, y su tratamiento es meramente descriptivo, pues para la estimación de la vulnerabilidad se optó por el uso de técnicas basadas en opinión de expertos, combinadas con procesos analíticos, como el método de escala macrosísmica o el método italiano, y adaptaciones de los mismos.

### 7.5. Desarrollo metodológico adoptado para evaluar la vulnerabilidad

La metodología propuesta para el abordaje del tema de la vulnerabilidad, tiene en cuenta lo establecido por Maldonado *et al.* (2008), en la cual se considera la definición del nivel de daño de la edificación, a partir un índice de vulnerabilidad, el cual se basa en la calificación de once parámetros, tal cual se trató en Lantada (2007) en lo referente a la evaluación de los índices de vulnerabilidad y cuyos once parámetros se señalan en la Figura 24. El concepto de este índice y esta metodología, han sido incorporados en la estimación de la vulnerabilidad en países como España, Ecuador y Venezuela.

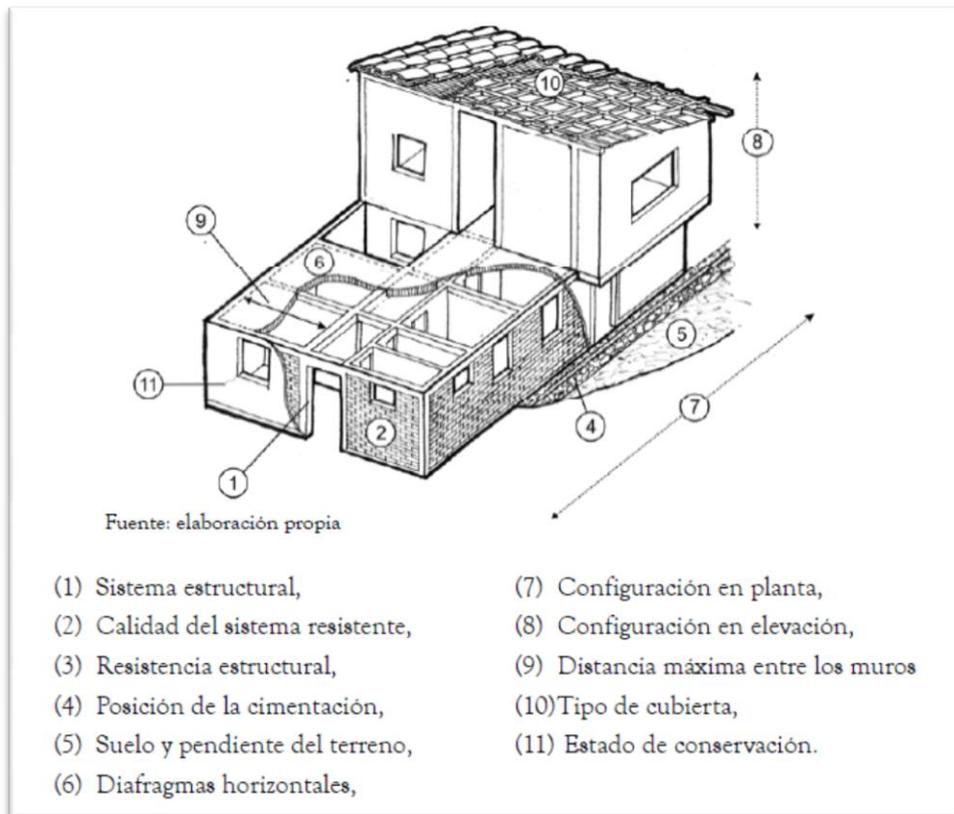


Figura 24. Parámetros en la estimación del índice de vulnerabilidad sísmica.

Fuente: Maldonado *et al.* (2008)

De igual modo, la metodología propuesta por Botero (2009), tiene en cuenta diferentes indicadores o atributos que son estandarizados para asegurar el mismo sistema de medida, de modo que se normalizan con una función lineal entre los valores absolutos más bajos y los valores absolutos más altos.

Esta metodología tiene en cuenta la fragilidad del sistema estructural de las edificaciones para atender las sollicitaciones de un evento sísmico, el cual refleja la interacción entre el tipo de estructura y algunas de sus características como el material, su estado de conservación y la altura de la edificación. Para ello, hace uso de la información suministrada por la Subsecretaría de Catastro Municipal, empleando Cuatro (4) atributos del sistema estructural de las viviendas: La edad o vetustez de la edificación, su estado de conservación, el número de niveles de piso de la edificación y el tipo de sistema estructural.

Una vez procesados los atributos, el indicador puede ser calculado mediante el uso de árboles de eventos, los cuales permiten asignar a cada variable un valor y a todas las combinaciones, para llegar a un valor final que indica cuán frágil o susceptible a daño es cada edificación. Posteriormente el índice es ponderado de acuerdo a un peso asignado con los demás indicadores y demás tipos de vulnerabilidades consideradas.

Ambas metodologías coinciden en la necesidad de valores o conceptos basados en la opinión de expertos.

Es preciso resaltar que existen dos posibles escenarios en lo referente a los daños potenciales que puede generar un deslizamiento de masa deflagrado por un evento sísmico. En primera instancia, puede presentarse el caso en cual los elementos expuestos a la amenaza, en este caso las viviendas, estén directamente asentadas sobre el bloque o masa de suelo deslizante, y por otro lado, es igualmente probable que las viviendas no estén directamente sobre el bloque de suelo que se desliza, pero que puedan ser afectadas por algún tipo de deslizamiento como los que se ilustran en la Figura 7, lo que genera que su análisis presente leves diferencias en la consideración de las condiciones de favorabilidad desde el punto de vista del comportamiento de la estructura ante el evento sísmico. En la Figura 25 se pueden apreciar ambos escenarios.

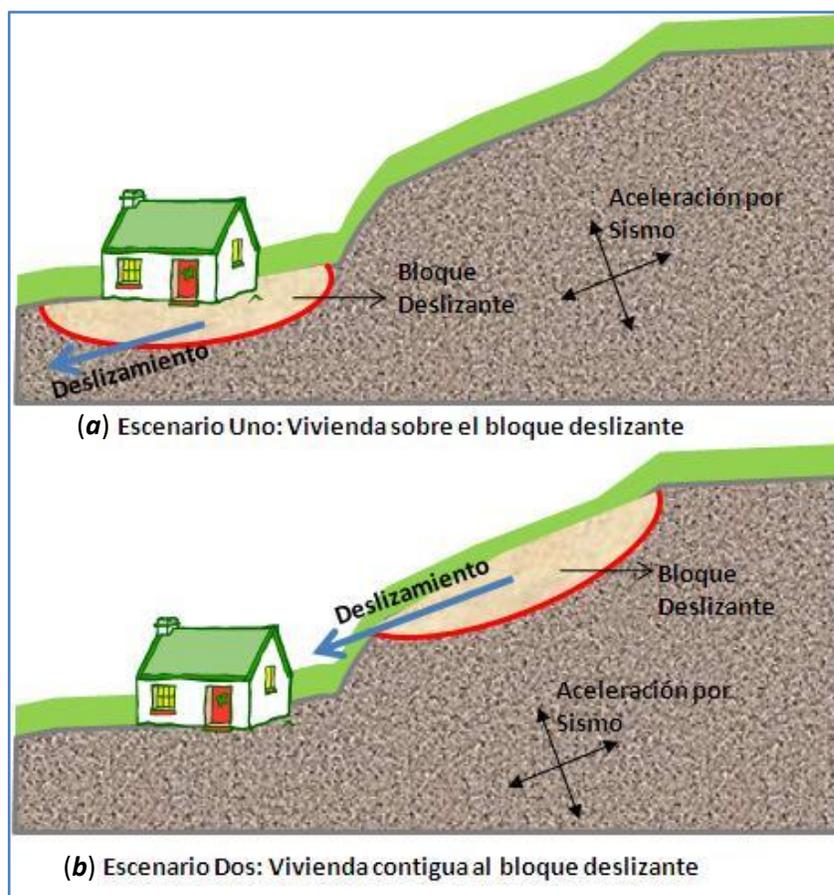


Figura 25. Escenarios de análisis de la vulnerabilidad

Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo del presente trabajo se consideró el primer escenario ilustrado en la Figura 25, bajo el cual la estructura puede llegar a sufrir las condiciones más adversas, y su base metodológica radica en una modificación de la propuesta planteada por Botero (2009), la cual trata la vulnerabilidad desde diferentes tipos o clasificaciones, a partir de indicadores en tres fases diferentes del evento o desastre natural, empleando información relevada por entidades gubernamentales, como la Subsecretaría de Catastro, el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), el Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres (SIMPAD), entre otros, con la combinación de algunos conceptos relevantes de la propuesta de Maldonado *et al.* (2008).

De ambas metodologías se tomó en cuenta como factor o atributo a evaluar, algunos de los puntos en común, los cuales corresponden a:

- Tipo de sistema estructural.
- El estado de conservación de la estructura.
- Configuración en elevación, el cual se homologará como el número de niveles de piso de la edificación.

Adicionalmente se consideraron los factores:

- Tipo de cubierta.
- La edad o vetustez de la edificación.

Los cinco (5) factores mencionados, se obtuvieron de la base de datos suministrada por la Subsecretaría de Catastro Municipal para el desarrollo de la investigación.

La metodología propuesta para la estimación del nivel de vulnerabilidad de esta investigación tiene por objeto estimar el desempeño promedio previsible de distintos tipos de edificaciones, según la zona en que se encuentren, bajo los factores y el escenario mencionados anteriormente, aunque se resalta que el desempeño preciso de una determinada edificación depende de muchas más variables, como lo describe FUNVISIS (2011), las cuales incluyen la estructuración, la presencia o no de irregularidades, el nivel de redundancia estructural, la disposición de los elementos no estructurales, la precisión de los cálculos del proyecto, el relativo cumplimiento de las disposiciones de detalle estructural, el nivel de inspección y control de la construcción e incluso el grado de mantenimiento existente.

Se pretende estimar las situaciones promedio previsibles, fundamentalmente en sentido comparativo entre los sistemas estructurales encontrados y estudiados en la zona. Es decir, el objeto es determinar en la zona estudiada cuáles edificaciones son en promedio más susceptibles o propensas a daños, en función de las variables de análisis.

Es importante resaltar que las evaluaciones se efectúan en el marco de las disposiciones de la norma sísmica nacional vigente, la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS 2010).

El punto de partida para la estimación del índice de vulnerabilidad consiste en la adquisición de la base de datos cartográfica de todos los predios correspondientes al sector nororiental de la ciudad de Medellín, y a un archivo plano con la información alfanumérica correspondiente a las características

puntuales de cada predio, con lo cual es posible conformar una única base de datos espacial, que permita realizar todas las operaciones de geoprocésamiento y análisis de los resultados.

El procesamiento del archivo plano, implica que se debe obtener un único registro que agrupe las condiciones menos favorables desde el punto de vista de la vulnerabilidad, de acuerdo al factor o atributo a tratar por cada parcela. Esto se debe a que generalmente para un solo objeto geográfico tipo parcela, pueden existir varios registros en el archivo plano alfanumérico, debido a diferenciaciones de usos, tipos y diferencias de estructuras o acabados dentro de una misma edificación.

Para el factor “Tipo de estructura” se consideró como menos favorable, aquellos valores correspondientes a estructuras en Madera, es decir, el valor mínimo, por ser las estructuras más frágiles.

Para el factor “Estado de conservación” se consideró como menos favorable, una conservación Mala, es decir, el valor mínimo, ya que representa la condición menos favorable y el peor escenario.

Para el factor “Niveles de piso” se consideró como menos favorable, el valor máximo, ya que corresponde a la condición menos favorable desde el punto de vista de la fragilidad bajo el escenario de análisis descrito con anterioridad (ver Figura 25a).

Para el factor “Tipo de cubierta” se consideró como menos favorable, las cubiertas de Materiales de desecho, es decir, el valor mínimo que corresponde a la condición menos favorable, y no cumple las funciones de diafragma como por ejemplo una cubierta en losa de entrepiso en concreto.

Para el factor “Edad de la edificación” se consideró como menos favorable, el valor máximo, es decir, el correspondiente a las construcciones más antiguas, que representan la fragilidad más alta.

En la Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30, se presentan los mapas correspondientes a la distribución espacial de cada variable considerada para la evaluación de la vulnerabilidad, de las edificaciones de la zona de estudio.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

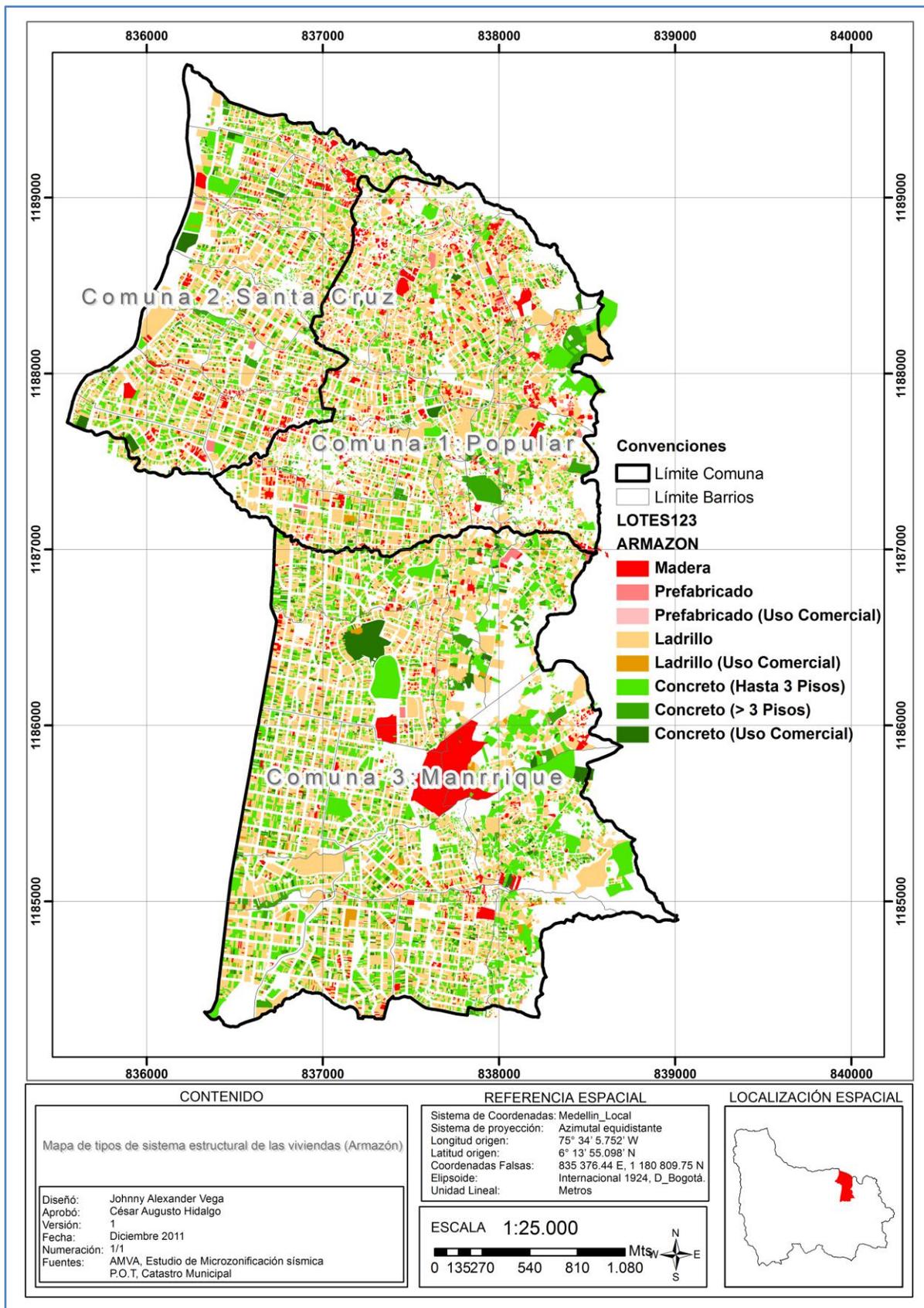


Figura 26. Mapa de tipos de sistema estructural (Armazón) de las viviendas de la zona de estudio.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

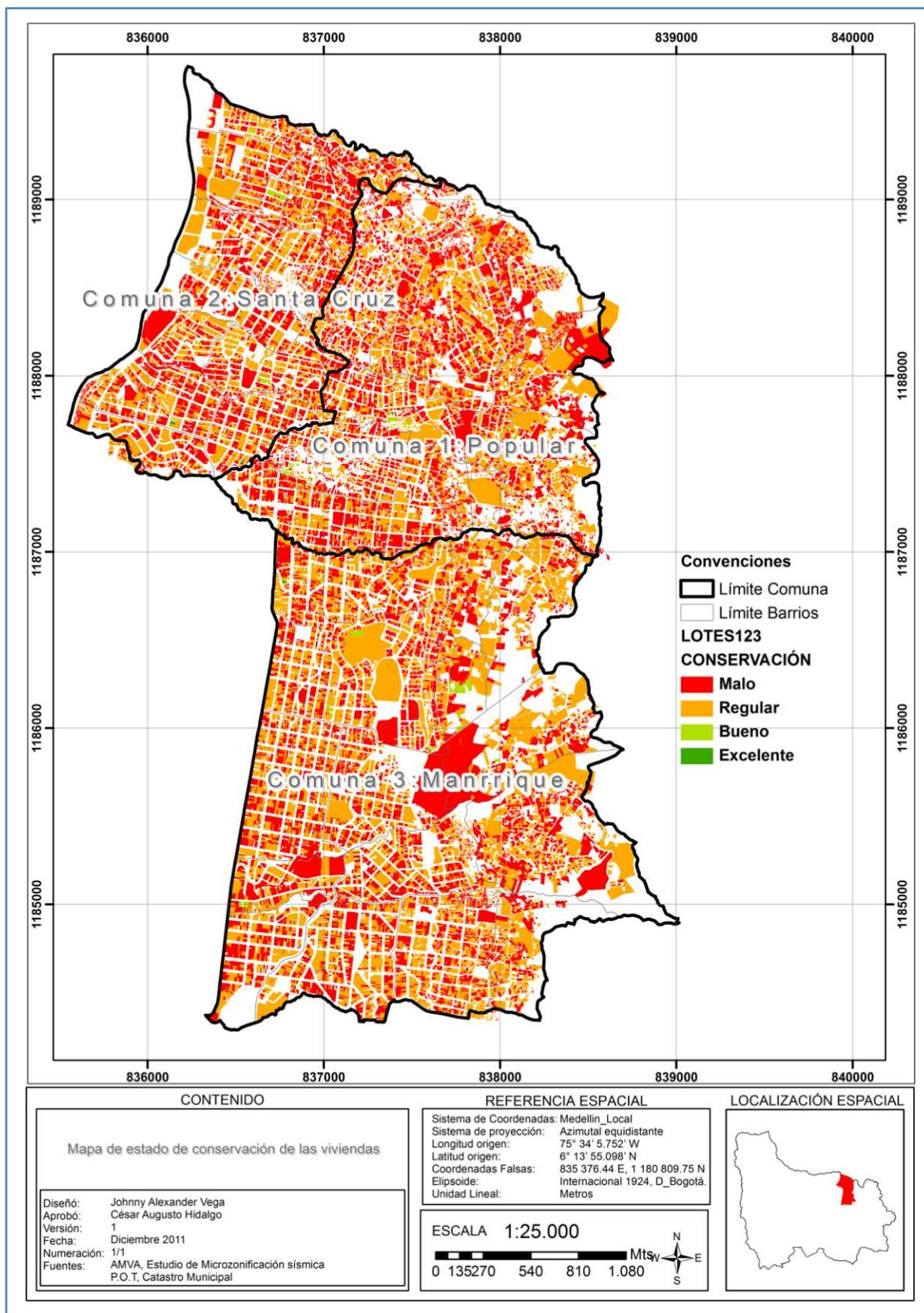


Figura 27. Mapa de estado de conservación de las viviendas de la zona de estudio.

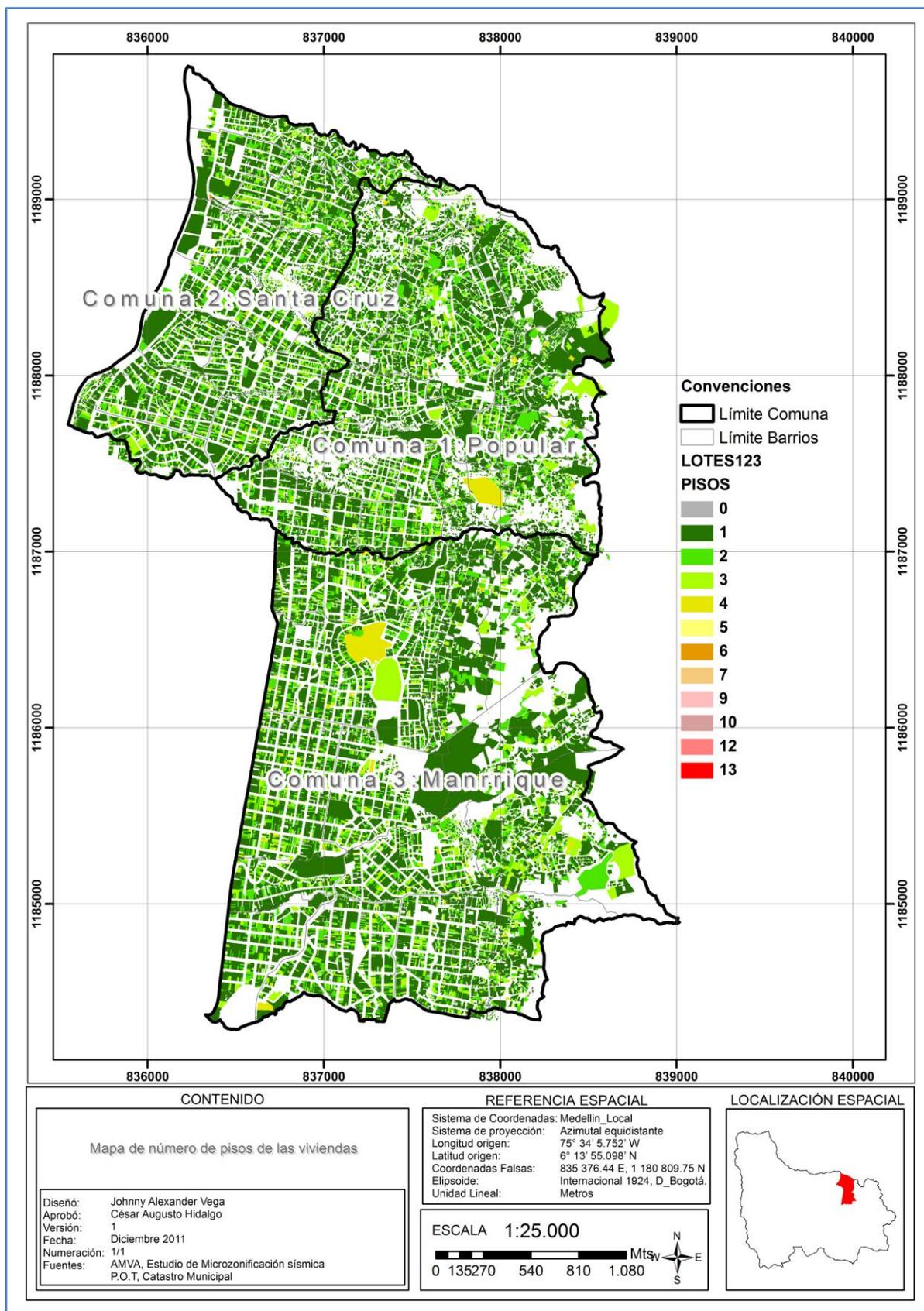


Figura 28. Mapa de número de pisos construidos de las viviendas de la zona de estudio.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

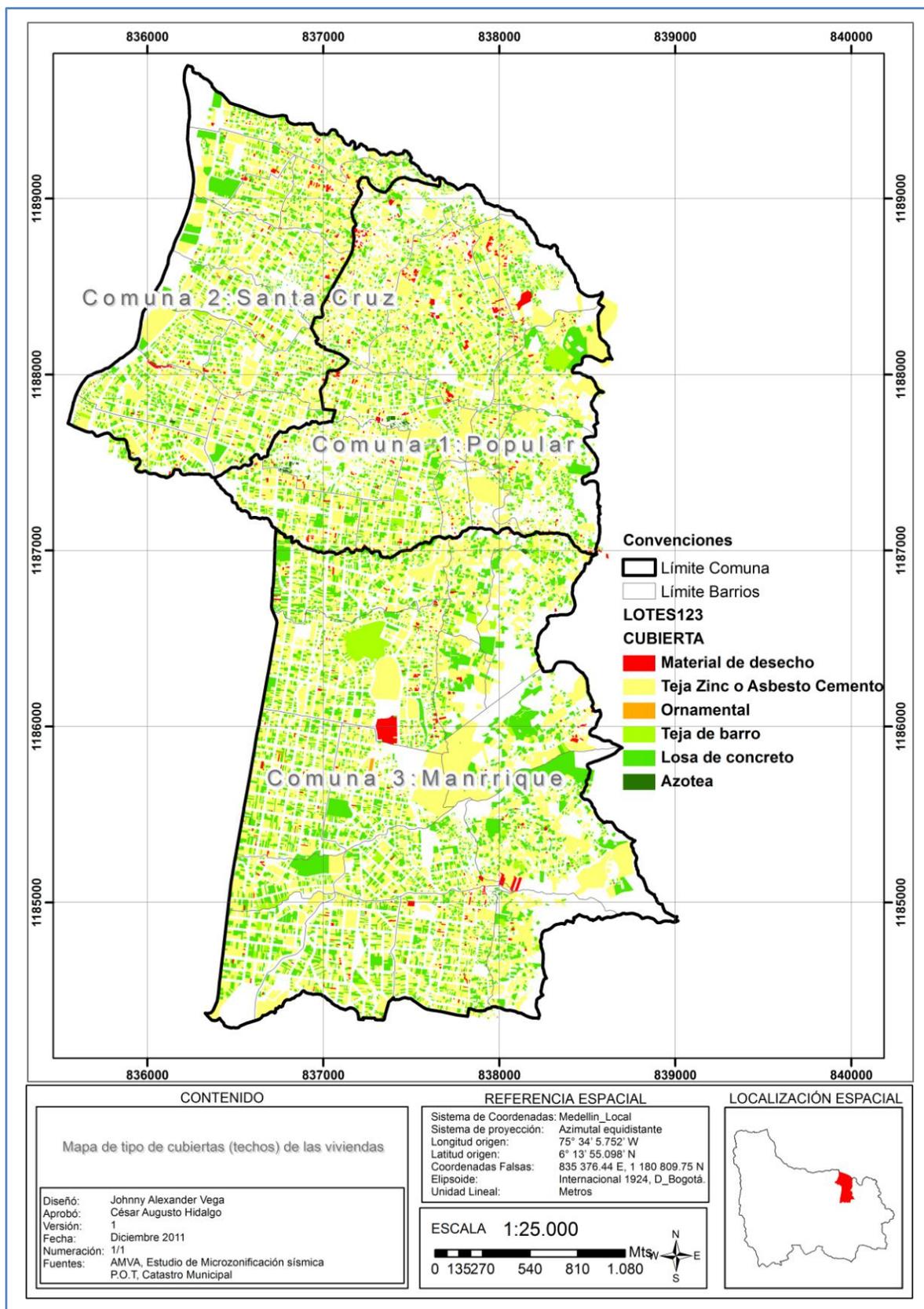


Figura 29. Mapa de tipo de cubierta (techo) de las viviendas de la zona de estudio.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

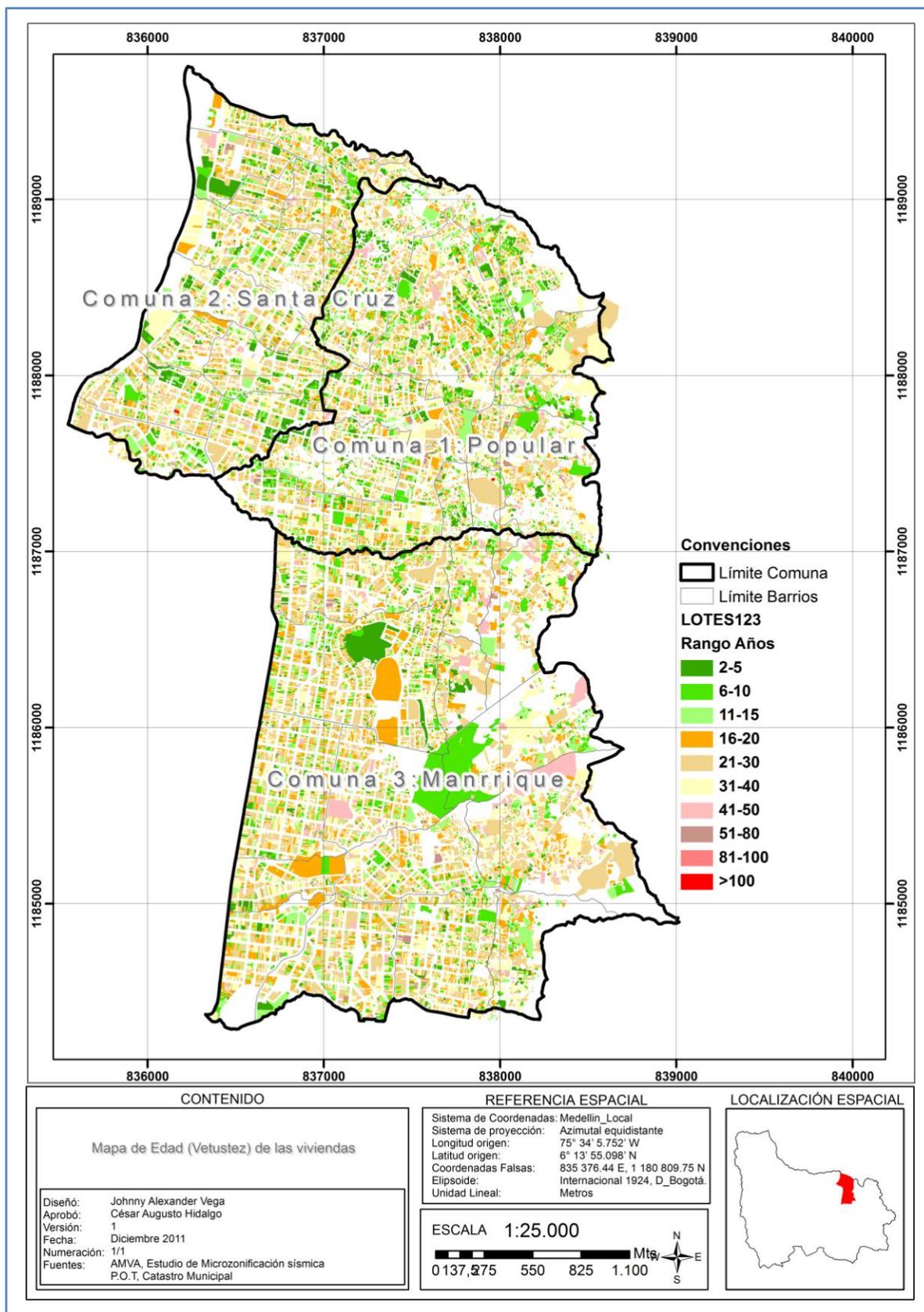


Figura 30. Mapa de edad (vetustez) de las viviendas de la zona de estudio.

En la Figura 26 se aprecia el predominio en la zona de estudio de un sistema estructural de ladrillo y de concreto (menos de 3 pisos) en la gran mayoría de las viviendas. Así mismo, es notorio en la Figura 27, que el estado de conservación de las viviendas no es el adecuado, pues generalmente se presenta un mal o regular estado de conservación de las estructuras. Esto se puede asociar a la vetustez o edad de las edificaciones, pues según la Figura 30, las edificaciones tienen principalmente edades de construcción en un marcado rango entre 10 y 40 años, razón por la cual es posible que presenten ciertos deterioros y daños tanto estructurales como no estructurales.

Se aprecia en la Figura 28, que el número promedio de niveles de piso de las viviendas del sector de estudio oscila entre 1 y 3 pisos principalmente, con la presencia aleatoria y esporádica de edificaciones mayores.

En cuanto al tipo de cubierta de las viviendas, es notorio el predominio de tejados o techos con teja de zinc y con losa o entrepiso de concreto, tal como se aprecia en la Figura 29.

Una vez procesados todos los atributos, el indicador de vulnerabilidad física de las edificaciones de la zona de estudio, puede ser calculado mediante el uso de árboles de eventos, los cuales permiten asignar un valor a cada variable o atributo considerado y a todas las combinaciones posibles, con el objetivo de obtener un valor final que indica cuán frágil o susceptible a daño es cada edificación. El criterio adoptado indica que el valor más bajo (1) corresponde a una mejor condición y el valor más alto (5) corresponde a una peor condición bajo el escenario más desfavorable.

Para el caso de los sistemas estructurales de ladrillo y concreto con una cubierta de losa de entrepiso en concreto reforzado, se consideró una reducción de 0,5 en el valor del indicador de vulnerabilidad física, puesto que el efecto de diafragma generado por la losa de entrepiso, contribuye a la rigidez de la estructura, reduciendo en cierta medida su fragilidad o susceptibilidad al daño. Esto se consideró para los sistemas estructurales mencionados, dado que son quienes tienen la capacidad de soportar el peso de una cubierta de tal tipo.

Posteriormente el índice puede ser ponderado de acuerdo a un peso asignado según la opinión de expertos o a la modelación de diferentes escenarios, y para finalizar, es preciso normalizarlo para obtener valores en un rango de cero a uno, de manera que pueda ser compatible con el rango adoptado para la amenaza, en este caso el deslizamiento, la cual también se valora de cero a uno, puesto que corresponde a una probabilidad.

De acuerdo a lo expuesto, los árboles de eventos para el cálculo del índice de vulnerabilidad se ilustran en la Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 y Figura 36.

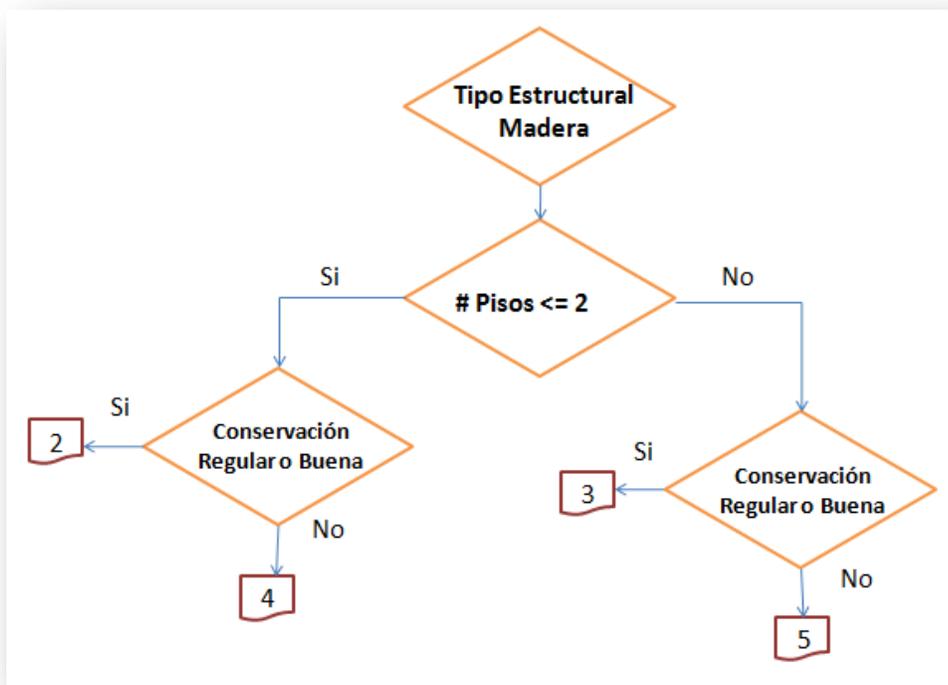


Figura 31 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de madera Fuente: Modificado de Botero (2009)

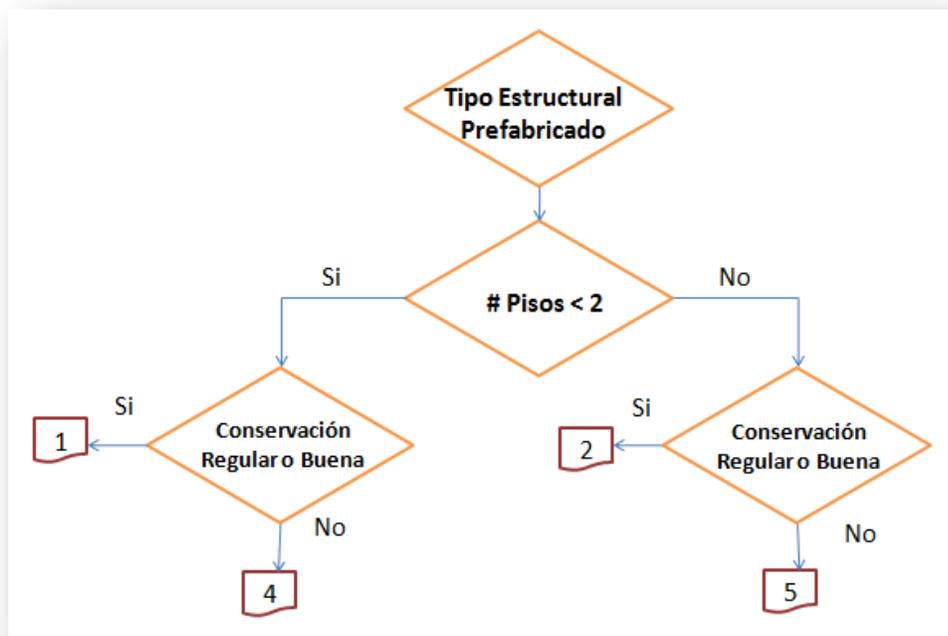


Figura 32 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras prefabricadas Fuente: Modificado de Botero (2009)

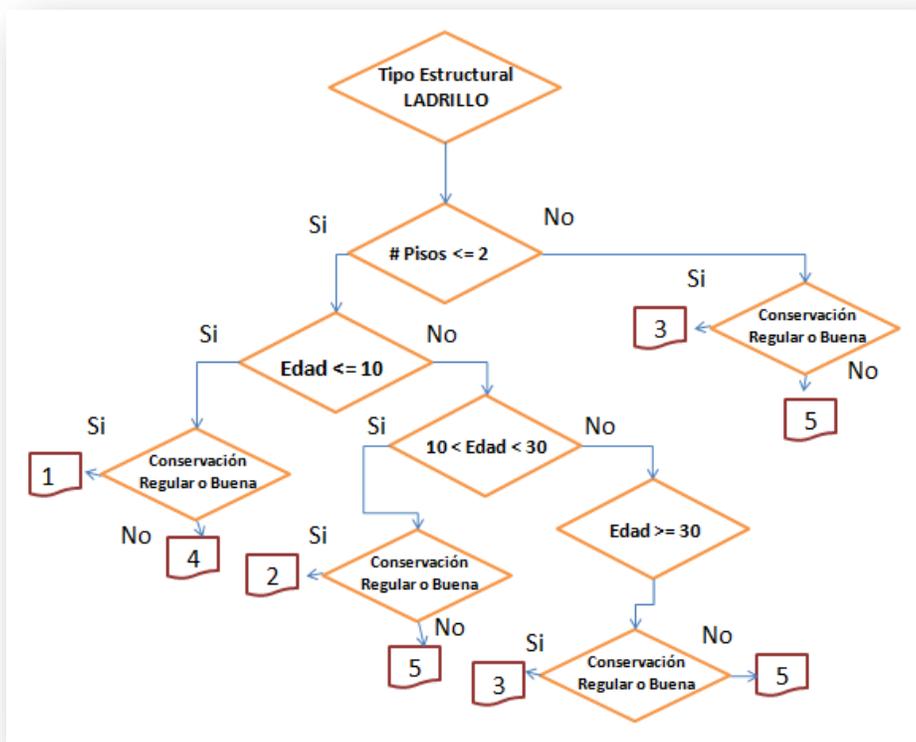


Figura 33 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de ladrillo Fuente: Modificado de Botero (2009)

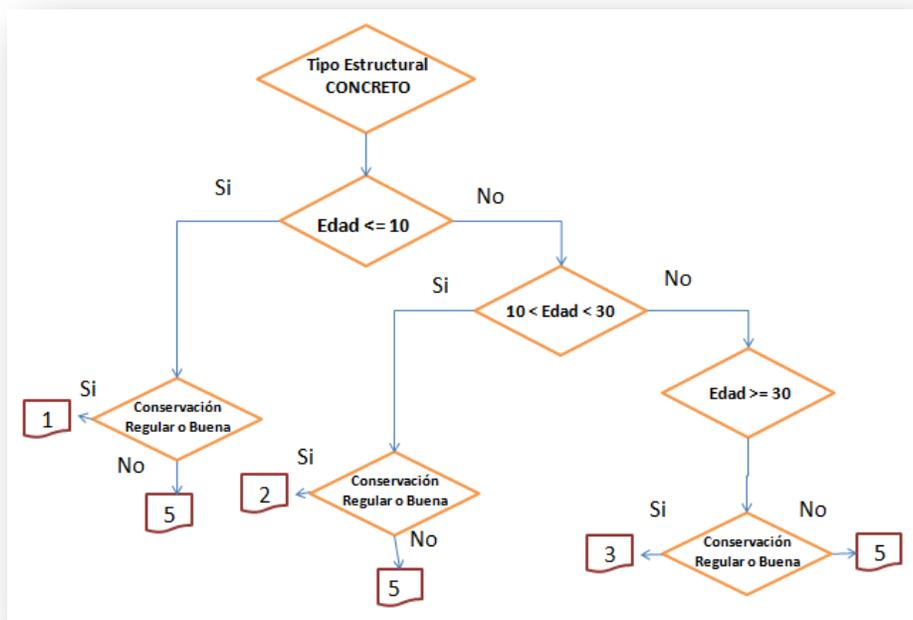


Figura 34 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de concreto Fuente: Modificado de Botero (2009)

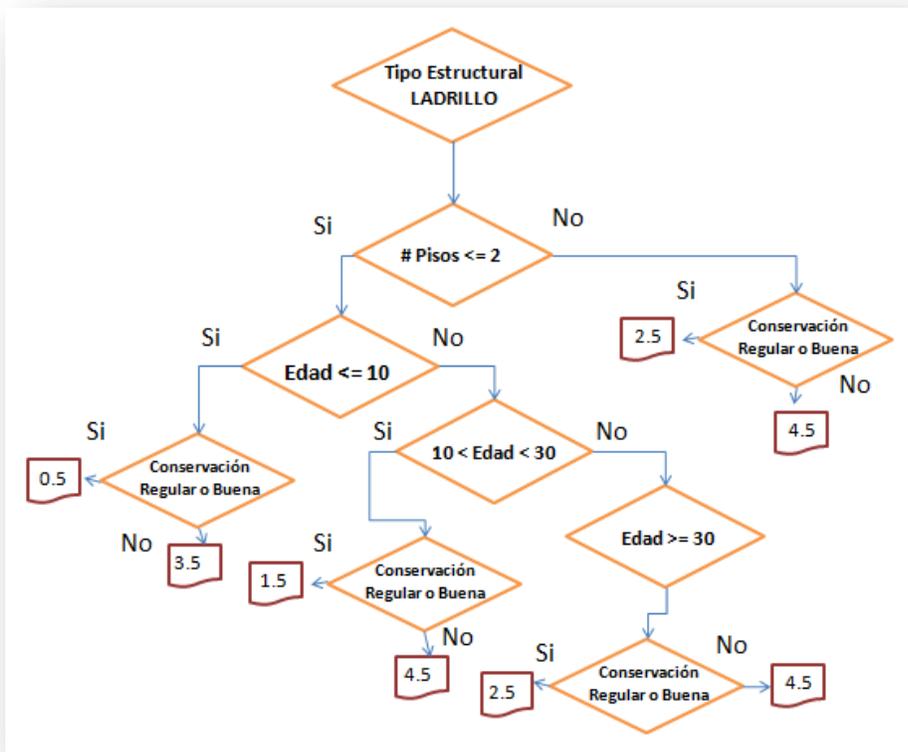


Figura 35 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de ladrillo (con cubierta en losa de concreto)

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de Botero (2009)

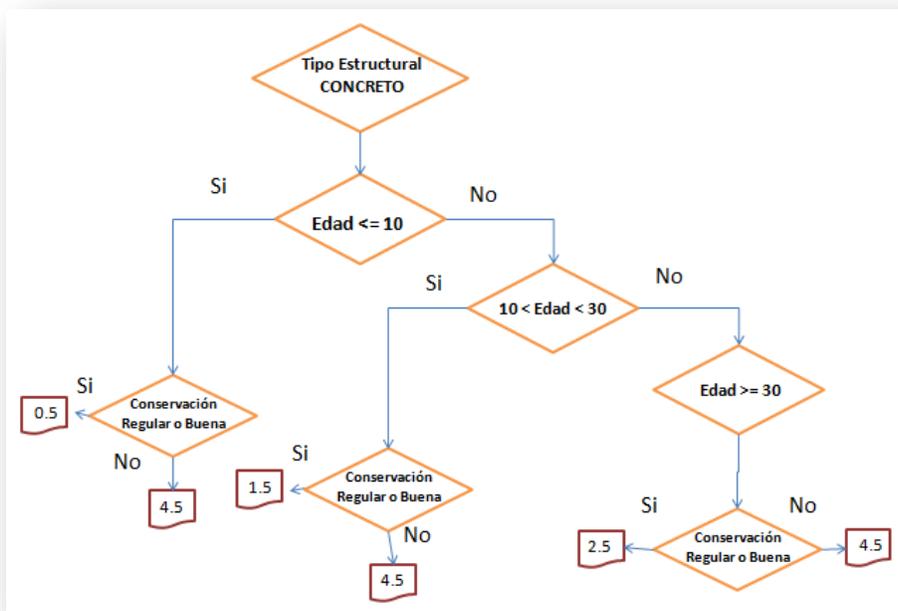


Figura 36 . Árbol de eventos para la estimación del índice de vulnerabilidad en estructuras de concreto (con cubierta en losa de concreto)

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de Botero (2009)

## **PARTE IV. Implementación y análisis del modelo**

## CAPITULO OCHO

### 8. Implementación y Análisis del modelo

Se realizó la evaluación de la amenaza por deslizamientos accionados por sismos en escala local, para la evaluación del riesgo en edificaciones correspondientes al sector nororiental del municipio de Medellín, conocido como comunas populares.

Inicialmente para la evaluación de riesgo por deslizamientos accionado por sismos, se calculan los factores de seguridad ( $FS$ ), que se definieron como la relación entre las fuerzas solicitantes y las fuerzas resistentes al interior del bloque deslizante del talud o ladera de análisis.

Posteriormente, se calcula la aceleración necesaria para desencadenar un movimiento de masa, denominada aceleración crítica ( $AC$ ), para lo cual se recurre a métodos pseudo estáticos. En esta etapa, se puede utilizar un modelo de equilibrio límite para determinar la aceleración necesaria para que se rompa el equilibrio estático, y para este trabajo se empleó el método de talud infinito, cuya forma de cálculo del factor de seguridad y aceleración crítica está dada por las ecuaciones 6, 7 y 8.

Una vez obtenido el valor de la aceleración crítica, se compara con la aceleración pico del sismo de diseño ( $PGA$ ) y se determina la probabilidad de excedencia, es decir, la probabilidad de que la aceleración crítica sea superada. Para esto se requieren registros históricos o modelos elaborados para efectos de microzonificación sísmica. Algunos autores recomiendan un periodo de retorno de 475 años usado en los códigos de edificios para el sismo de diseño.

En ocasiones, los resultados de la aceleración crítica pueden ser poco indicativos del riesgo que existe realmente, por lo cual es posible determinar el factor de seguridad, por ejemplo con las ecuaciones 6 y 7, para un valor definido de la aceleración pico (por ejemplo  $FS$  para un  $PGA$  igual  $0.2g$ ) y a partir de esto determinar la probabilidad de falla, a partir del coeficiente de confiabilidad calculado con la ecuación 25. También es usual que se calculen los desplazamientos máximos del terreno debido al sismo, lo cual se puede conseguir mediante la ecuación 11.

La probabilidad de falla se puede definir como la probabilidad de que los valores considerados límites sean excedidos. Para el caso del factor de seguridad, la probabilidad de falla se puede definir como la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor que la unidad (1).

Para el caso de la aceleración crítica, la probabilidad de falla puede ser definida como la probabilidad de que la aceleración crítica supere la aceleración pico.

En el caso de los desplazamientos, la probabilidad de falla puede ser definida al calcular la probabilidad de que los desplazamientos sean mayores que un cierto valor, por ejemplo los  $5cm$  definidos como umbral en el apartado 7.1.2.

Una forma de evaluar la probabilidad de falla y a la vez cuantificar el efecto de la incertidumbre en la evaluación de riesgo por deslizamiento, es la utilización de técnicas probabilistas a partir del índice de confiabilidad  $\beta$ , el cual puede ser calculado como se indicó antes por medio de la ecuación 25, y es

definido como la posibilidad que tiene un sistema para realizar las funciones para las que fue concebido, y por otro lado, una falla es definida como todo comportamiento que se pueda considerar anómalo.

A nivel local las edificaciones generalmente se caracterizan por ser de baja altura, sistema estructural en muros de mampostería, bien sea confinada o sin confinar, reforzada o no reforzada. Así mismo, algunas de estas edificaciones se han construido sin tener en cuenta parámetros y normas sismorresistentes, a pesar de encontrarse ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia.

Respecto al tema de la vulnerabilidad, para el desarrollo de este trabajo, se consideró pertinente calcular un valor asociado a la fragilidad del sistema estructural de los elementos de la infraestructura de análisis, en este caso viviendas ubicadas en el sector nororiental de la ciudad, bajo el escenario uno ilustrado en la Figura 25, el cual determina la vulnerabilidad en función de 5 parámetros de interés que para este caso corresponde al tipo de estructura, su vetustez, el número de pisos construidos, su estado de conservación y el tipo de cubierta (techo) de la estructura. Dicha operación se desarrolla a partir de la información de las viviendas incluida en la base catastral del municipio, empleada como fuente de información primaria para la estimación de un índice de fragilidad o vulnerabilidad promedio o ponderado.

La metodología empleada para la estimación del índice mencionado, tiene como objeto determinar un índice entre 0 y 1, que representa la fragilidad o vulnerabilidad de la estructura, de manera que cero (0) representa mejores condiciones estructurales y uno (1) representa las peores condiciones estructurales para responder ante un evento sísmico.

El valor es definido a partir de los árboles de eventos mostrados en las Figuras 31 a 36, mediante los cuales se va estimando cuales condiciones son más desfavorables y a dichas condiciones se les asigna valores altos de vulnerabilidad. Respecto al atributo de tipo de cubierta (techo), si la estructura posee losa de concreto como entrepiso, se considera que tiene un mejor desempeño y respuesta ante un evento sísmico, razón por la cual, se le incorpora un efecto benéfico en su índice de vulnerabilidad, reduciendo dicho valor en una magnitud de 0,5 unidades. Al índice final obtenido luego de realizar el análisis de las cubiertas, se denomina para efectos de esta investigación, Índice de Vulnerabilidad Ponderado.

Una vez obtenida la probabilidad de falla total, es decir, la que considera el efecto del sismo más el efecto de la saturación del suelo por lluvia calculada por medio de la ecuación 31, es posible combinarlo espacialmente con los índices de vulnerabilidad ponderados, para obtener la Susceptibilidad a falla de las edificaciones (viviendas) de la zona de estudio.

Finalmente, aplicando la ecuación 3, se puede multiplicar la susceptibilidad a falla de las edificaciones por el costo de dichas edificaciones, el cual se determina a partir de los registros catastrales, con lo cual se obtiene el Riesgo suscitado en las edificaciones producto de un deslizamiento accionado por un evento sísmico, que es el objetivo principal de este trabajo, todo ello implementado por medio de modelos bajo una plataforma SIG.

En la Figura 37, Figura 38 y Figura 39, se muestra el esquema metodológico empleado para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo de deslizamiento de masa accionado por un sismo.

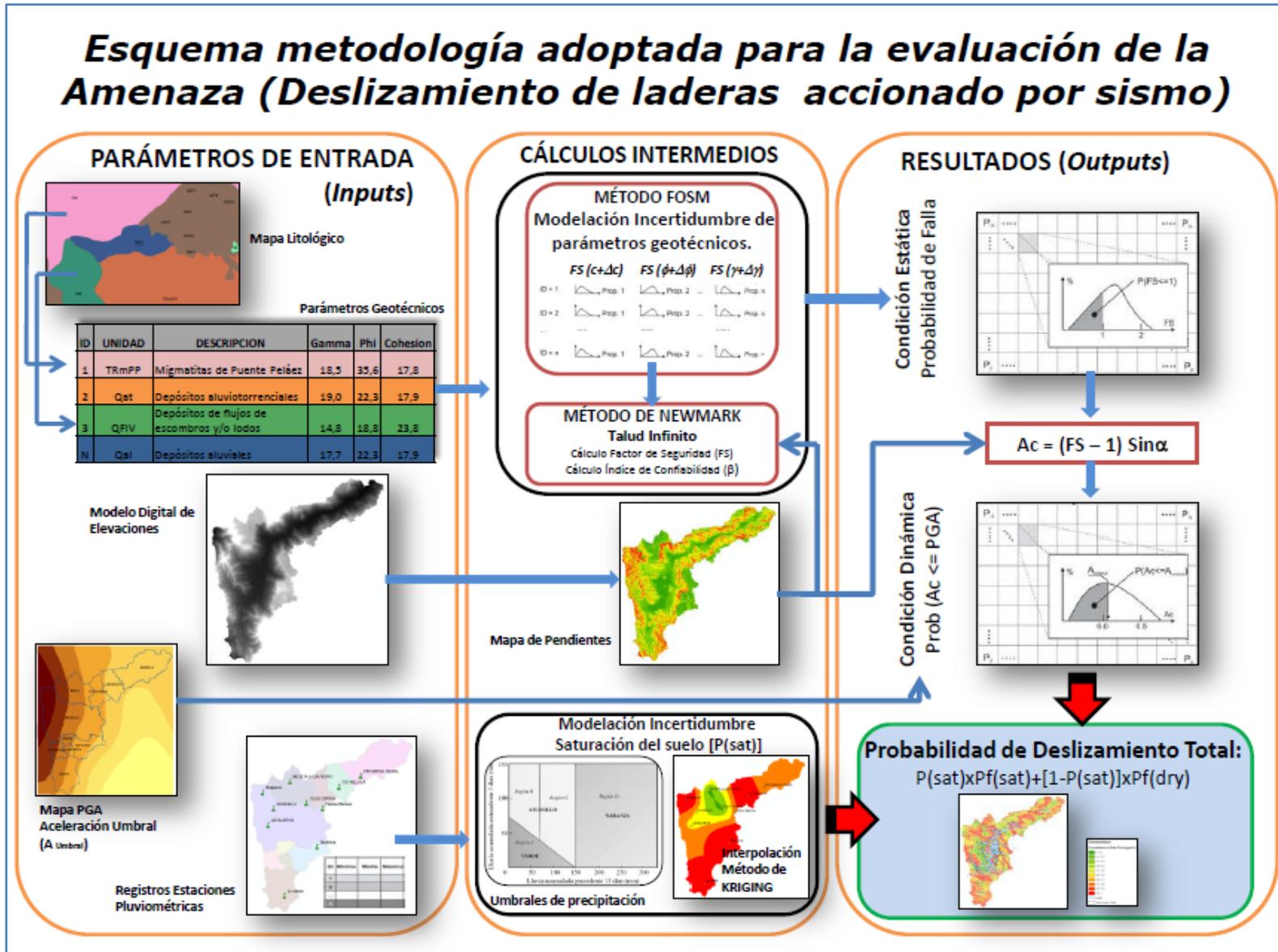


Figura 37 . Esquema metodología adoptada para la evaluación de la amenaza

Fuente: Elaboración propia

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

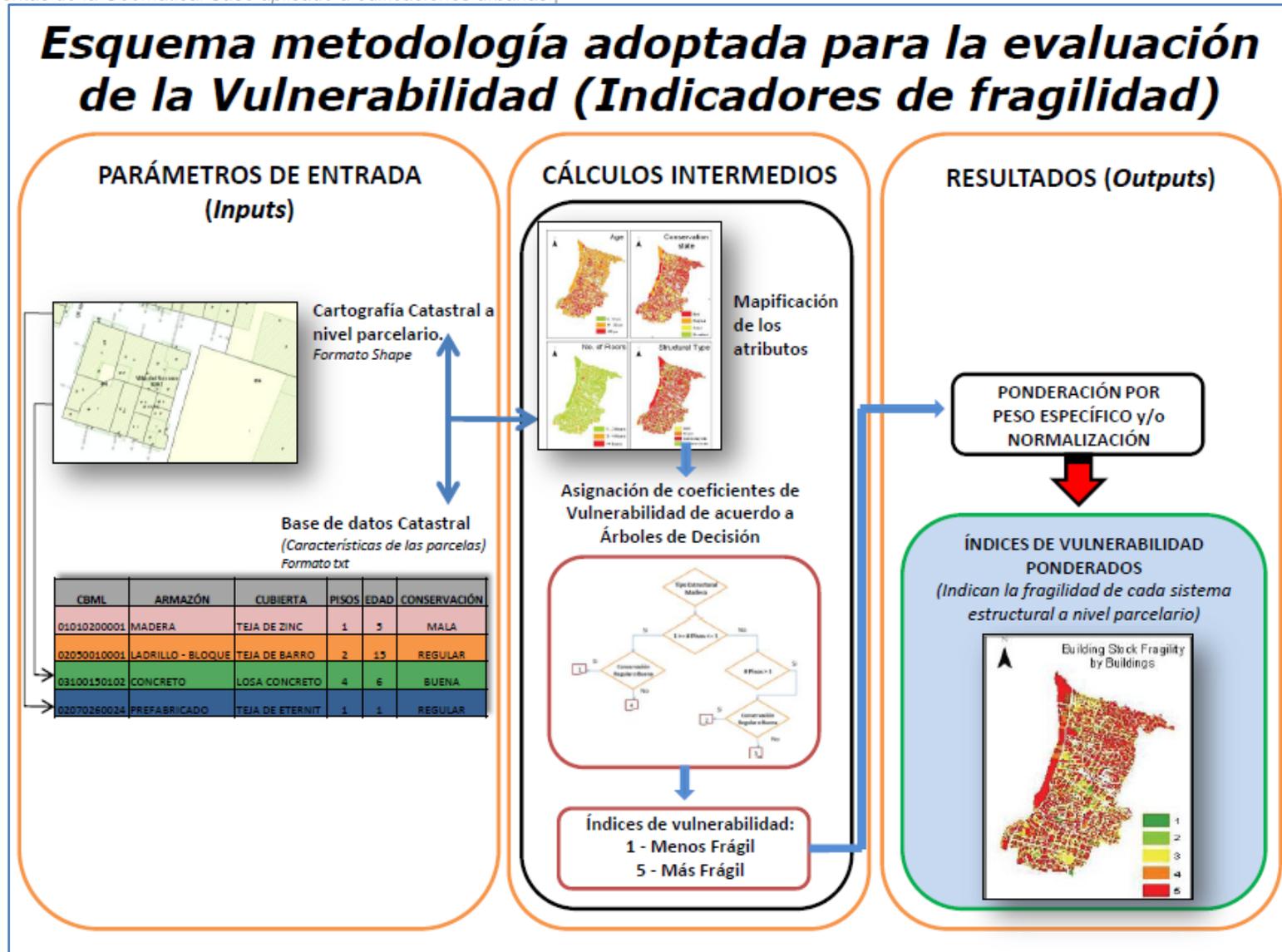


Figura 38 . Esquema metodología adoptada para la evaluación de la vulnerabilidad

Fuente: Elaboración propia

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

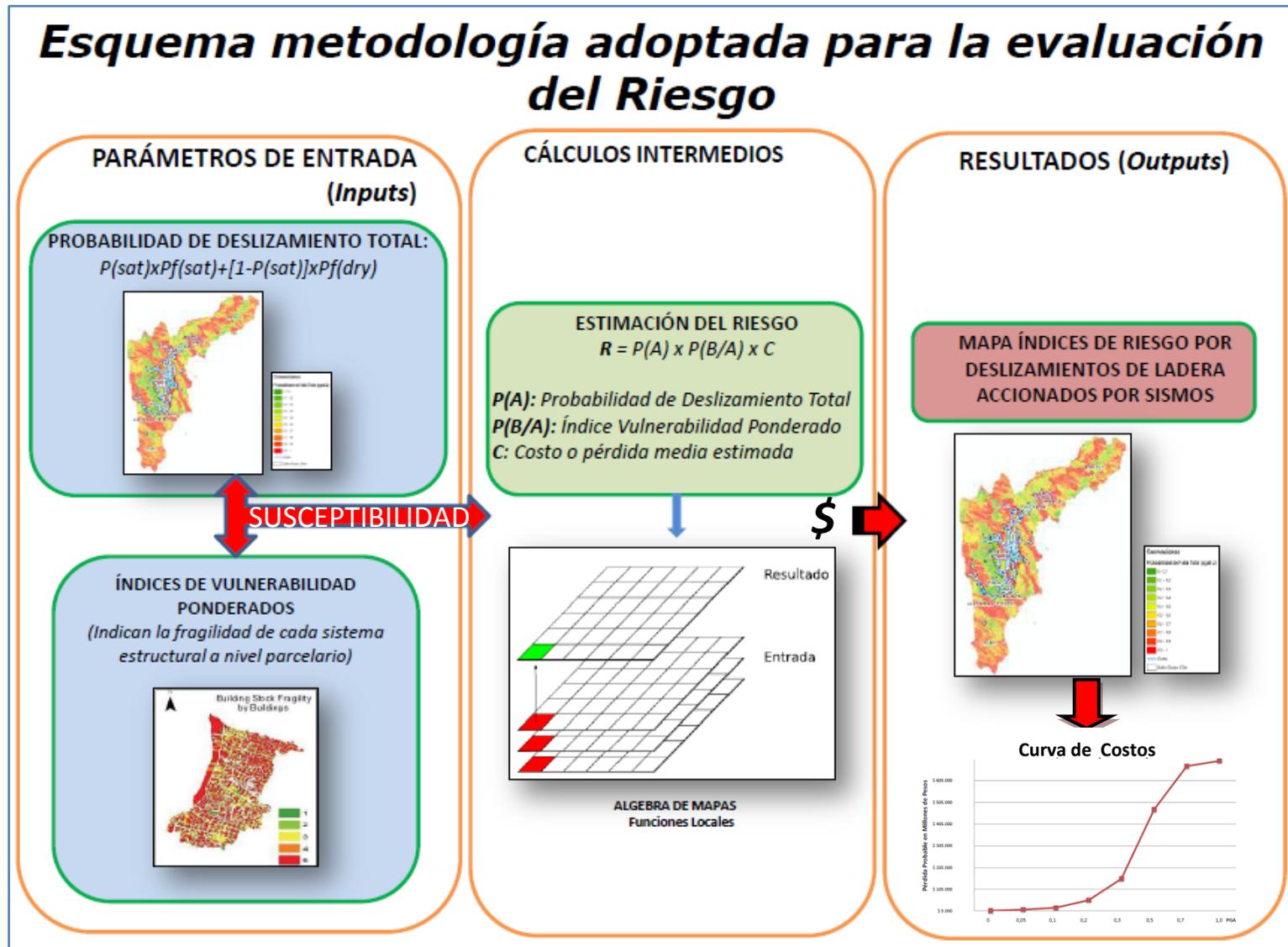


Figura 39 . Esquema metodología adoptada para la evaluación del riesgo

Fuente: Elaboración propia

### 8.1. Implementación del modelo

Toda la implementación se realizó usando técnicas de programación y geoprocésamiento del software ArcGIS 9.3.1. Módulo Model Builder de la empresa Environmental Systems Research Institute (ESRI), la cual realiza las operaciones y los análisis espaciales en el lenguaje de programación llamado Python. El proceso de implementación se llevó a cabo, considerando los pasos que se describen. En la Figura 40 se ilustra la interface gráfica del programa y de los submodelos implementados.

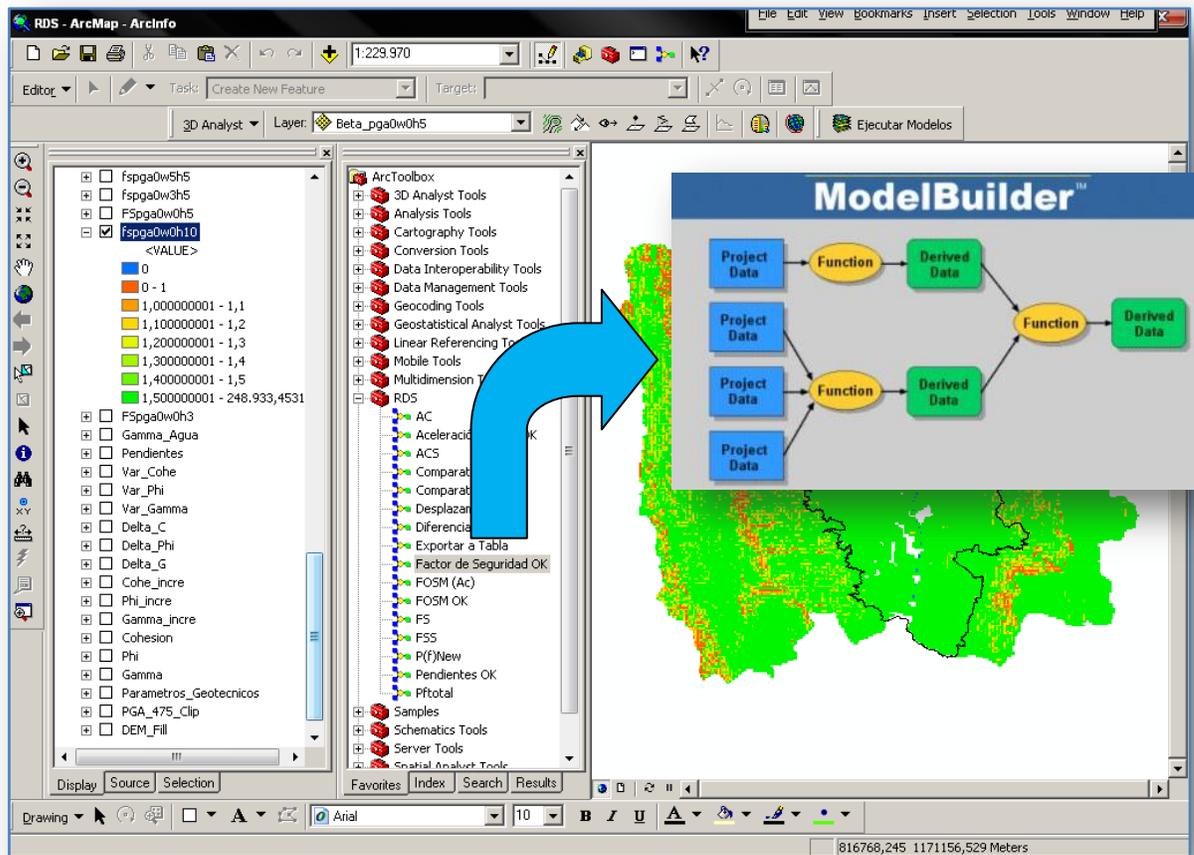


Figura 40. Interface gráfica de ArcGIS y Model Builder

Fuente: Elaboración propia

#### 8.1.1. Rasterización de la información

La información requerida en el modelo se debe ingresar en formato raster. Para este caso se usaron celdas (pixeles) cuadradas de 50 m de lado.

La información inicial usada en el modelo es la siguiente:

- ✓ Modelo digital de elevaciones (DEM) de la zona de estudio.
- ✓ Layer de Unidades geológicas de la zona de estudio.

- ✓ Layer de Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.
- ✓ Cartografía Catastral a nivel parcelario en escala 1:2000 (Urbano).
- ✓ Datos de lluvia de varias estaciones pluviométricas.

### 8.1.2. Programación del modelo

Para cada uno de los parámetros involucrados en el análisis de estabilidad de las laderas, se programó su respectiva ecuación de cálculo, como un Submodelo, es decir, que se implementaron modelos para el Factor de Seguridad, Aceleración Crítica, Desplazamiento de Newmark, Probabilidad de Falla, Índice de Vulnerabilidad, Susceptibilidad y Riesgo, entre otros submodelos auxiliares. Todos los submodelos siguen un esquema similar al mostrado en la Figura 41.

Así mismo, cabe resaltar que se emplearon diferentes herramientas de análisis espacial o geoprocésamiento, de manera que a partir de la información base, se obtuviera información para incorporar en los submodelos. Como ejemplo de esto, a partir del Modelo digital de elevaciones (DEM) se generó un mapa de pendientes (Slopes). Adicionalmente, a cada unidad geológica se le asignaron los parámetros geomecánicos de resistencia, los cuales fueron posteriormente rasterizados para su inclusión en la programación del modelo.

Con la información rasterizada en las diferentes capas se programó el modelo de cálculo de estabilidad de taludes. Inicialmente se calculó el factor de seguridad (FS) para diferentes valores de la aceleración actuante mediante la ecuación 7.

Posteriormente se calculó mediante la ecuación 8, la aceleración necesaria para desencadenar un movimiento de masa en el talud, denominada aceleración crítica (AC).

A cada tipo de material definido en el mapa de unidades geológicas se le atribuyeron parámetros de resistencia y de peso unitario tal y como se presentan en la Tabla 1. El modelo atribuye estos parámetros a cada celda de 50 m de lado, calcula el factor de seguridad y la aceleración crítica en la celda, para lo cual toma el ángulo de inclinación del mapa de pendientes generado del modelo digital de elevaciones del terreno (DEM).

Para el caso de la aceleración crítica se calcula la probabilidad de que la aceleración crítica sea menor que los valores de aceleración esperados para el área metropolitana y obtenidos de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá (AMVA). Con lo cual se obtiene un mapa de probabilidad de excedencia de la aceleración crítica.

Igualmente se calcula la probabilidad de falla de los taludes y laderas frente a la acción de un sismo de una cierta magnitud. Para esto se consideró una aceleración de  $0.2g$  definida por la norma NSR-10 (AIS 2010) como aceleración de diseño para una buena parte del Valle de Aburrá.

Después de realizar los cálculos deterministas de los factores de seguridad y de la aceleración crítica, se realizó el cálculo de la probabilidad de falla del talud incorporando la incertidumbre de las variables o parámetros geotécnicos. Para esto se programó una subrutina que permite calcular el índice de

confiabilidad ( $\beta$ ) por el método de primer orden y segundo momento conocido como FOSM por sus siglas en inglés. Los resultados de índice de confiabilidad obtenidos en el paso anterior, se exportan a un software de hojas de cálculo (para este caso MS Excel), para calcular la probabilidad de falla ( $PF$ ), es decir, la probabilidad de que los factores de seguridad sean menores que la unidad (1). Para esto se considera que tanto el factor de seguridad presenta distribuciones de densidad de probabilidad normal.

Siguiendo los conceptos presentados en el apartado 7.3, para cada estación pluviométrica se organizaron los registros, se calcularon las ventanas móviles de lluvia acumulada de 3 días y 15 días para cada fecha. Igualmente para cada fecha se calculó el valor de lluvia de 3 días usando el umbral definido en la ecuación 27 y se estableció la comparación entre los valores de lluvia de 3 días como se indica en la ecuación 31. Se determinó el número de veces que el umbral fue excedido durante el periodo de registros y este número de ocurrencias se dividió por el número total de registros de lluvia para establecer la probabilidad de que el umbral fuera excedido, lo que para este caso significa que el suelo alcanzó la condición de saturación crítica. En el archivo de Excel del Anexo digital 7 (Tabla datos ventanas móviles estaciones) se presentan los datos usados para calcular la probabilidad de saturación.

Posteriormente a la determinación de la probabilidad de que el suelo estuviera saturado según los datos de cada estación, se desarrolló un proceso geoestadístico (kriging) para estimar por interpolación la probabilidad de saturación en cada una de las celdas. Con este proceso se obtuvo la distribución de la probabilidad de saturación mostrada en la Figura 23.

Para el tema de la vulnerabilidad, se realizó un proceso tal cual se describió en el apartado 8 de este trabajo.

De acuerdo a todo esto se puede establecer que Model Builder constituye un entorno que permite construir modelos de geoprocésamiento de forma gráfica e interactiva, pudiendo incluir en ellos herramientas, datos, parámetros del usuario y otros modelos. Los modelos se pueden crear, grabar y re-ejecutar usando diferentes datos de entrada y parámetros, permitiendo a los usuarios explorar fácilmente panoramas alternativos, lo cual fue de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo, y en general, para proyectos que involucren el modelamiento de datos espaciales bajo diferentes escenarios.

En la Figura 41 se presenta el esquema típico de un Submodelo implementado en Model Builder que corresponde en este caso al factor de seguridad (FS).

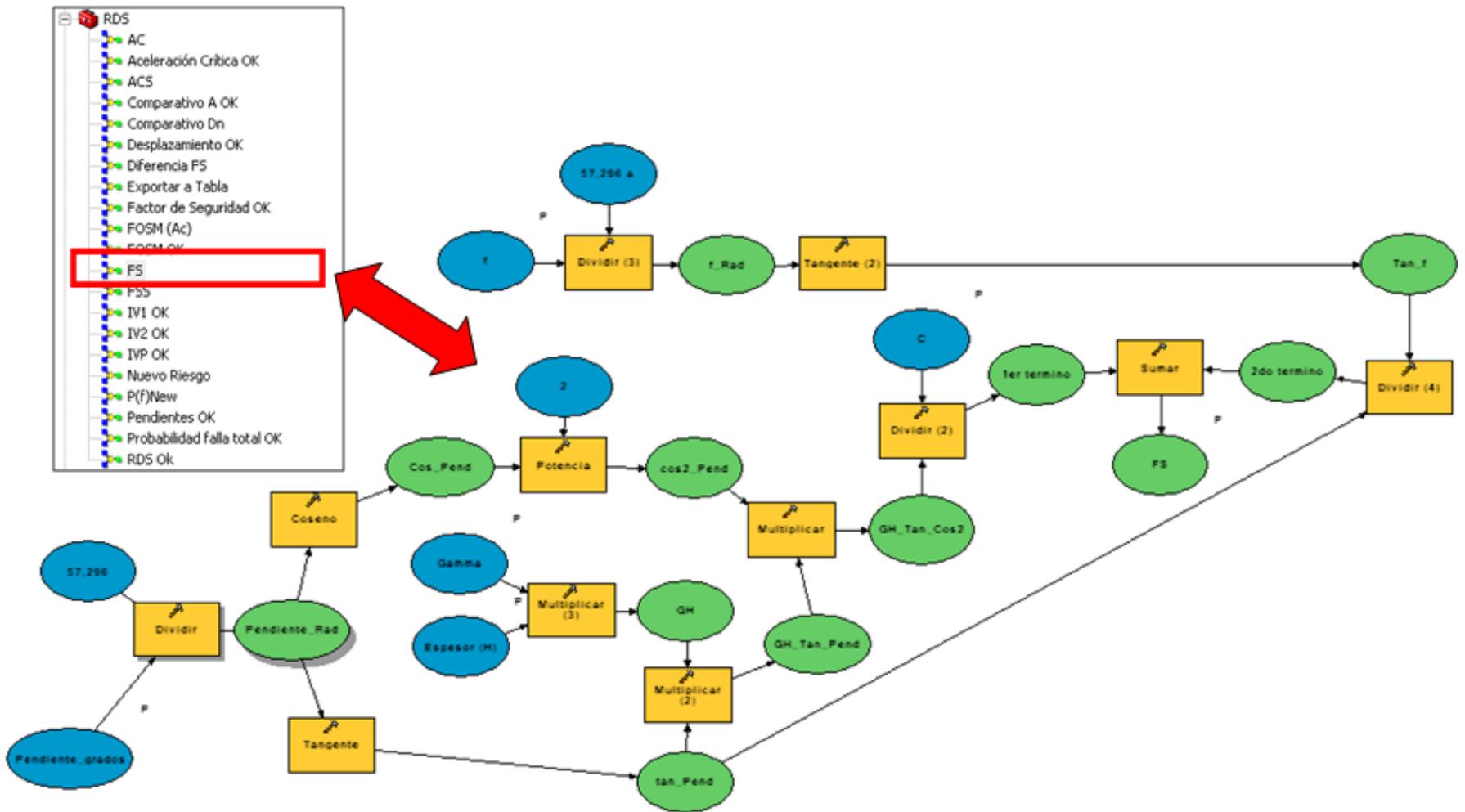


Figura 41. Submodelo implementado en Model Builder de ArcGIS para el cálculo del Factor de Seguridad (FS).

## 8.2. Análisis de resultados

### 8.2.1. Efecto de la profundidad de la superficie de falla

La primera variable analizada fue la profundidad de la superficie de falla ( $H$ ). Se realizaron varias ejecuciones del modelo considerando diferentes profundidades de la superficie de falla del bloque deslizante. Se consideraron profundidades de 5, 10 y 20 m, y en la Figura 42, Figura 43 y Figura 44, se presentan los resultados obtenidos.

Tomando como referencia el caso de la superficie de falla a 5 m de profundidad, se observa una disminución del factor de seguridad en promedio de 21% cuando la profundidad es 10m y de 31% cuando ésta es de 20m.

En la región del Valle de Aburrá, los deslizamientos que se presentan con mayor frecuencia son de tipo superficial, por lo cual, para efectos de análisis posteriores en este trabajo se considerarán en adelante superficies de falla localizadas a 5m de profundidad, de acuerdo a la justificación dada en el capítulo 7.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de aquellas celdas (píxeles) que tienen un factor de seguridad inferior a uno (1), y como es su variabilidad de acuerdo a la profundidad de la superficie de falla, e igualmente se muestra el porcentaje de su área de cobertura respecto al área total del municipio.

<b>FS</b>	<b>Celdas (FS &lt; 1)</b>	<b>Área afectada (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% Incremento</b>	<b>% respecto al Área Municipio</b>
<b>H=5</b>	408	4,08	-	1,1
<b>H=10</b>	1576	15,76	386,3	4,1
<b>H=20</b>	3478	34,78	852,5	9,1

<b>Área Municipio (Km<sup>2</sup>)</b>	380,3
--	-------

**Tabla 9. Comparativo de celdas con FS < 1 para diferentes profundidades de la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio**

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 9, se valida el concepto de que a mayor profundidad de la superficie de falla, se presenta una disminución del factor de seguridad, puesto que como se mencionó anteriormente, esto implica mayor peso del bloque deslizante que se traduce en una mayor sollicitación para la estabilidad de la masa de suelo.

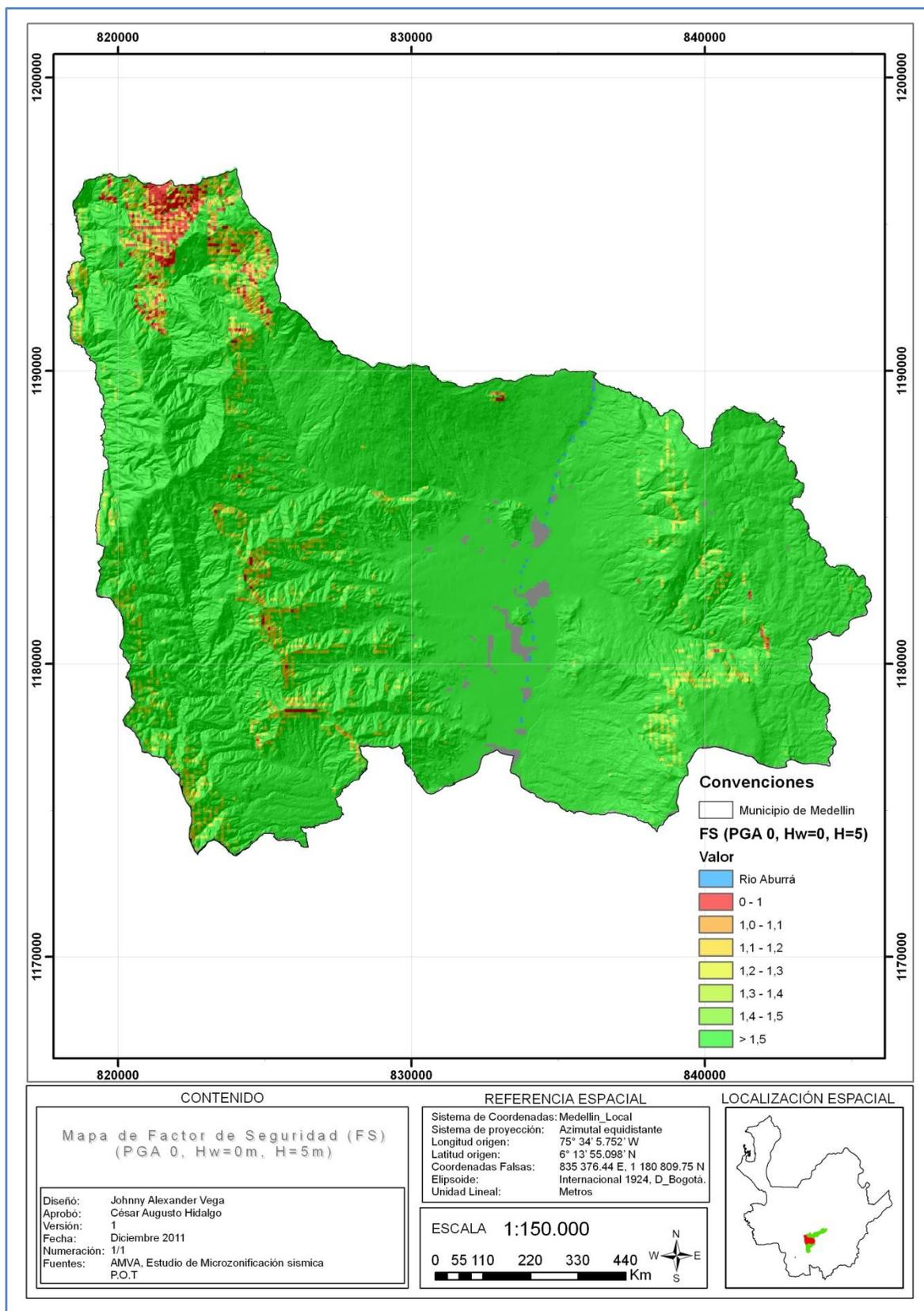


Figura 42. Factor de seguridad con la superficie de falla a 5m de profundidad

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

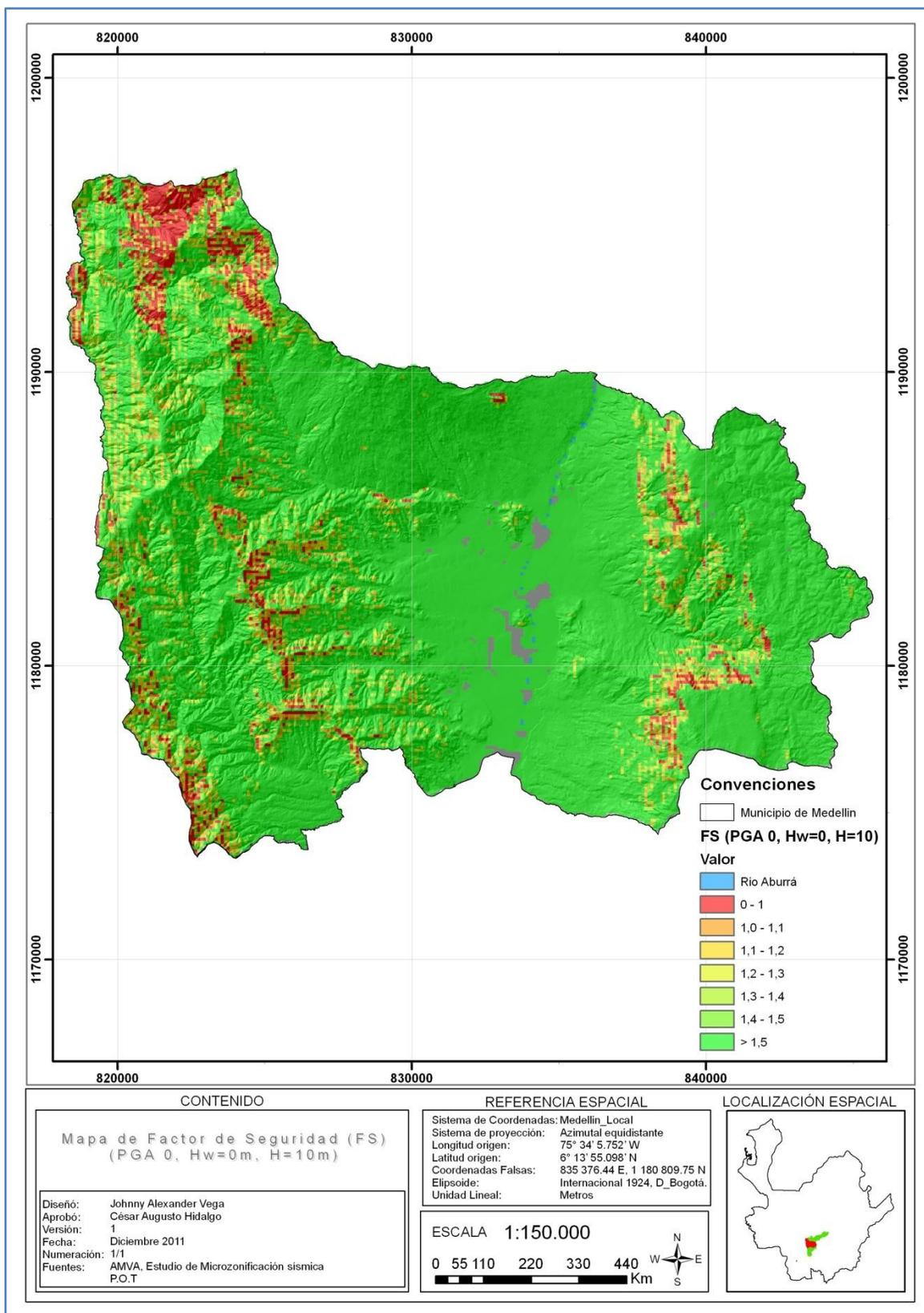


Figura 43. Factor de seguridad con la superficie de falla a 10 m de profundidad

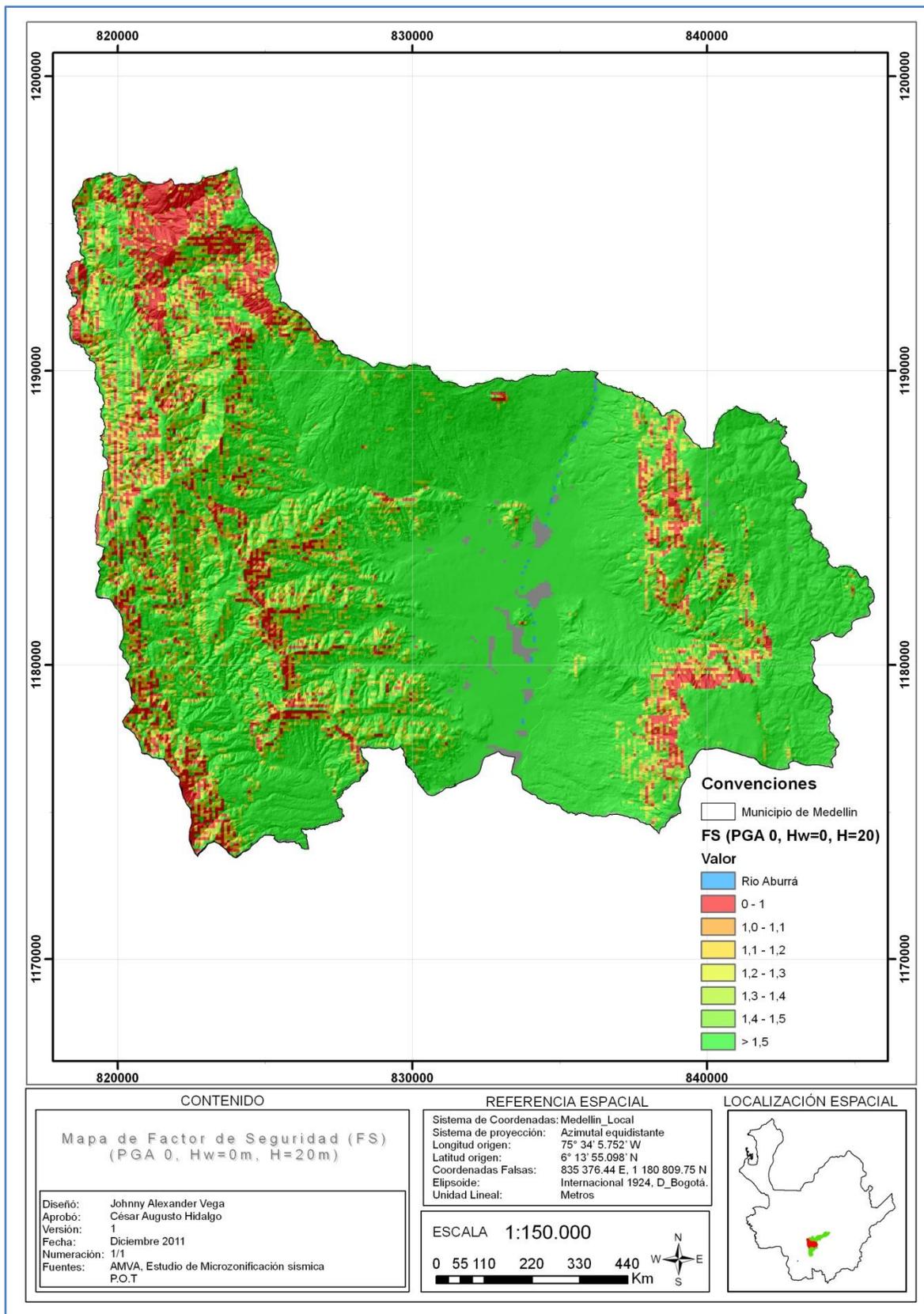


Figura 44. Factor de seguridad con la superficie de falla a 20 m de profundidad

### 8.2.2. Efecto del nivel freático (NF) sobre el factor de seguridad (FS)

La segunda variable analizada, fue la profundidad del nivel freático ( $H_w$ ). Se realizaron varias ejecuciones del modelo considerando diferentes profundidades del nivel freático con la superficie de falla a 5m. Se consideraron profundidades del nivel freático de 0, 3 y 5m, y en la Figura 45 y Figura 46, se presentan los resultados obtenidos.

Tomando como referencia el caso de la superficie de falla a 5m y el nivel de agua coincidiendo con la superficie de falla ( $H_w=0$ ), se observa una disminución del factor de seguridad en promedio de 21% cuando el nivel del agua desde la superficie de falla es 3m y de 35% cuando  $H_w=5$ m.

En la región del Valle de Aburrá, los deslizamientos se presentan con mayor frecuencia en temporadas de lluvia, en las cuales se presenta un incremento de la saturación del suelo con la consecuente disminución de la cohesión del suelo y el incremento de la presión de poros. Por esto y para efectos de análisis en este trabajo se consideran dos situaciones, una en la cual el nivel del agua se presenta en la condición más crítica ( $H_w=5$ m) y otra favorable en la cual  $H_w=0$ .

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las celdas (píxeles) que presentan valores del factor de seguridad ( $FS$ ) inferiores a uno (1) y su variación de acuerdo a la altura del nivel freático sobre la superficie de falla. Así mismo, se indica que porcentaje cubren respecto al área total del municipio.

<b><i>FS</i></b>	<b><i>Celdas (FS &lt; 1)</i></b>	<b><i>Área afectada (Km<sup>2</sup>)</i></b>	<b><i>% Incremento</i></b>	<b><i>% respecto al Área Municipio</i></b>
<b><i>H<sub>w</sub>=0</i></b>	408	4,1	-	1,1
<b><i>H<sub>w</sub>=3</i></b>	1333	13,3	326,7	3,5
<b><i>H<sub>w</sub>=5</i></b>	3343	33,4	819,4	8,8

<b><i>Área Municipio (Km<sup>2</sup>)</i></b>	380,3
---	-------

**Tabla 10. Comparativo de celdas con  $FS < 1$  y su área de cubrimiento para diferentes alturas del nivel freático sobre la superficie de falla**

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 10, se valida el planteamiento de que a mayor saturación del suelo, se presenta un comportamiento desfavorable en las condiciones de estabilidad de las laderas tal y como se indicó anteriormente, lo cual se ve reflejado en los valores del  $FS$ .

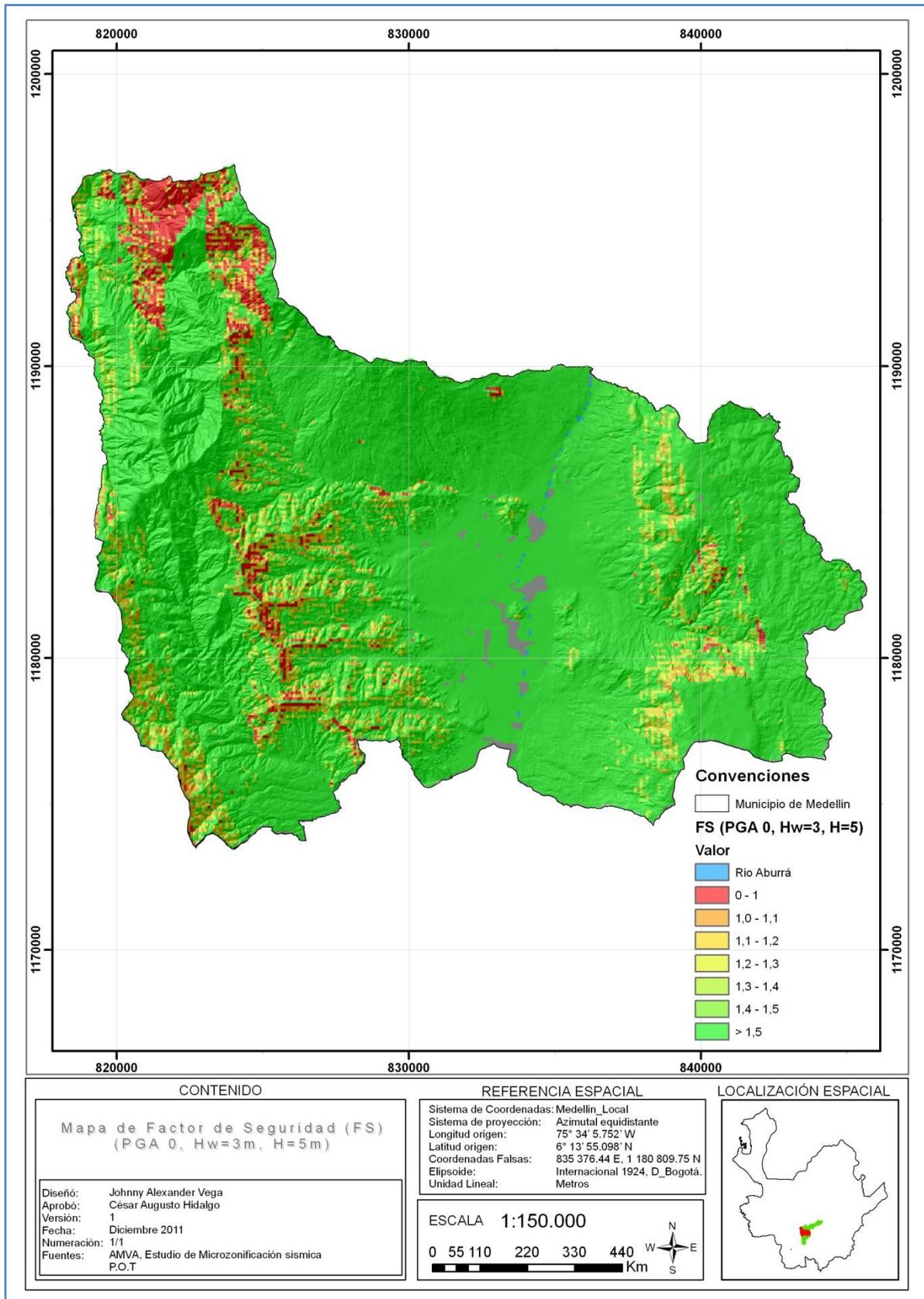


Figura 45. Factor de seguridad con la superficie del agua a 2 m de profundidad (Hw=3m)

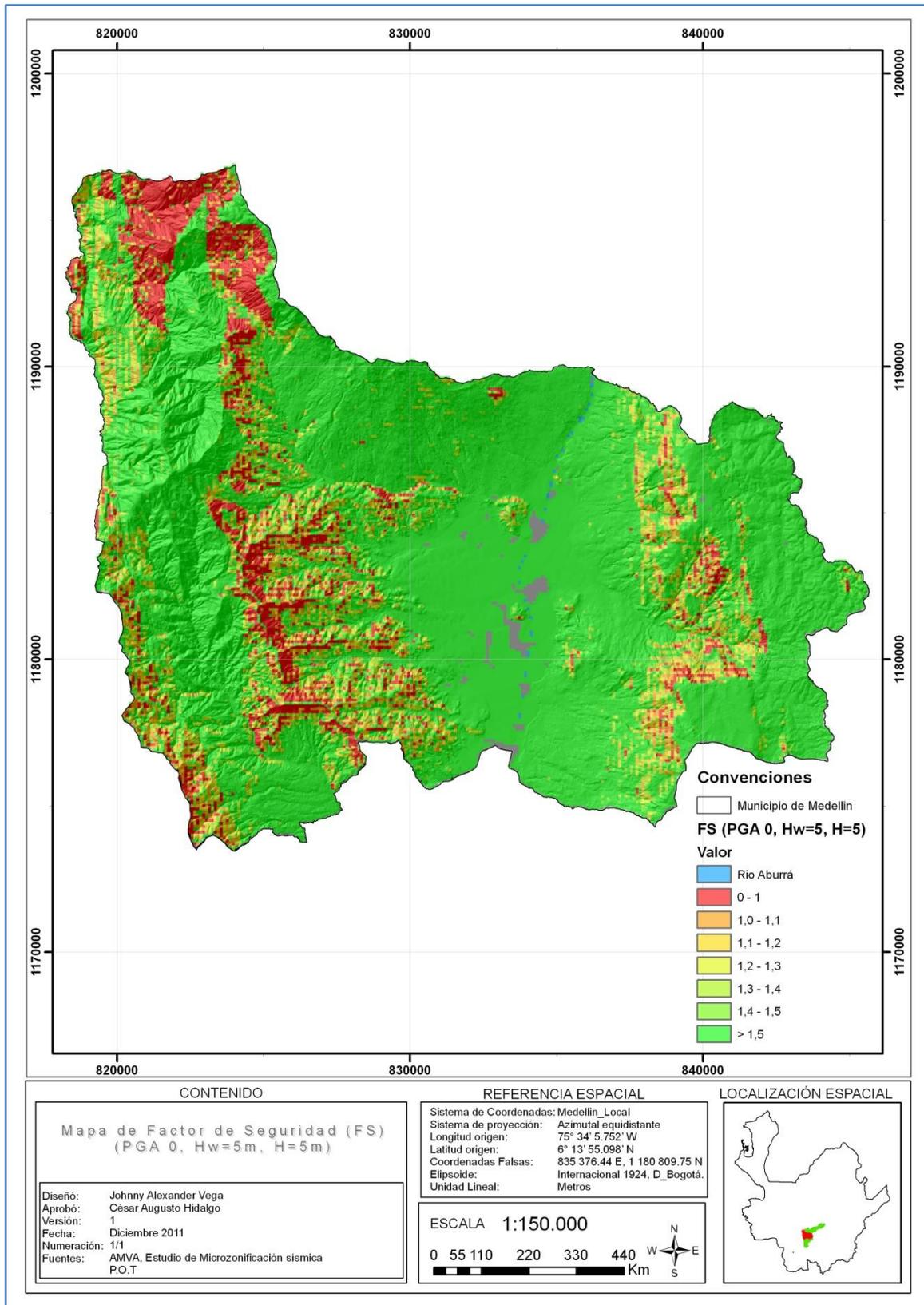


Figura 46. Factor de seguridad con la superficie del agua coincidiendo con el terreno (Hw=5m)

### 8.2.3. Aceleración crítica

Se determinó la aceleración crítica en cada pixel, considerando la superficie de falla a 5m de profundidad y condiciones de agua coincidentes con la superficie de falla y del terreno respectivamente.

La aceleración crítica en condiciones húmedas varía entre 0g y 1.12g, cuyos valores nulos se deben a que en algunas zonas el factor de seguridad obtenido es inferior a la unidad.

La aceleración crítica en condiciones saturadas varía entre 0g y 0.83g, cuyos valores nulos se deben a la misma razón enunciada para la condición húmeda. Sin embargo en la determinación de estos valores aún no ha sido considerada la incertidumbre de los parámetros del suelo, lo cual es tenido en cuenta en el próximo apartado.

En la Figura 47 y Figura 48, se presentan los mapas de aceleraciones críticas obtenidos.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de aceleración crítica y como es su variación según la altura del nivel freático medido desde la superficie de falla, al igual que el área que cubre respecto al área total del municipio.

<b>Rango (Unidades de g)</b>	<b>Celdas AC (Hw=0, H=5)</b>	<b>Área afectada (Km2)</b>	<b>% respecto al Área Municipio</b>	<b>Celdas AC (Hw=5, H=5)</b>	<b>Área afectada (Km2)</b>	<b>% respecto al Área Municipio</b>
<b>&lt; 0,1</b>	1067	10,67	2,8	7143	71,43	18,8
<b>0,1 - 0,15</b>	515	5,15	1,4	2351	23,51	6,2
<b>0,15 - 0,2</b>	767	7,67	2,0	2498	24,98	6,6
<b>0,2 - 0,25</b>	1053	10,53	2,8	2439	24,39	6,4
<b>0,25 - 0,3</b>	1455	14,55	3,8	2367	23,67	6,2
<b>0,3 - 0,4</b>	3718	37,18	9,8	6345	63,45	16,7
<b>0,4 - 0,5</b>	4140	41,4	10,9	7641	76,41	20,1
<b>&gt; 0,5</b>	24946	249,46	65,6	6877	68,77	18,1

<b>Área Municipio (Km2)</b>	380,3
---------------------------------	-------

**Tabla 11. Comparativo de valores de AC según la altura del nivel freático medido desde la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área del municipio**

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 11, es nuevamente claro el efecto adverso que trae consigo la saturación del suelo en la respuesta del mismo ante un evento sísmico que puede desencadenar un deslizamiento.

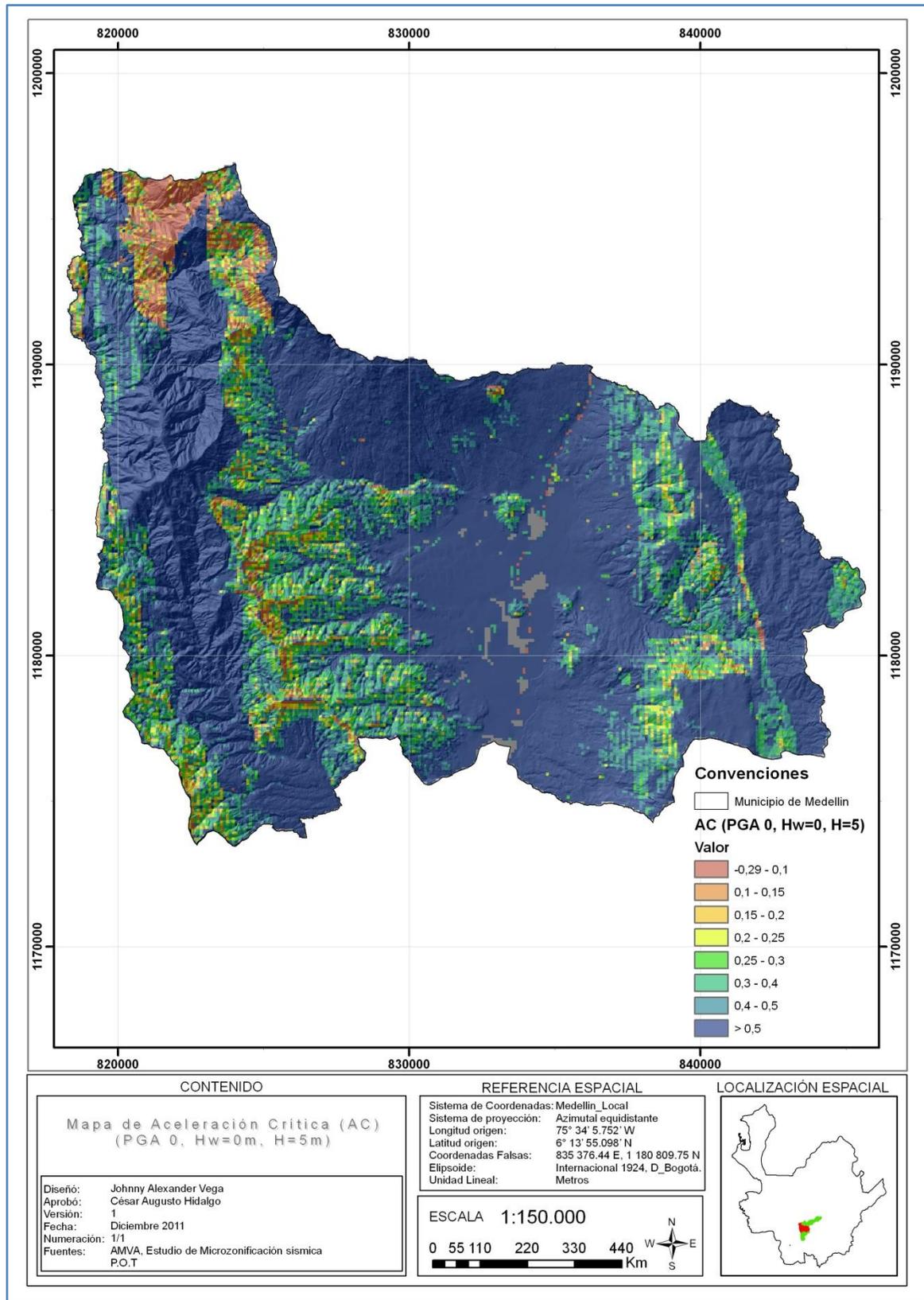


Figura 47. Mapa de Aceleraciones Críticas para condición húmeda (Hw=0m)

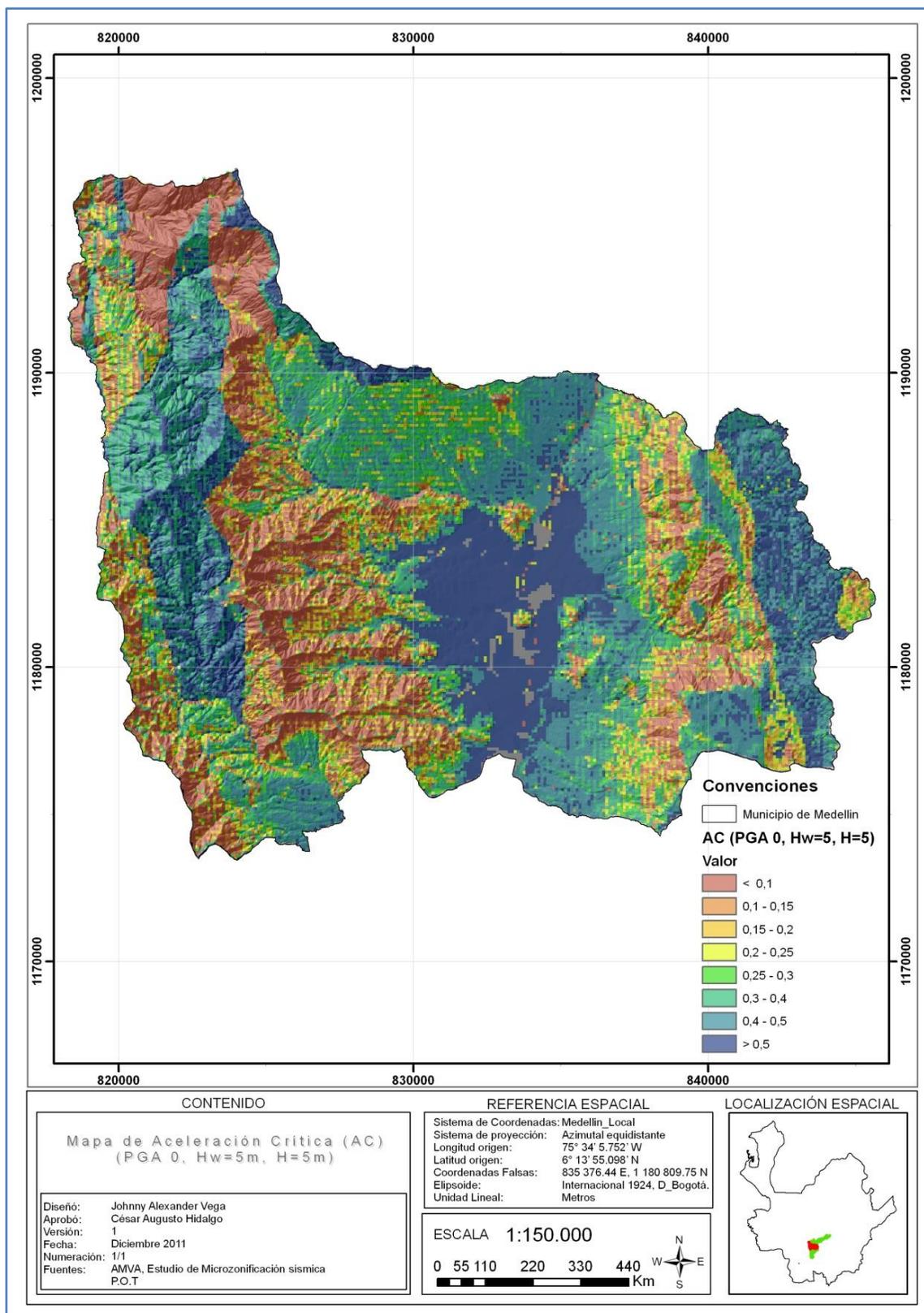


Figura 48. Mapa de Aceleraciones Críticas para condición saturada (Hw=5m)

#### 8.2.4. Probabilidad de falla (PF)

Considerando las posibles formas de evaluar la probabilidad de falla de las laderas, se consideraron dos casos de análisis para un valor de PGA de 0.2g.

##### 8.2.4.1. Probabilidad de falla en condición húmeda

Usando las ecuaciones 7 y 25, se calculó el factor de seguridad ( $FS$ ) y el coeficiente de confiabilidad ( $\beta$ ) para un valor de PGA de 0.2g.

Con esto se obtuvo para cada pixel una serie de datos que permiten establecer una curva de probabilidad de falla en función de la aceleración pico efectiva del suelo (PGA). En la Figura 50, se muestran los resultados del índice de confiabilidad ( $\beta$ ) para un valor de PGA 0.2g, y con el mismo procedimiento se evaluó para cada valor de PGA, con superficie de falla a 5m de profundidad en condiciones húmedas ( $H_w=0$ ).

Asumiendo una distribución normal, se calculó la probabilidad de falla de cada pixel como se ilustra en la Figura 51. En el Anexo digital 4 se presentan los valores numéricos de las probabilidades de falla de cada pixel. Cabe anotar que también se evaluó considerando una distribución lognormal, ver Anexo digital 4, observándose que los resultados con la distribución normal son más conservadores.

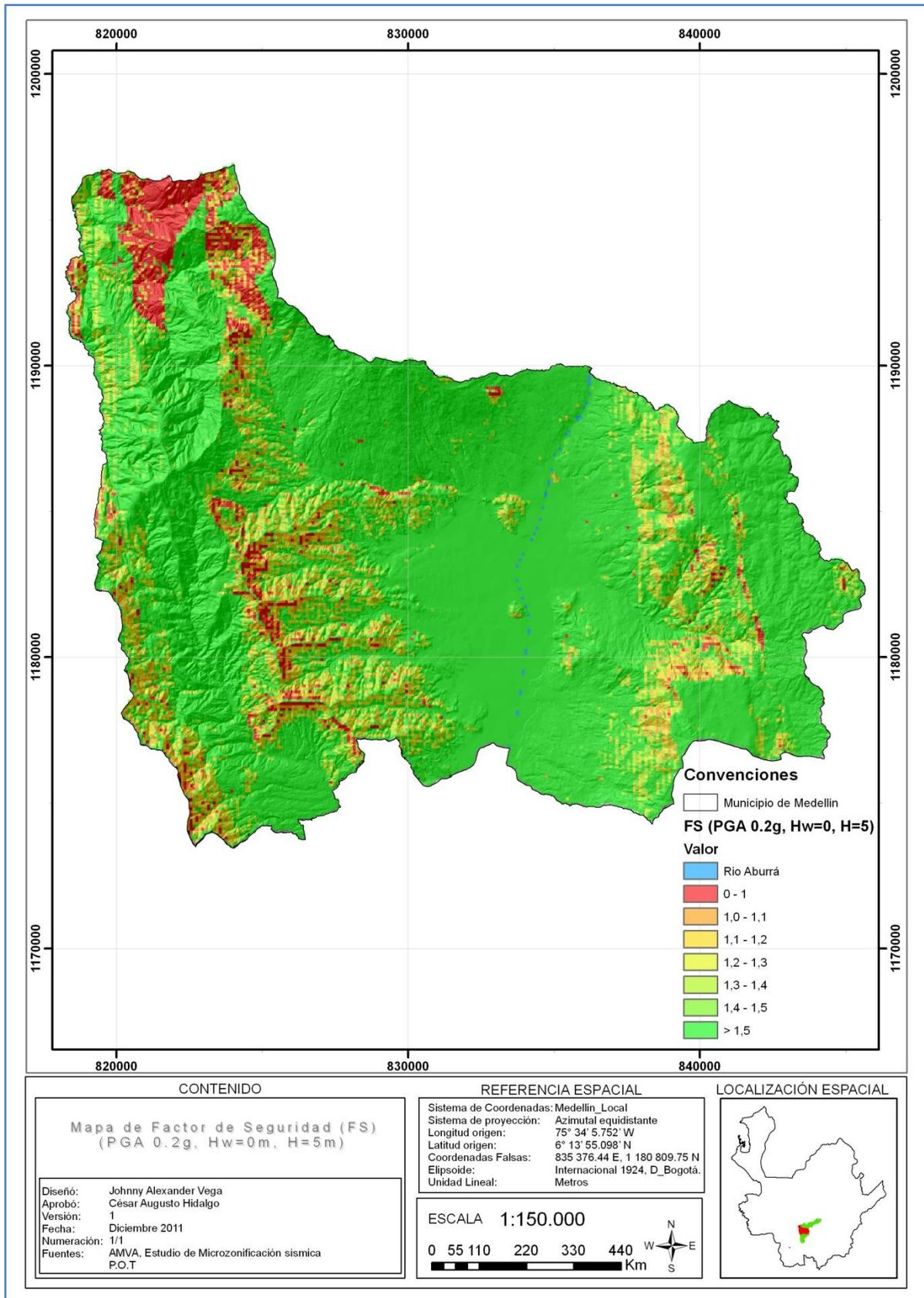


Figura 49. Valores del factor de seguridad para PGA=0.2g (Condición húmeda)

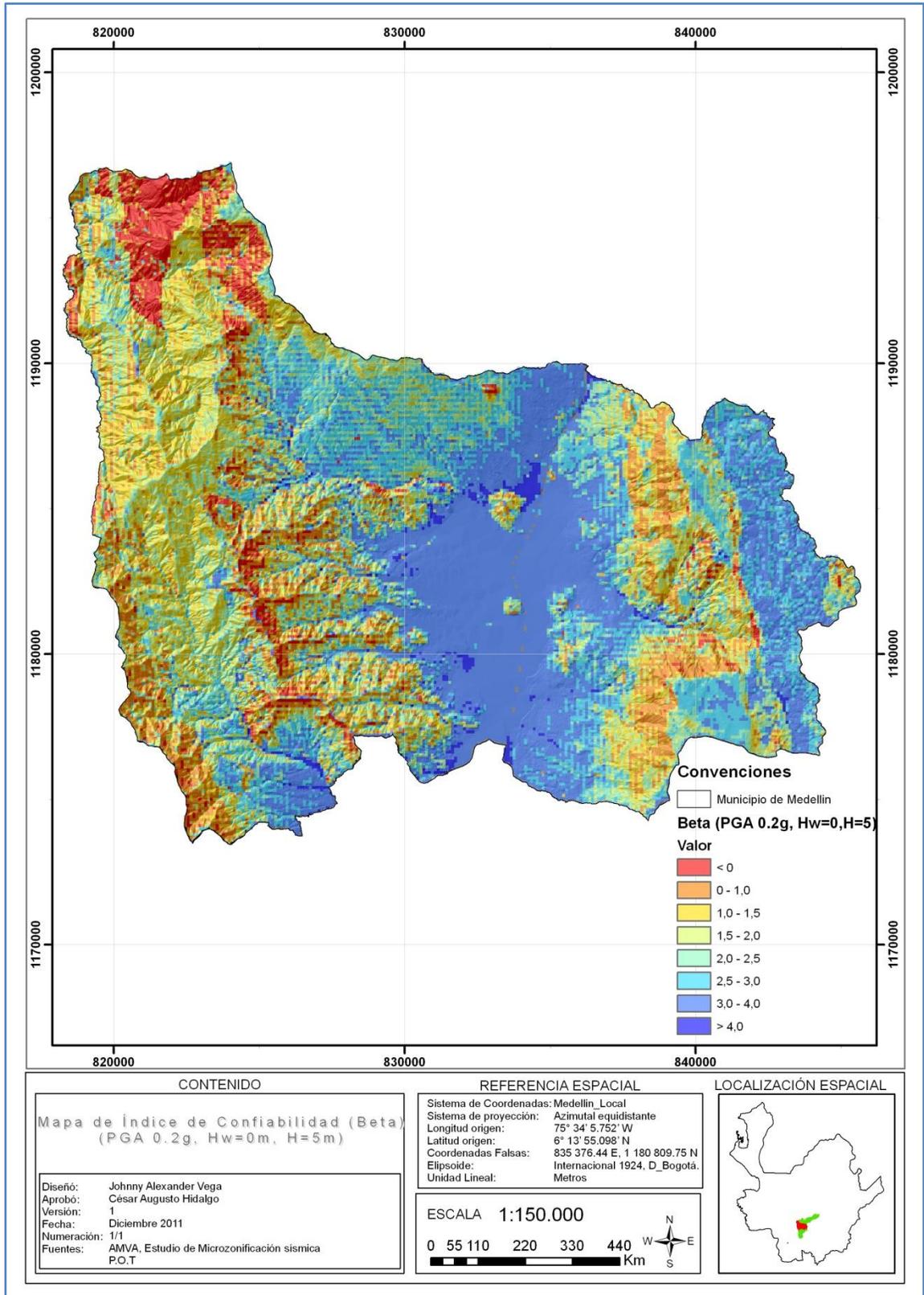


Figura 50. Valores del índice de confiabilidad para PGA=0.2g (Condición húmeda)

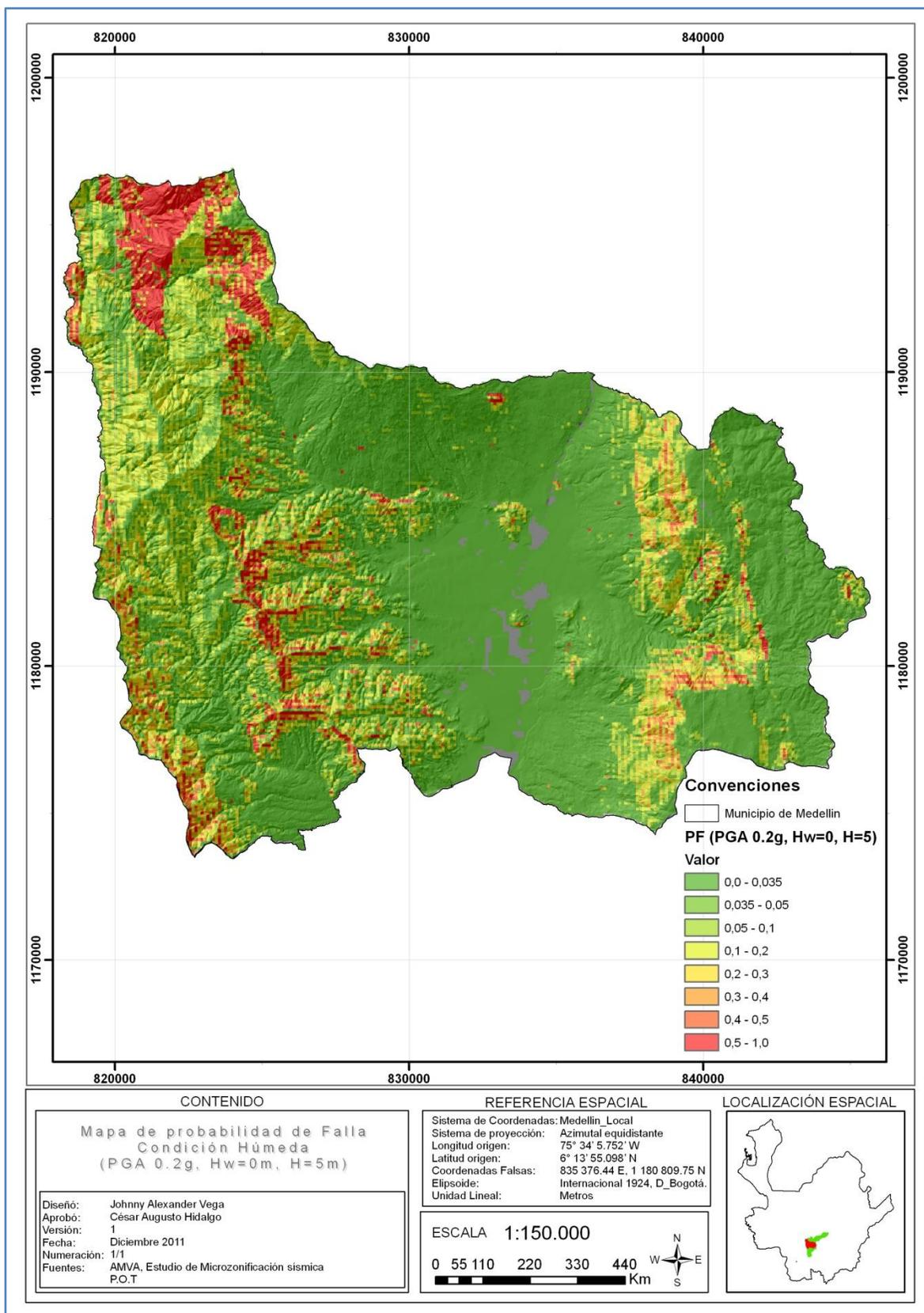


Figura 51. Valores de probabilidad de falla para PGA=0,2g (Condición húmeda)

#### 8.2.4.2. Probabilidad de falla en condición saturada

Con el mismo procedimiento del apartado inmediatamente anterior, se evaluó el índice de confiabilidad ( $\beta$ ), con superficie de falla a 5m de profundidad en condiciones saturadas ( $H_w=5$ ).

Asumiendo una distribución normal, se calculó la probabilidad de falla de cada pixel como se ilustra en la Figura 54. En el Anexo digital 5 se presentan los valores numéricos de las probabilidades de falla de cada pixel. Cabe anotar que también se evaluó considerando una distribución lognormal, ver Anexo digital 5, observándose que los resultados con la distribución normal son más conservadores.

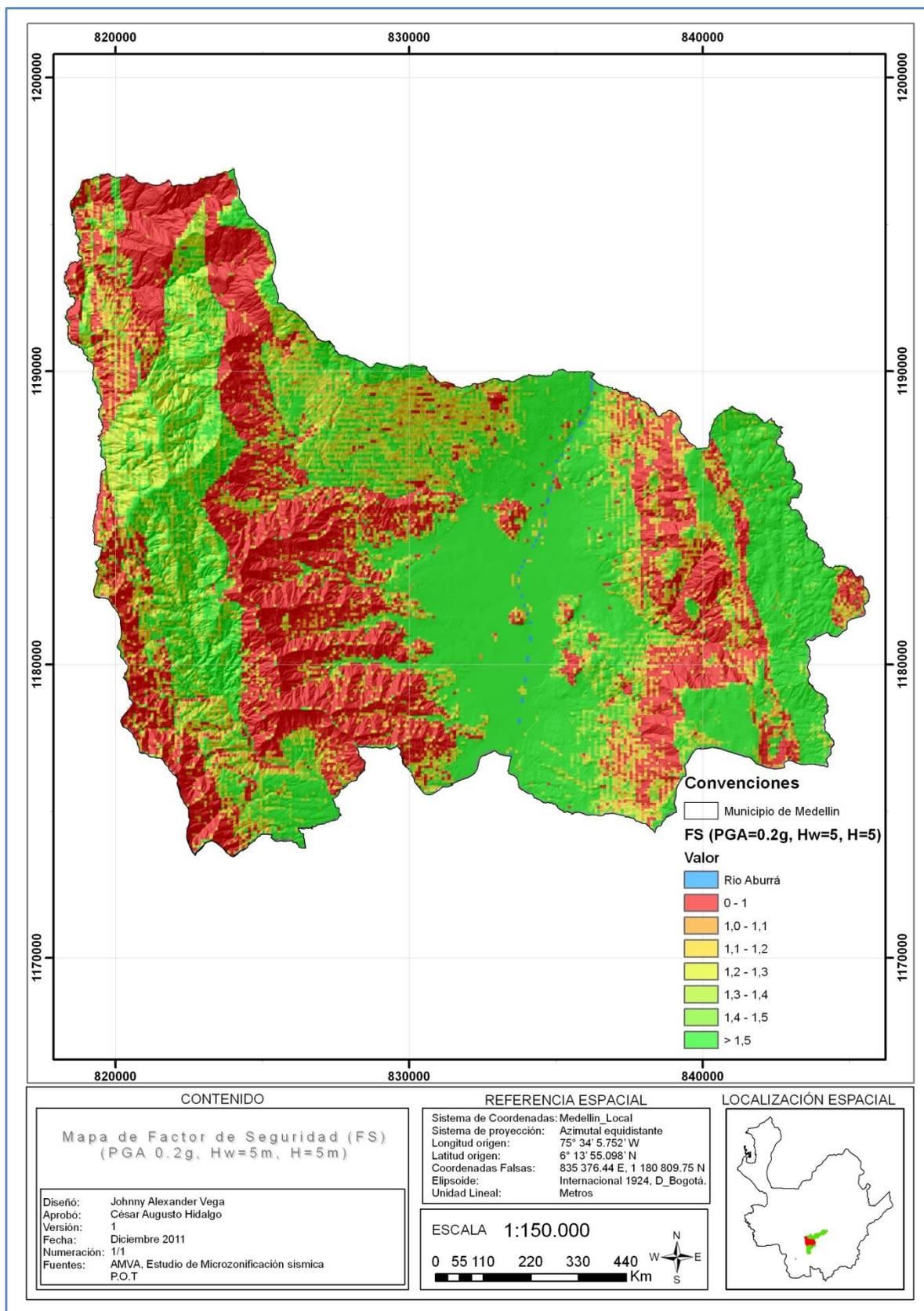


Figura 52. Valores del factor de seguridad para PGA=0.2 (Condición saturada)

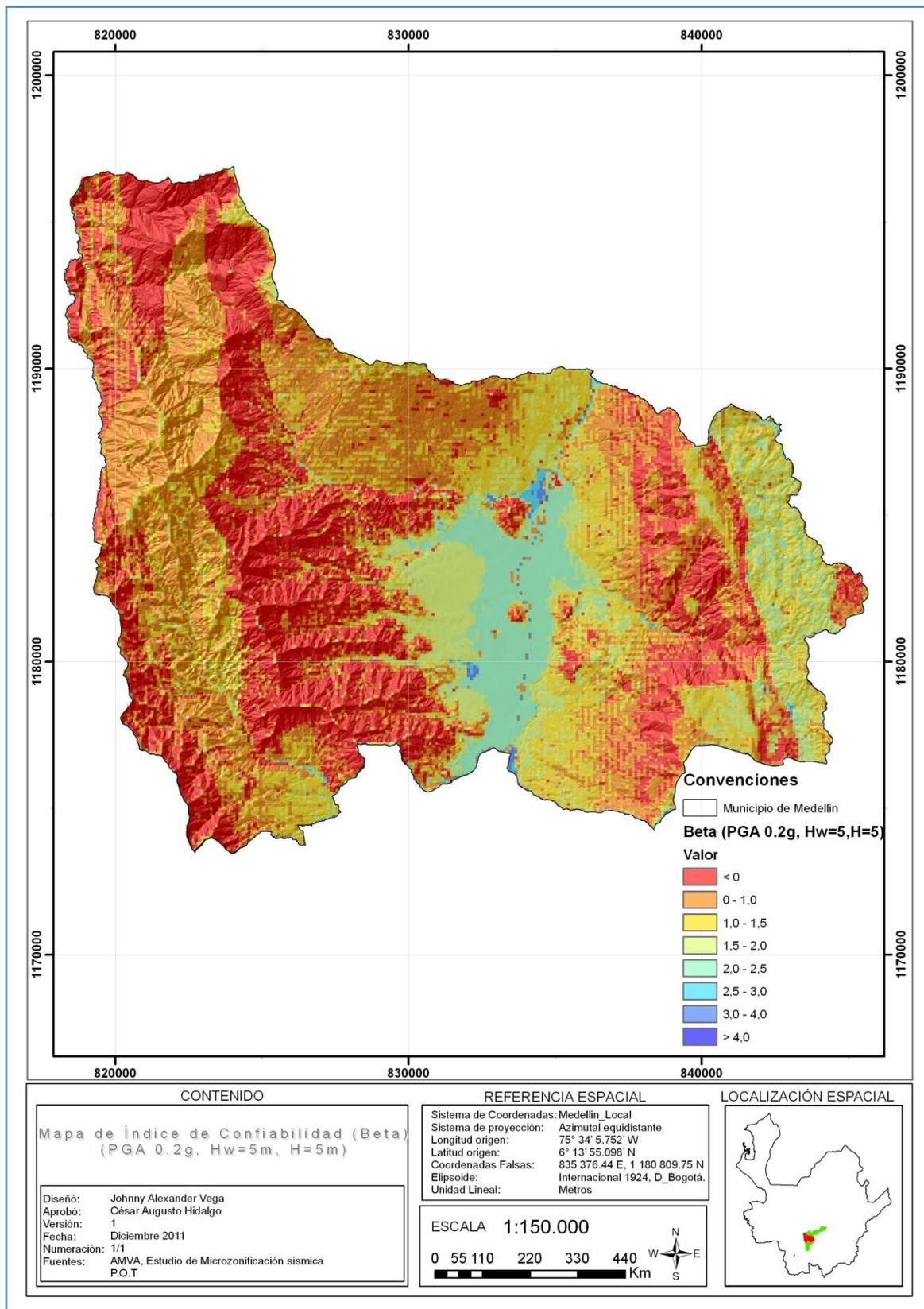


Figura 53. Valores del índice de confiabilidad para PGA=0.2g (Condición saturada)

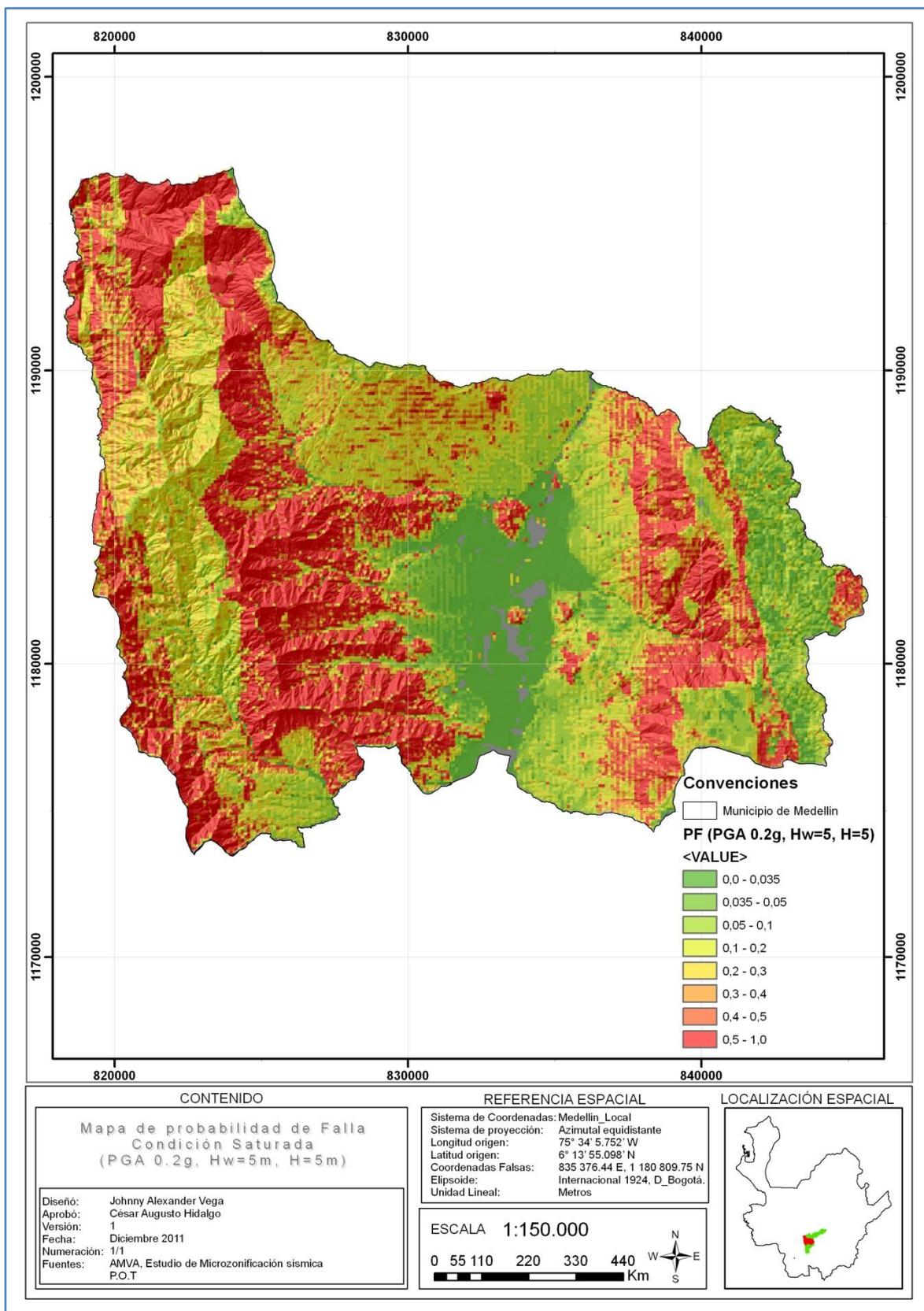


Figura 54. Valores de probabilidad de falla para PGA=0,2g (Condición saturada)

### 8.2.5. Probabilidad de falla total

Con la probabilidad obtenida de saturación del suelo por la precipitación, presentado en la Figura 23, junto con las probabilidades de falla en condición húmeda y saturada calculadas anteriormente, se calcula la probabilidad total de falla de cada pixel usando la ecuación 26, con lo cual se obtienen mapas de probabilidad total de falla para un valor de PGA de 0.2g, como el mostrado en la Figura 55.

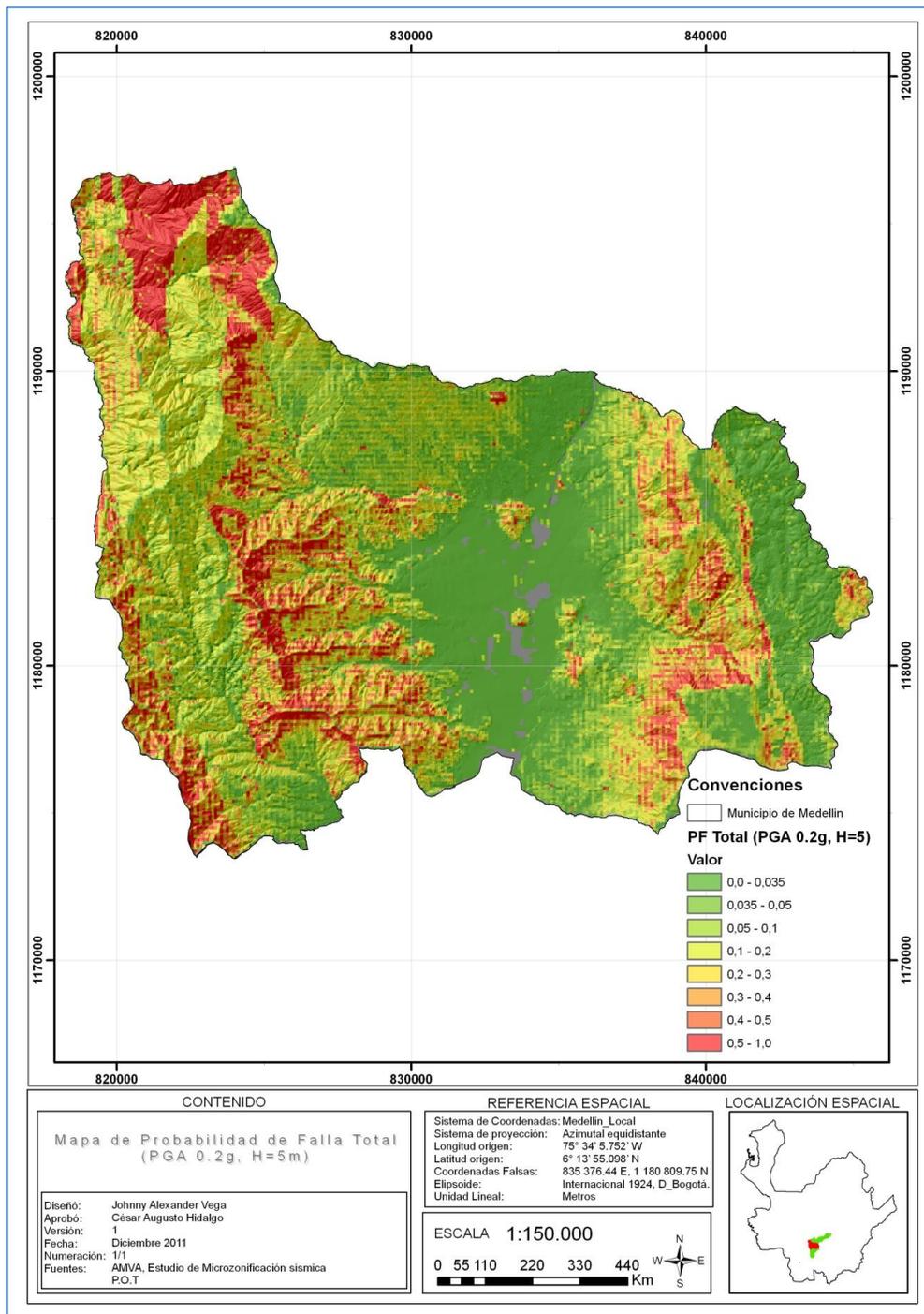


Figura 55. Distribución de la probabilidad de falla total para PGA=0.2g

### 8.2.6. Comparación de las aceleraciones críticas con los valores de PGA

Las aceleraciones críticas calculadas se compararon con las aceleraciones pico (PGA) previstas para el Valle de Aburrá. Los valores de PGA fueron obtenidos del Estudio de Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Metropolitana (AMVA 2007), para un periodo de retorno de 475 años.

Para esto se digitalizó y georreferenció la imagen presentada en dicho estudio y luego se convirtió a formato raster obteniendo la imagen mostrada en la Figura 56. La comparación se realizó identificando las zonas donde la aceleración crítica era menor que el valor de PGA esperado. En la Figura 57 y Figura 58, se presentan los resultados obtenidos para el suelo húmedo y saturado respectivamente.

Se observa que existen zonas donde las aceleraciones PGA que se espera que puedan ocurrir para el sismo de 475 años de periodo de retorno, pueden superar las aceleraciones críticas, particularmente en condiciones saturadas. Esto muestra que es probable que se generen movimientos de masa en caso de que ocurra un evento de estas características.

Las zonas rojas de la Figura 57 y Figura 58, corresponden a aquellas zonas susceptibles de deslizamiento de masas de tierra puesto que la aceleración pico efectiva (PGA) es mayor o igual a la aceleración crítica (AC).

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos sobre las celdas que presentan valores de aceleración pico superiores o iguales a la aceleración crítica, y se muestra la variación de dichos resultados según la altura del nivel freático, al igual que su área de cubrimiento respecto al área total del municipio.

<b>Condición</b>	<b>Celdas (PGA&gt;=AC)</b>	<b>Área afectada (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% Incremento</b>	<b>% respecto al Área Municipio</b>
<b>Hw=0</b>	3704	37,0	-	9,7
<b>Hw=5</b>	14227	142,3	384,1	37,4

<b>Área Municipio (Km<sup>2</sup>)</b>	380,3
--	-------

**Tabla 12. Comparativo de celdas que presentan valores de PGA mayor o igual a AC según la variación del nivel freático medido desde la superficie de falla y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio**

Según los resultados de la Tabla 12, es claro que para la condición de saturación del suelo se puede presentar una condición de inestabilidad del terreno en aproximadamente el 37% del territorio total de la ciudad.

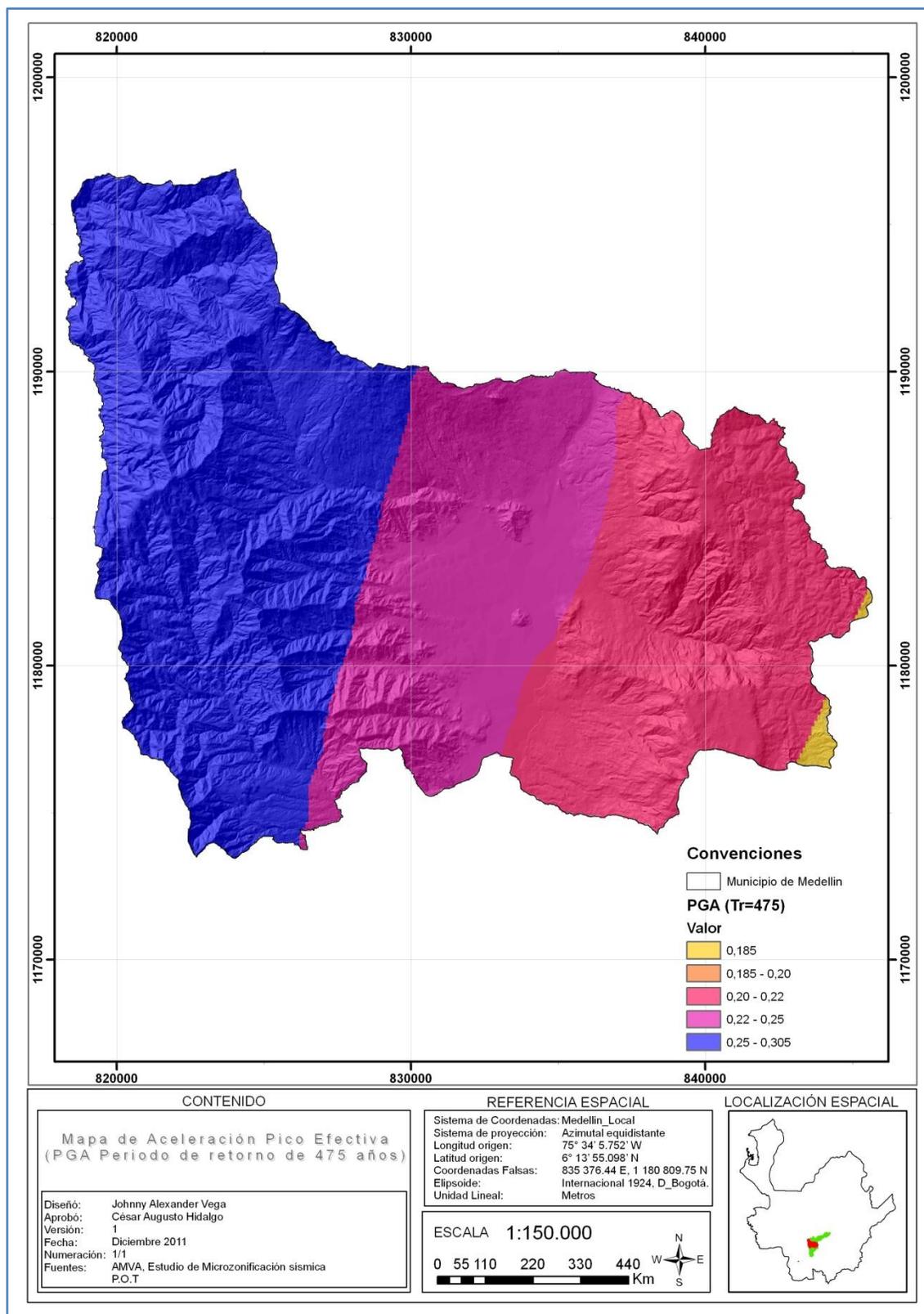


Figura 56. Distribución de zonas de iguales valores de PGA para 475 años de periodo de retorno

Fuente: Elaboración propia modificada de AMVA (2007)

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

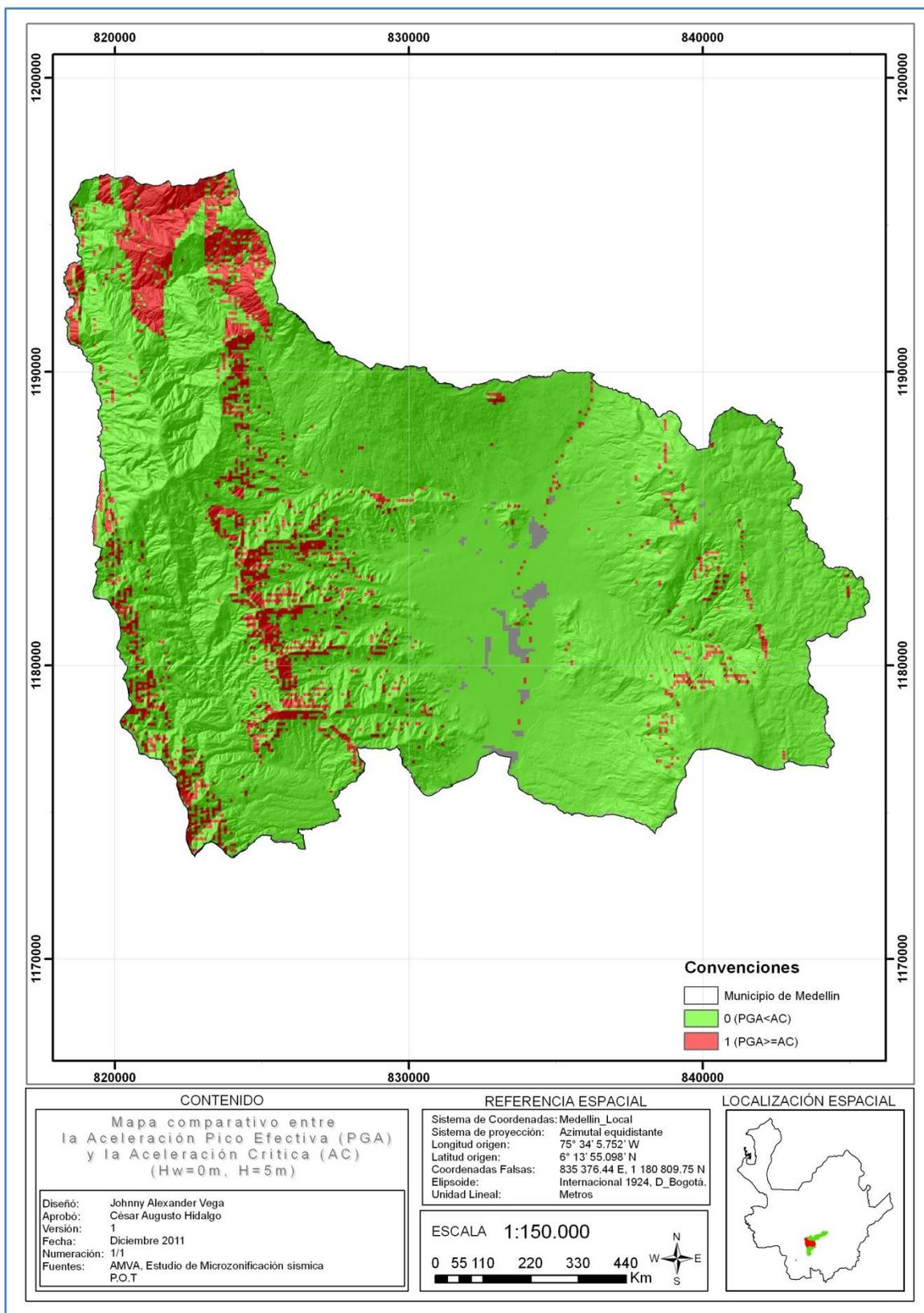


Figura 57. Comparación de valores de AC y PGA en condiciones húmedas

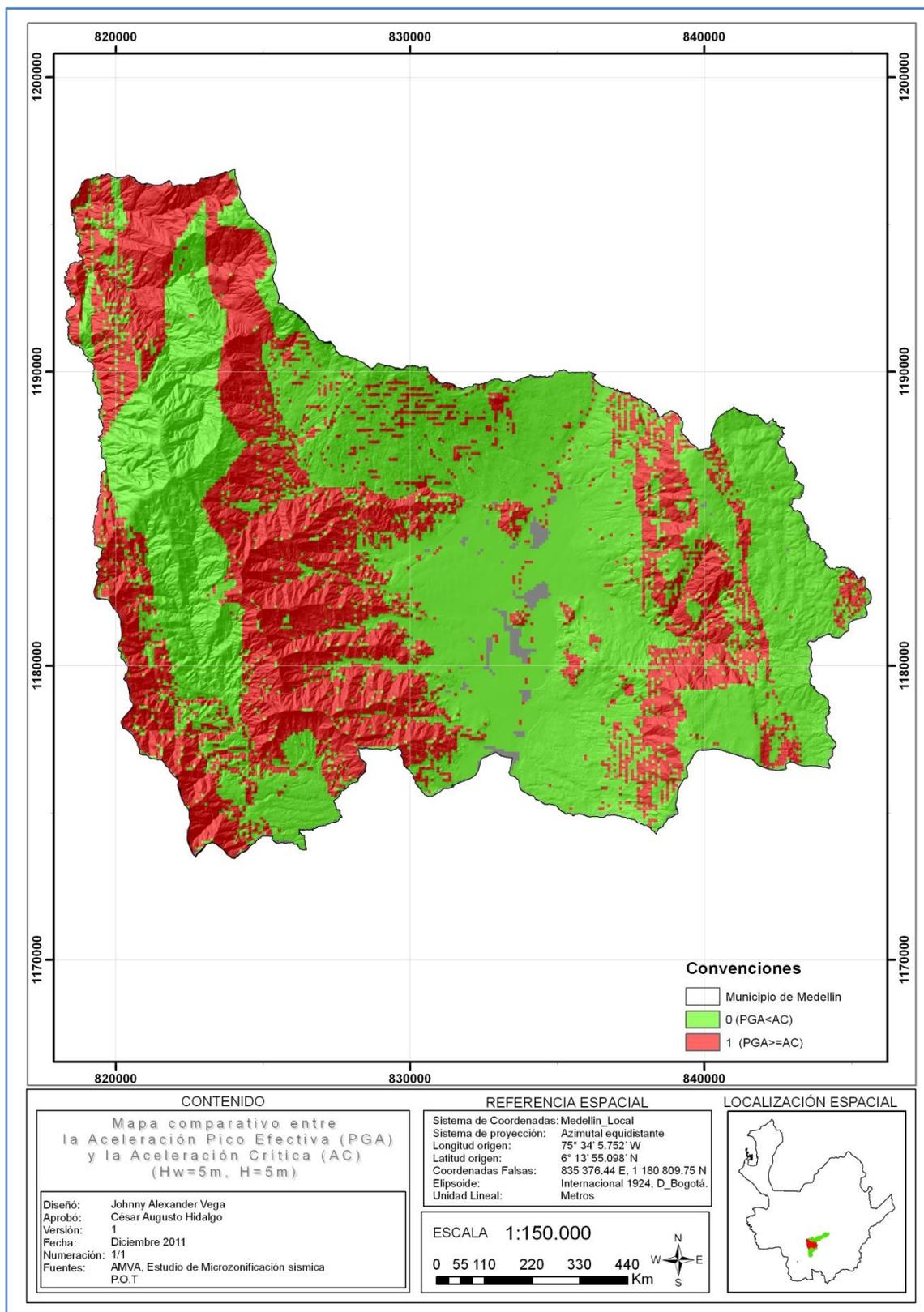


Figura 58. Comparación de valores de AC y PGA en condiciones saturadas

### 8.2.7. Desplazamiento de Newmark (DN) asociado a los deslizamientos

De acuerdo a la ecuación 11, se calculó el desplazamiento de Newmark (*DN*) una vez calculada la Intensidad de Arias (*IA*) a partir de la ecuación 10, para un sismo de duración de 20 segundos y una aceleración pico del suelo de 0,2g.

En la Figura 59 se presentan los resultados obtenidos del desplazamiento para una condición húmeda ( $H_w=0m$ ), y en la Figura 60 para una condición saturada ( $H_w=5m$ ), en la cual se resaltan en color rojo aquellos resultados de *DN* que son superiores a 5 cm, valor definido como umbral en el apartado 7.1.2, ya que valores superiores a dicho valor implican potencialmente la aparición de deslizamientos, aunque tales resultados de *DN* no representen por si mismos valores exactos de las deformaciones esperadas, sino índices de dichas deformaciones.

En ambas figuras se muestra una marcada tendencia para los valores que superan el umbral, en sentido noreste, la cual está asociada a las características propias del territorio, a los materiales de la zona y a sus parámetros geomecánicos.

De acuerdo a la Figura 60 y a la Tabla 13, se valida la premisa de que un estado de saturación en el suelo, establece una condición de desfavorabilidad en las laderas, ya que como se aprecia en dicha figura, los desplazamientos obtenidos luego de la acción del sismo son mucho mayores que para una condición del suelo en estado natural o húmedo. Esto se debe a que la presencia de agua origina un aumento de la presión de poros reduciendo el esfuerzo efectivo y a su vez, esta disminución del esfuerzo efectivo en el suelo trae como consecuencia una disminución del confinamiento reduciendo la resistencia al corte que es directamente proporcional al confinamiento de la masa de suelo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las celdas que presentan valores de *DN* superiores a 5 centímetros, valor considerado como umbral en el apartado 7.1.2., y su variabilidad de acuerdo a la posición del nivel freático. Así mismo se indica el cubrimiento de cada caso respecto al área total del municipio.

<b>Condición</b>	<b>Celdas (DN&gt;5 cm)</b>	<b>Área afectada (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% Incremento</b>	<b>% respecto al Área Municipio</b>
<b>(PGA=0,2g H<sub>w</sub>=0 H=5)</b>	207	2,1	-	0,5
<b>(PGA=0,2g H<sub>w</sub>=5 H=5)</b>	4532	45,3	2189,4	11,9

<b>Área Municipio (Km<sup>2</sup>)</b>	380,3
--	-------

**Tabla 13. Comparativo de celdas con DN superiores a 5 centímetros y su variación de acuerdo a la posición del nivel freático y su área de cubrimiento respecto al área total del municipio**

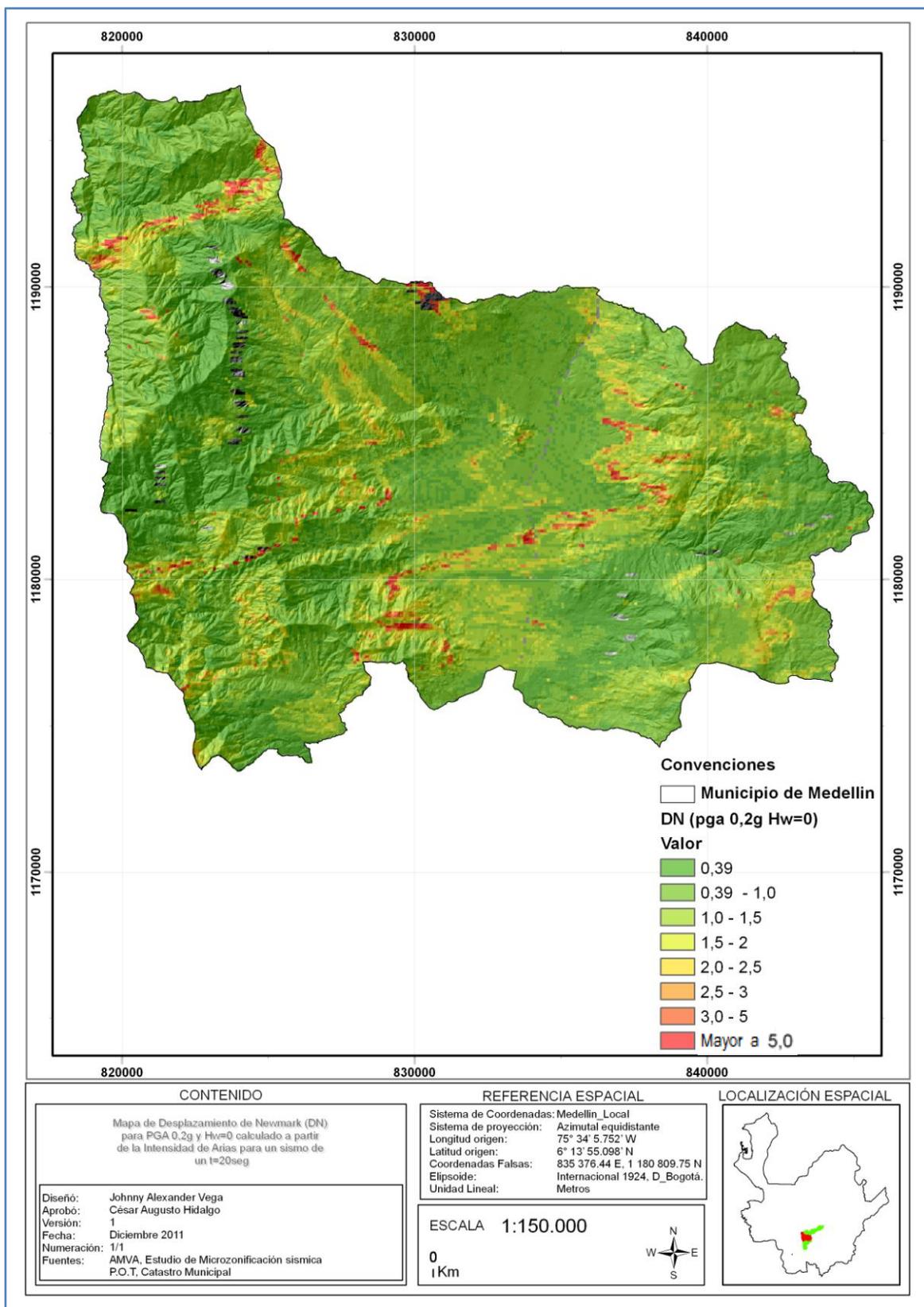


Figura 59. Valores de DN calculados a partir de la Intensidad de Arias para un sismo de duración t=20 s, PGA 0,2g Condición húmeda.

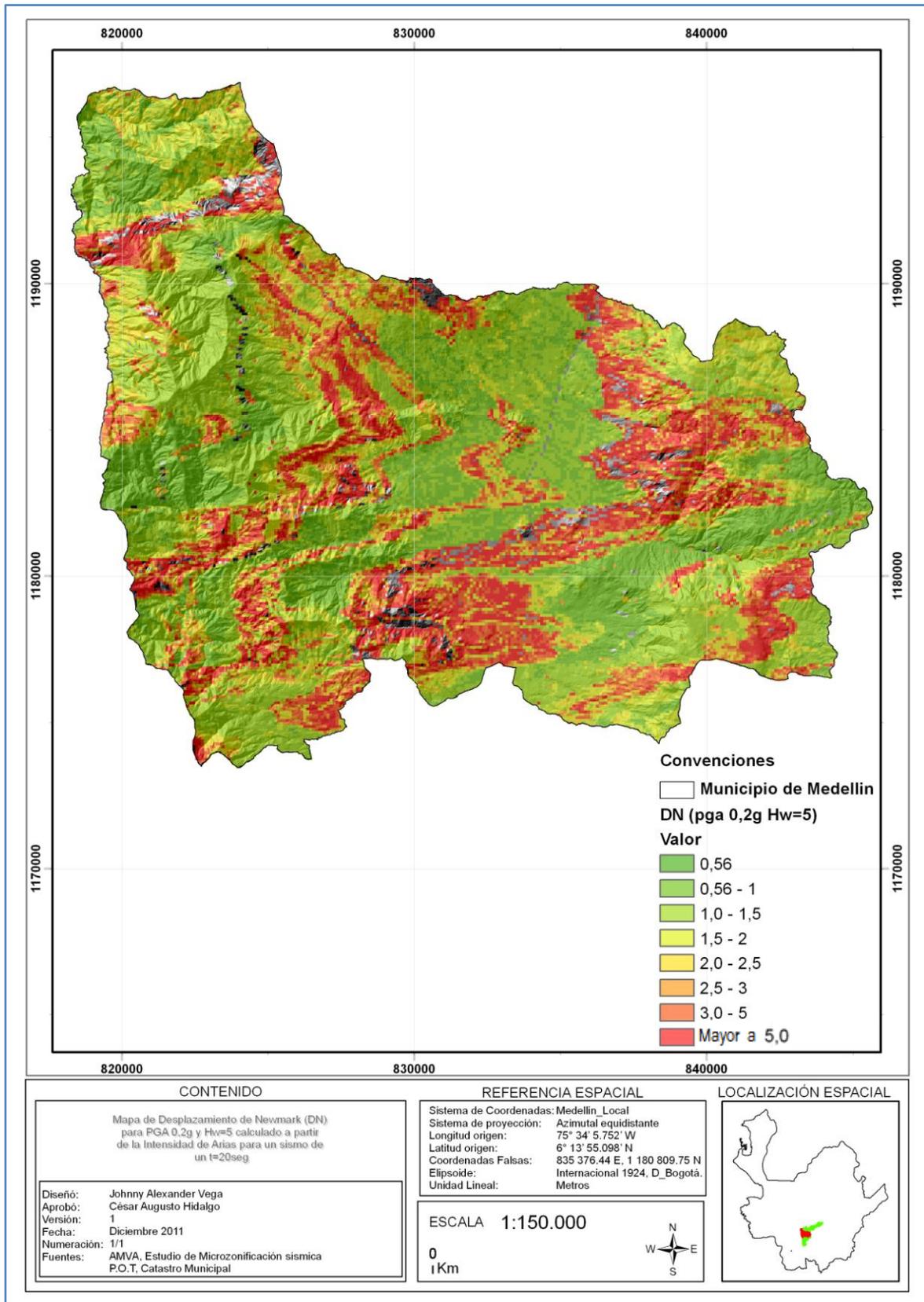


Figura 60. Valores de DN calculados a partir de la Intensidad de Arias para un sismo de duración t=20 s, PGA 0,2g Condición saturada.

### 8.2.8. Vulnerabilidad de las edificaciones de la zona de estudio

En la Figura 61 se presentan los resultados obtenidos para el Índice de Vulnerabilidad Ponderado (*IVP*), el cual considera el efecto de diafragma que generan las cubiertas de entrepiso de concreto, en el comportamiento estructural de las viviendas, tal cual se indicó en el apartado 7.5.

Es claro que debido a la influencia conjunta de condiciones desfavorables de cada atributo considerado, desde el punto de vista de la fragilidad estructural de las viviendas de la zona de estudio se presentan altos valores de vulnerabilidad en todo el sector nororiental de la ciudad, tal cual se aprecia en la Figura 61.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

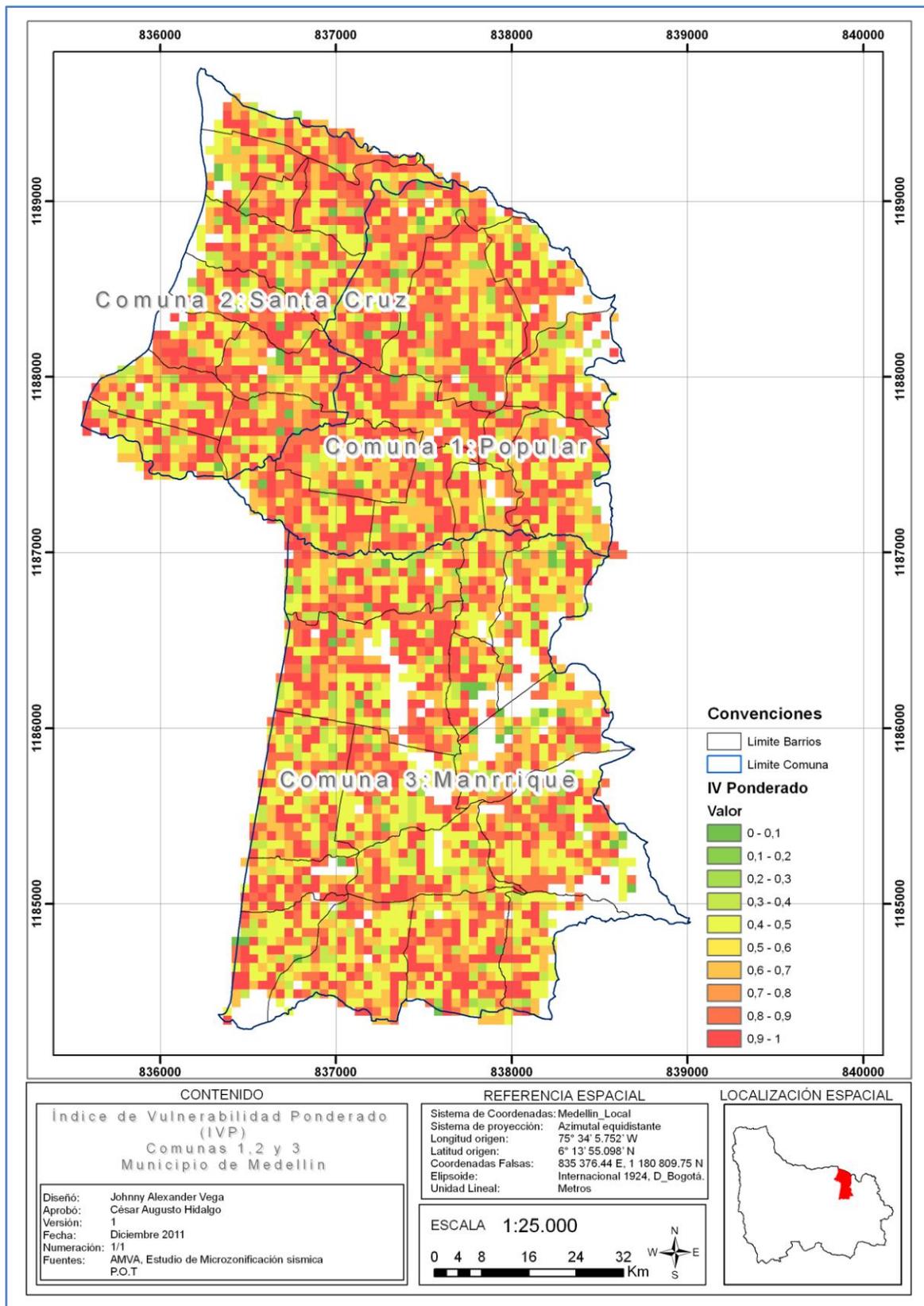


Figura 61. Índice de Vulnerabilidad Ponderado (IVP)

### 8.2.9. Susceptibilidad de falla de las edificaciones de la zona de estudio debido a deslizamientos de masa

De acuerdo a lo planteado mediante la ecuación 3, es posible obtener el riesgo asociado a los daños que puede llegar a ocasionar un deslizamiento de masa accionado por un evento sísmico en las viviendas de la zona de estudio. Esto es, calculando el producto de la Probabilidad de Falla Total por el Índice de Vulnerabilidad Ponderado y por los costos suscitados por tal desastre. Cuando no se consideran los costos suscitados por el desastre, lo que se obtiene en el primer producto de la ecuación 3, se considera “Susceptibilidad de Falla” y los resultados de tal operación se presentan en la Figura 62.

En la Figura 62 se puede apreciar que los valores más altos de susceptibilidad de falla dentro de la zona de estudio se presentan en el costado oriental, que corresponden efectivamente a las zonas de mayores pendientes.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

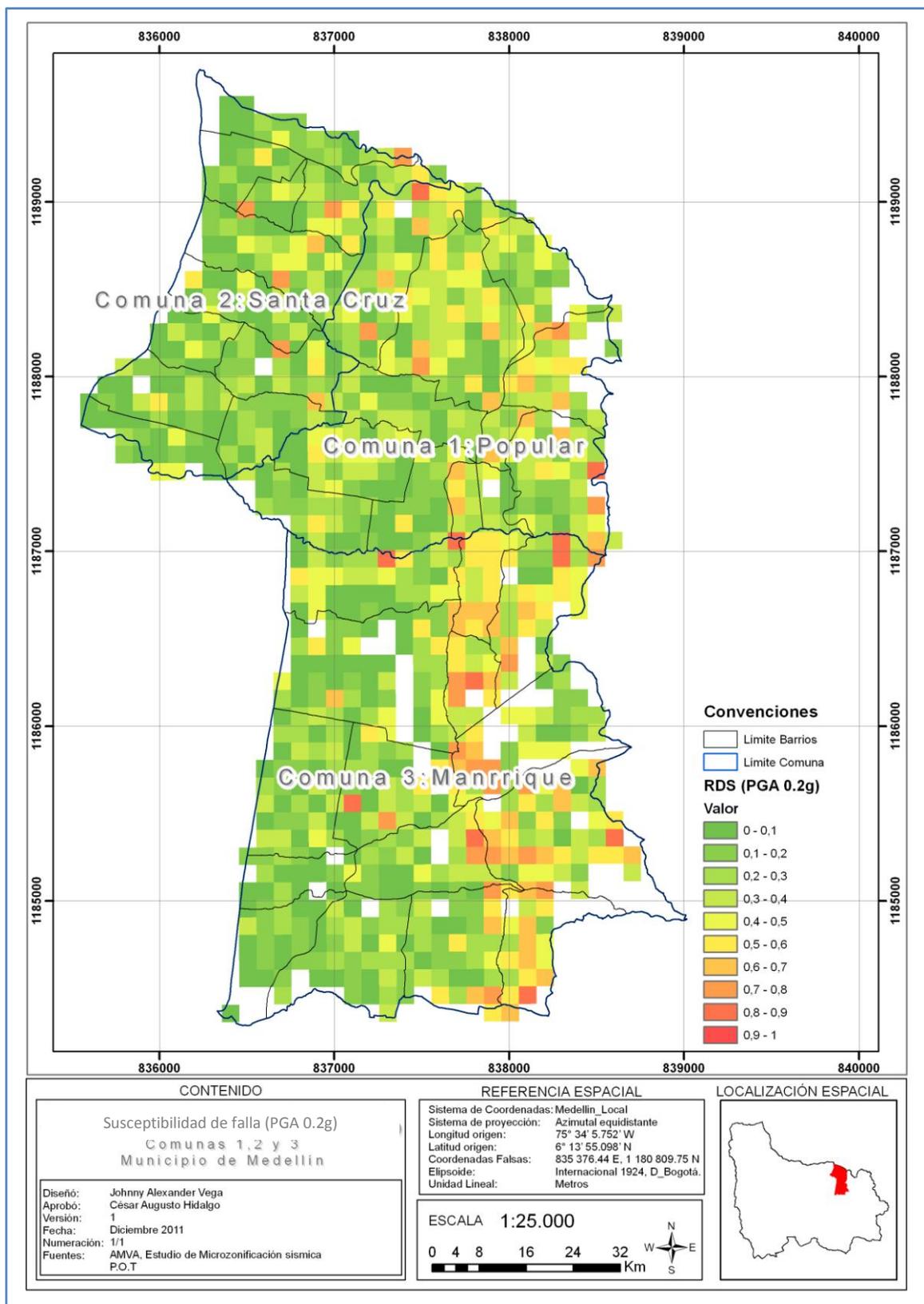


Figura 62. Susceptibilidad de falla de las edificaciones de la zona de estudio.

### 8.2.10. Riesgo y Costo suscitado por la probabilidad de eventos catastróficos en la zona de estudio. Pérdida máxima probable.

Como se indicó anteriormente, empleando la ecuación 3 se calcula el riesgo asociado a los daños que puede llegar a ocasionar un deslizamiento de masa accionado por un evento sísmico en las viviendas de la zona de estudio, mediante el producto de la Probabilidad de Falla Total por el Índice de Vulnerabilidad Ponderado y por el costo de las viviendas afectadas por el desastre. Los valores de las viviendas son obtenidos a partir de los registros catastrales, tal cual se indicó en el capítulo 8.

En la Figura 63 se presentan los resultados obtenidos del Riesgo suscitado por la probabilidad de falla de las edificaciones en la zona de estudio, en las cuales se observa una correspondencia en el costado oriental de la zona de estudio, con los valores obtenidos de Susceptibilidad de Falla en el mismo costado. Se puede apreciar que sobre el costado oriental de la zona de estudio se puede llegar a presentar pérdidas que superan los tres millones de pesos, considerando un sismo de 0,2g.

A parte de calcular los parámetros de interés con un valor de PGA de 0,2g, se realizaron varias simulaciones para otros valores de PGA (0, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 1.0), con el objetivo de modelar el efecto del sismo detonante, y analizar la influencia y variabilidad presentada en los costos suscitados por un eventual deslizamiento accionado por dicho sismo. Los resultados de tales simulaciones se pueden apreciar tanto en la Figura 64 como en la Tabla 14.

Los resultados de las probabilidades de falla totales para los diferentes valores de PGA se pueden apreciar en el Anexo digital 6.

En la Figura 64 se aprecia la curva de costos suscitados por la probabilidad de eventos catastróficos en la zona de estudio, la cual considera la pérdida máxima probable para una Susceptibilidad de Falla mayor al 50%, la cual se obtuvo mediante análisis y consultas espaciales desarrolladas sobre la plataforma SIG. En dicha gráfica se puede observar la pérdida esperada en millones de pesos, para cada valor de aceleración pico de suelo considerado en el desarrollo del presente trabajo, al igual que el número de celdas que presentaron una condición de Susceptibilidad de Falla superior al 50%.

Es claro de la Figura 64, que una vez superada la aceleración pico de 0,2g, que corresponde a la aceleración esperada para el municipio de Medellín de acuerdo a la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10), las pérdidas se incrementan considerablemente con un comportamiento casi exponencial hasta valores de 1g.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

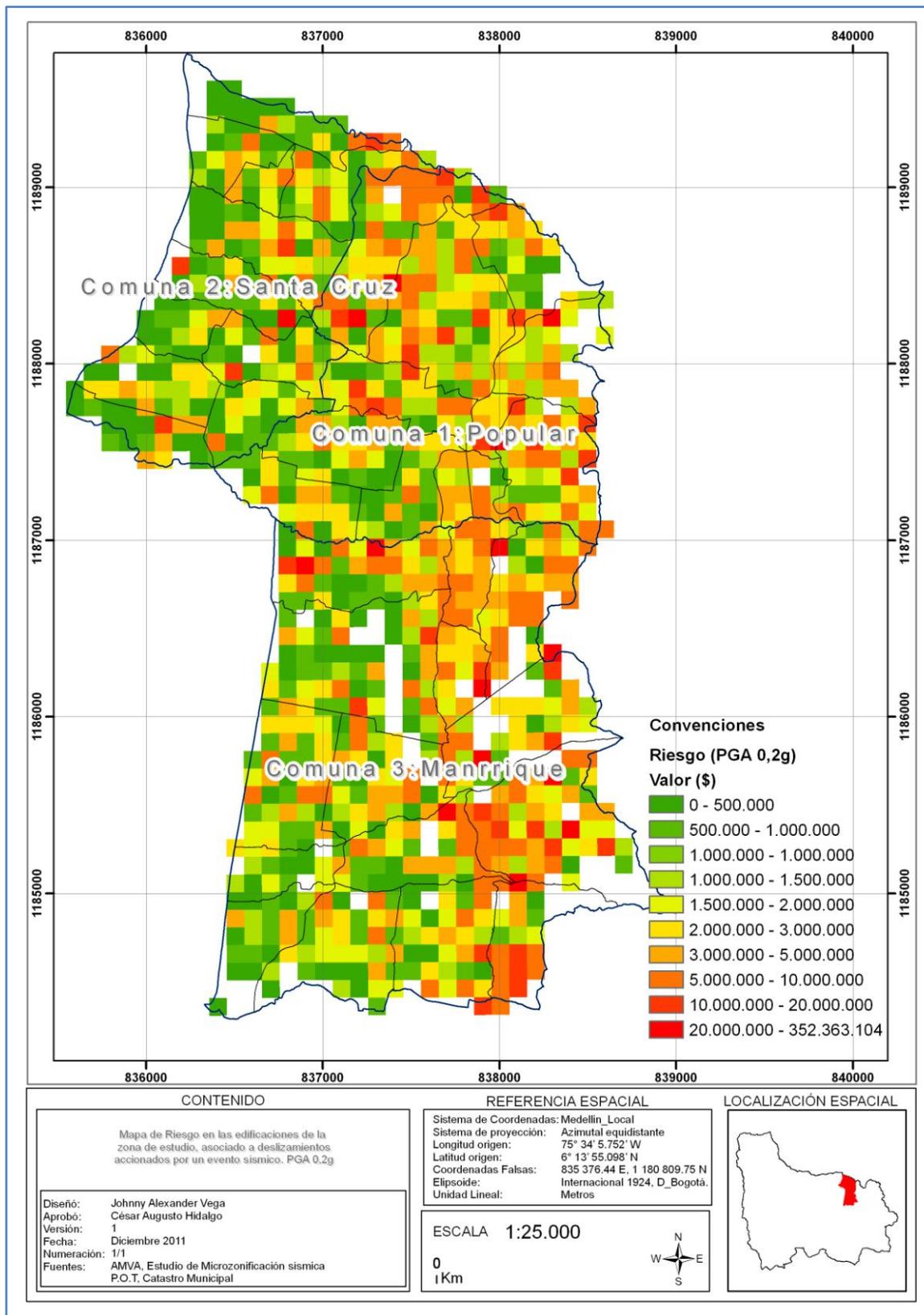


Figura 63. Riesgo suscitado por la probabilidad de falla de las edificaciones en la zona de estudio dado que se presenta un deslizamiento como consecuencia de un evento sísmico

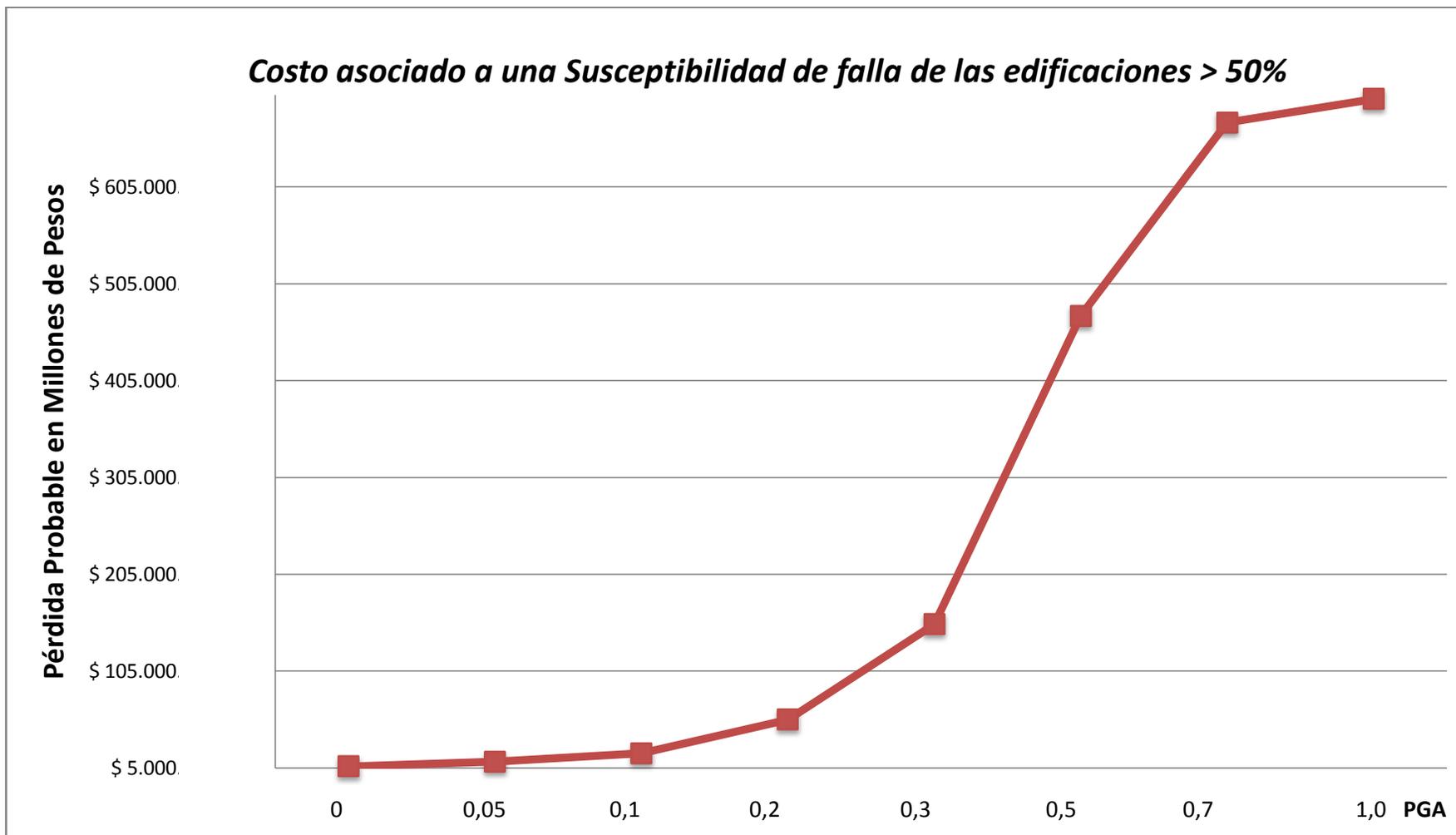


Figura 64. Costos suscitados por la probabilidad de eventos catastróficos en la zona de estudio. Pérdida máxima probable para una Susceptibilidad de falla >50%.

<b>PGA</b>	<b>Costo (Millones de Pesos)</b>	<b>Celdas con Susceptibilidad de falla &gt; 50%</b>
0,0	\$ 6.963	599
0,05	\$ 11.741	1013
0,1	\$ 20.297	1756
0,2	\$ 55.207	4647
0,3	\$ 153.498	12797
0,5	\$ 471.652	38531
0,7	\$ 671.280	54562
1,0	\$ 695.713	56612

Tabla 14. Variabilidad en los costos de acuerdo a diferentes valores de PGA. Pérdida máxima probable para una Susceptibilidad de falla >50%

### 8.3. Validación de los resultados del modelo

#### 8.3.1. Comparación de resultados obtenidos de puntos críticos respecto a estudios geológicos en la zona de estudio.

Se identificaron los sitios que presentan las peores condiciones de estabilidad, determinados como aquellas celdas que presentaron factores de seguridad menores que 1.0 en condiciones saturadas y con aceleración PGA de 0 y 0.2g. En la Figura 65 se presenta la localización de las zonas que presentaron tales condiciones.

Se observa que existe coherencia entre la localización de los sitios críticos identificados con el modelo y las condiciones cualitativas que normalmente se le atribuyen a estas zonas. Igualmente, se compararon estos sitios con los resultados de las perforaciones en lugares críticos identificados para el área urbana del municipio (Figura 66), por parte de los geólogos de la empresa Ingeniería, Tecnología e Instrumentación S.A.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

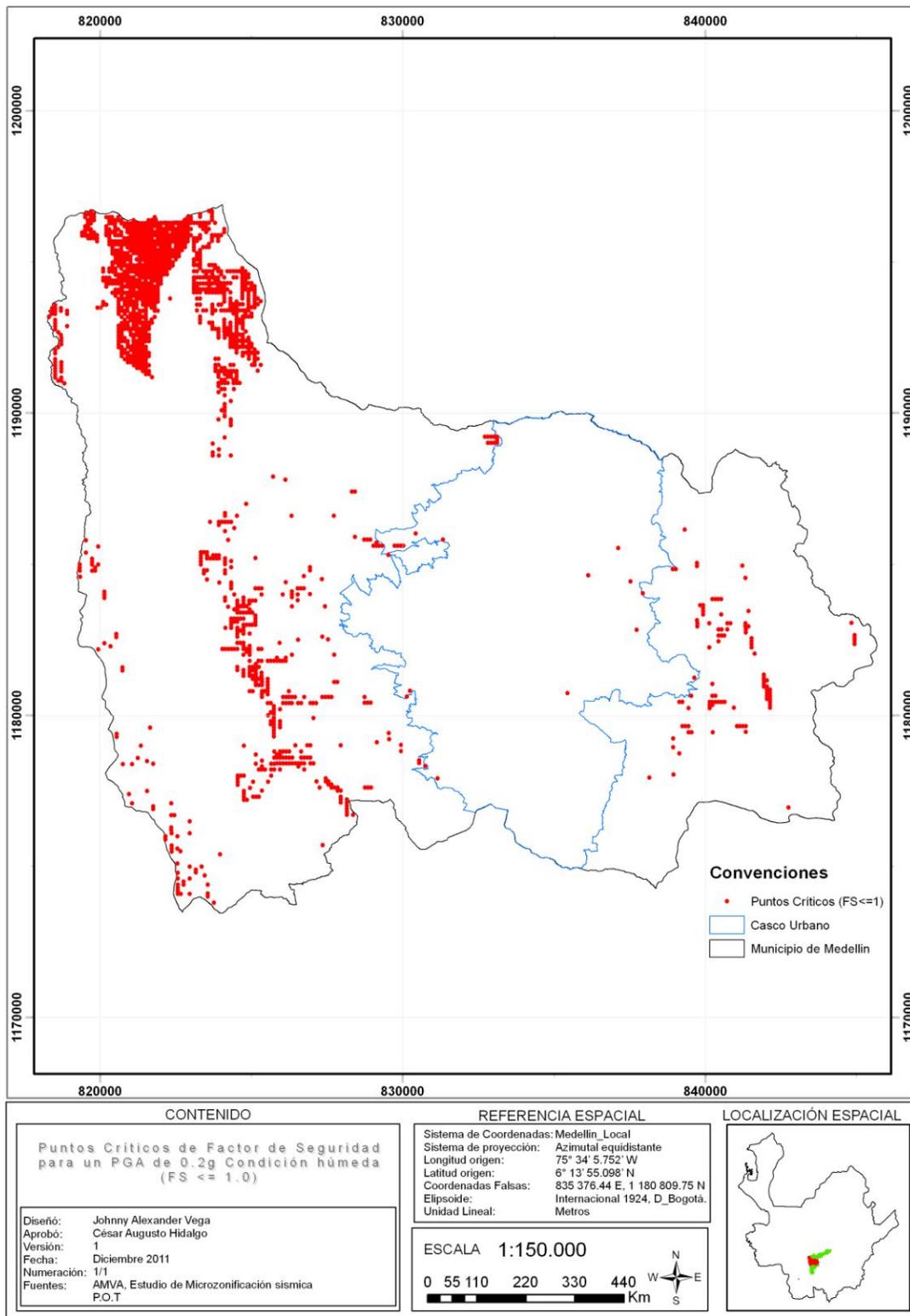
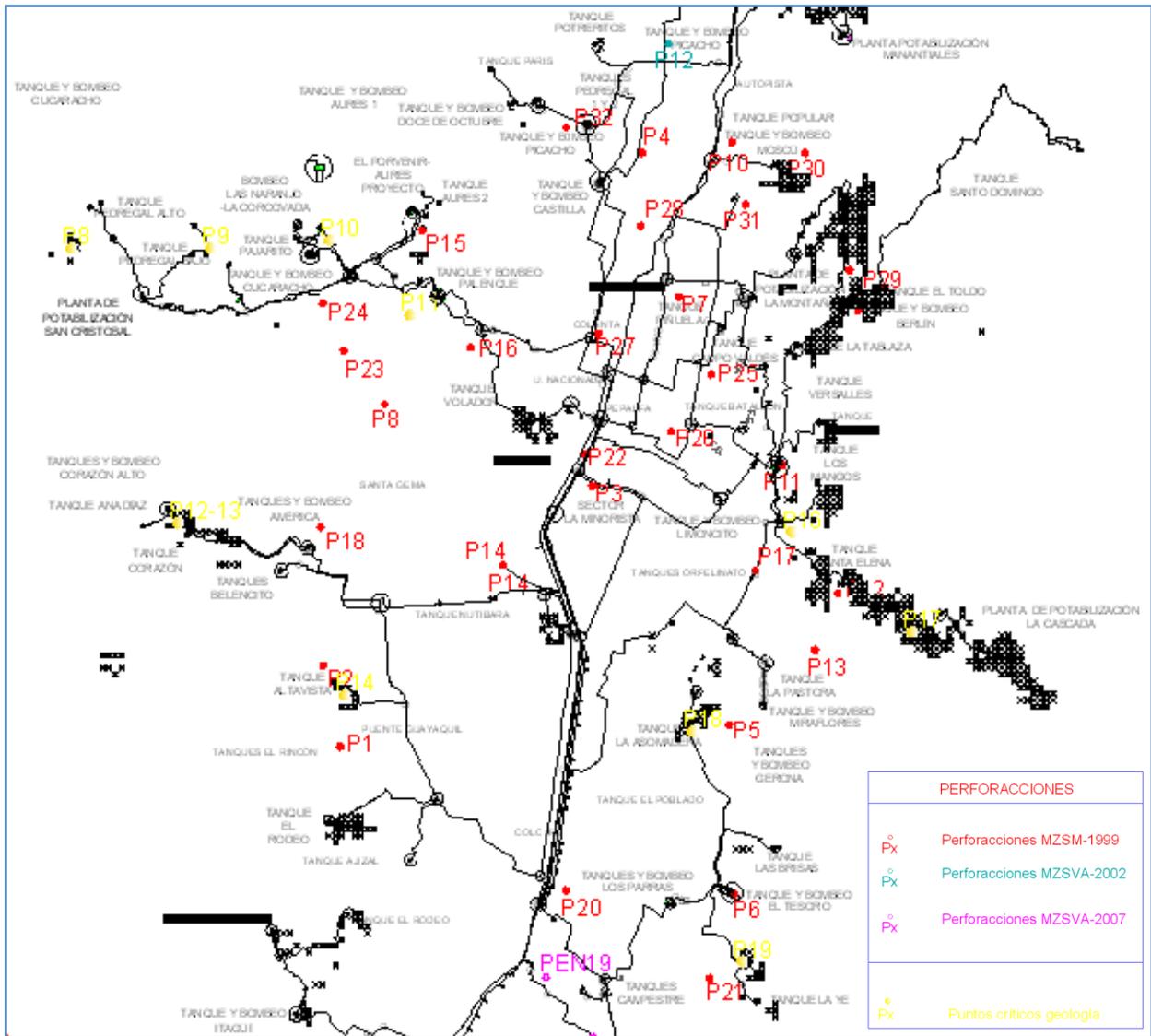


Figura 65. Localización de puntos críticos en condiciones saturadas para un PGA = 0.2g



**Figura 66. Lugares críticos identificados por geólogos**  
 Fuente: Informe y mapa de Puntos Críticos. Empresa INTEINSA (2012).

### 8.3.2. Comparación de resultados obtenidos con respecto al Proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín

En la fase final del proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (GSM 1999), se realizó la ejecución de los mapas de susceptibilidad al deslizamiento asociado a sismo considerando el comportamiento intrínseco de los diferentes tipos de materiales que componen el territorio urbano, sus propiedades geotécnicas, así como la pendiente característica del terreno y la altura del nivel freático. Este análisis se realizó tanto para una condición estática de estabilidad, como una condición dinámica que tuvo en cuenta la influencia de la aceleración máxima esperada a nivel de suelo, de acuerdo a los efectos locales de cada zona, y la acción de dicha aceleración como detonante de un deslizamiento.

Cabe destacar que este análisis se realizó empleando un mismo árbol de inferencia, en el cual solo se consideraron las zonas consideradas como susceptibles a sufrir deslizamientos, de acuerdo a un rango de pendiente, en este caso, pendientes superiores a  $12^\circ$ , y a una superposición de capas bajo un ambiente SIG.

En la Figura 67 y Figura 68, se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación, correspondientes al análisis de susceptibilidad de falla en una escala de probabilidad entre 0 y 1, agrupándola en cinco tipos:

[1] Muy baja (0-0,05), [2] Baja (0,06-0,20), [3] Media (0,21-0,40), [4] Alta (0,41-0,50) y [5] Muy Alta ( $> 0,5$ ), para poder compararla con los resultados del proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica.

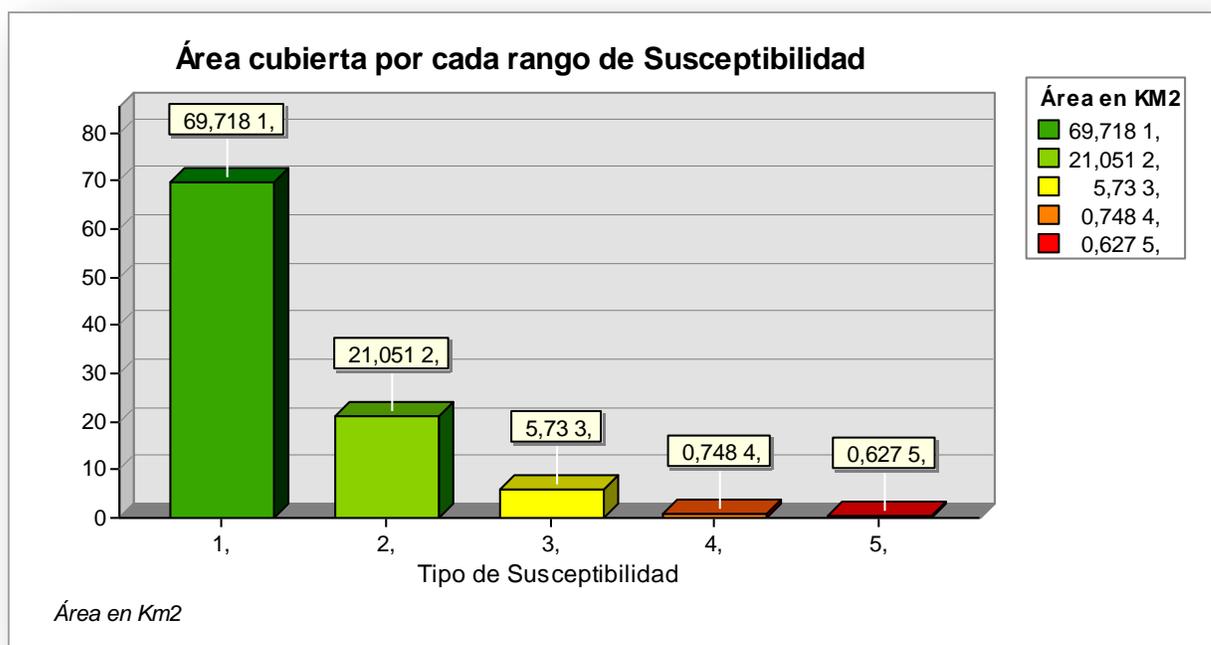


Figura 67. Área del casco urbano de Medellín cubierta por cada tipo de Susceptibilidad a deslizamiento.

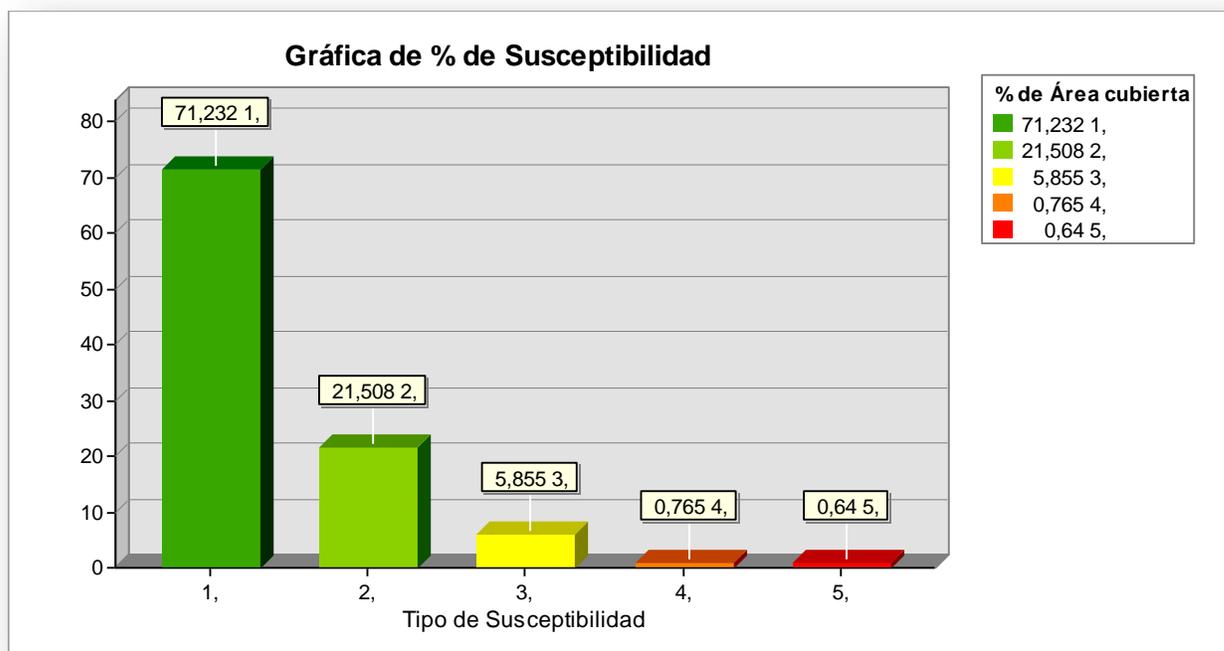


Figura 68. Porcentaje del Área urbana de Medellín cubierta por cada tipo de Susceptibilidad a deslizamiento.

De acuerdo a la Figura 67 y Figura 68, se puede apreciar los resultados obtenidos, en donde aproximadamente un 71.2% del territorio del municipio de Medellín, presenta un grado de susceptibilidad a deslizamientos en masa muy baja, aproximadamente un 27.3% presenta un grado de susceptibilidad entre baja y media, y un restante 1.5% presenta una susceptibilidad alta y muy alta.

Estos resultados presentan una gran similitud con los resultados obtenidos en la fase final del proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (GSM 1999) y presentados en la Figura 70 y la Figura 71, puesto que de acuerdo a los resultados obtenidos mediante dicho análisis dinámico, se encontró que en un 74.4% se presenta una susceptibilidad baja y muy baja, correspondiente a las zonas de pendientes bajas. El 14.1% de la ciudad presenta susceptibilidad media y corresponde a la zona centro oriental de la ciudad y parte de la comuna noroccidental. El 10.3% corresponde a zonas de susceptibilidad alta y el 1.2% corresponde a zonas de muy alta susceptibilidad a deslizamientos, correspondiente a los extremos centro occidental, suroccidental y nororiental de la ciudad, sector más propenso al fenómeno de deslizamientos, debido al factor de amplificación definido para dicha zona.

En la Figura 69 se puede apreciar, aparte de la correspondencia de resultados antes enunciada, que existe una correspondencia geográfica de las zonas de susceptibilidad, en la cual son muy marcadas las zonas de baja susceptibilidad correspondientes a las zonas de planicies aluviales y las zonas de alta y muy alta susceptibilidad en las laderas predominantes de la ciudad, y que corresponde a una combinación de condiciones críticas como por ejemplo la pendiente, la presencia del nivel freático cerca de la superficie y la litología de la zona.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

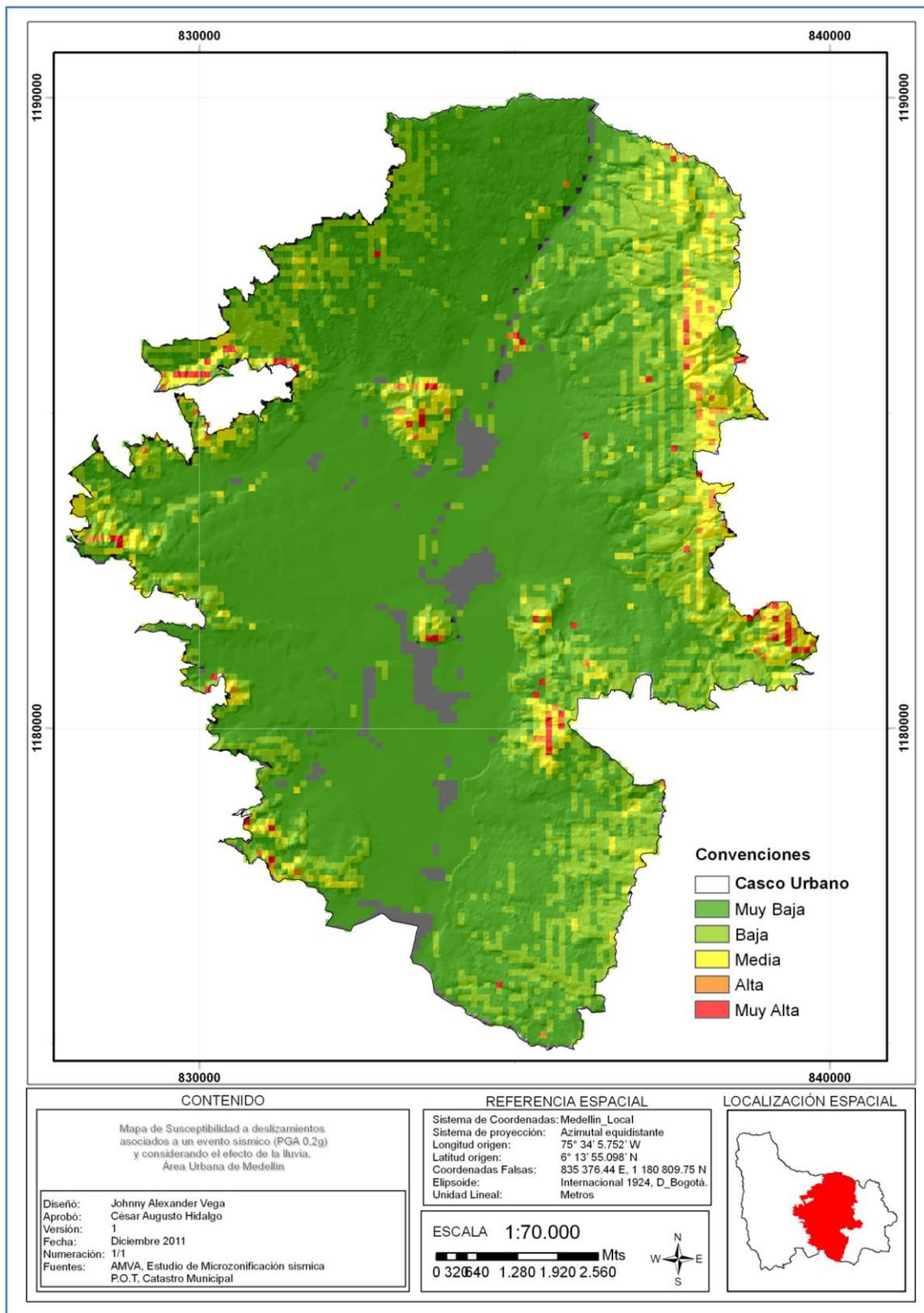


Figura 69. Susceptibilidad a deslizamiento para un evento sísmico de 0,2g.

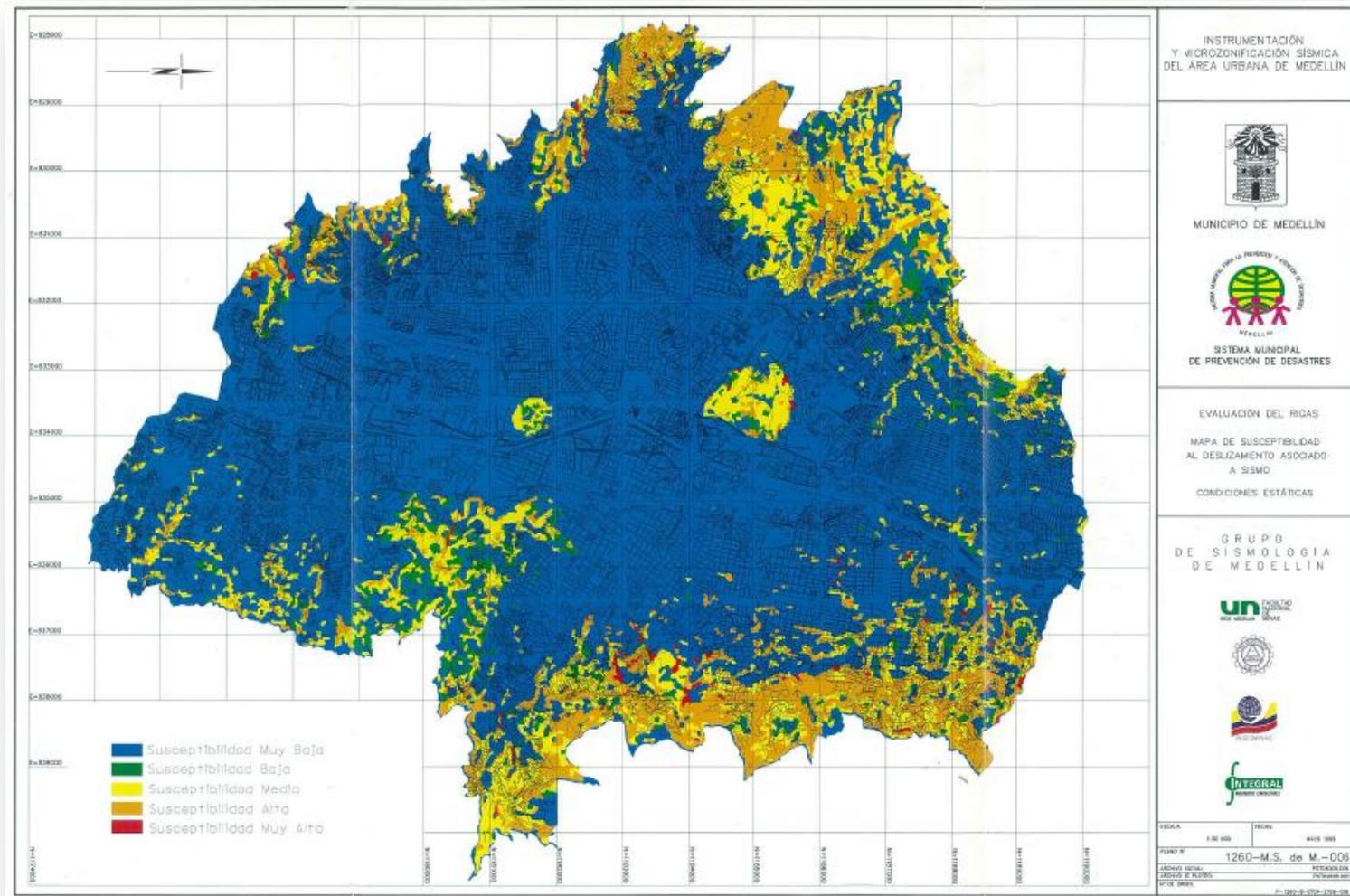


Figura 70. Mapa de susceptibilidad al deslizamiento asociado a sismo. Condiciones estáticas.  
Fuente: Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín (GSM 1999)



### 8.3.3. Comparación de resultados obtenidos con respecto al Estudio de Zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en el Valle de Aburrá.

La Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA y el municipio de Envigado, realizaron un estudio sobre la Zonificación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales (AMVA 2009), mediante la implementación de un modelo basado en redes neuronales artificiales (RNA), el cual incorpora variables como la geología, geomorfología, uso del suelo, topografía, permeabilidad, y registros de las series de tiempo para los registros de lluvia en diversas estaciones distribuidas en todo el territorio de interés, con el objetivo de establecer la relación entre éstos y la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, tomando la lluvia como factor detonante de dichos movimientos.

De acuerdo al estudio mencionado se recopiló la información disponible para los municipios del Valle de Aburrá sobre las siguientes variables: geología, geomorfología, usos del suelo, topografía y precipitación, y se representó cada variable como un mapa para incorporarlo en un Sistema de Información Geográfica. Así mismo, se compiló información de los inventarios de movimientos en masa de los últimos 20 años, obtenida de los registros del Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres (SIMPAD) y del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Proyecto DESINVENTAR), con los cuales se alimentó una base de datos para la modelación con RNA's, y el entrenamiento y validación de dicho modelo neuronal.

Los resultados del presente trabajo no son comparables cuantitativamente con los obtenidos por el estudio de zonificación realizado por la Universidad Nacional y los demás participantes de dicho proyecto, puesto que el parámetro detonante del movimiento de masa considerado es la lluvia, y para el presente trabajo el detonante principal evaluado es un evento sísmico. Sin embargo, es posible hacer una comparación cualitativa de la localización geográfica de los potenciales escenarios en los que puede presentarse un deslizamiento de tierra.

Para efectos de la comparación cualitativa mencionada, es preciso convertir la probabilidad de falla total mostrada en la Figura 55, a una probabilidad de falla anual, puesto que la que se calculó mediante la ecuación 26 y expuesta en el apartado 8.2.5., corresponde a un periodo de retorno ( $Tr$ ) de 475 años y un PGA de 0.2g. Para ello, se recalculó el valor de cada celda (pixel) del mapa de la Figura 55, multiplicándolos por un factor ( $1/Tr$ ), es decir, ( $1/475$ ). El resultado se puede apreciar en la Figura 72.

De acuerdo a los resultados del estudio del AMVA (2009) presentados en la Figura 73, las mayores probabilidades anuales de ocurrencia de movimientos en masa, se presentan tanto en la zona noroccidental del área urbana del municipio, que el estudio define como zona de poca influencia de la lluvia, pero con malos hábitos de construcción sumados a unidades geológicas, geomorfológicas y pendientes desfavorables, como en el costado oriental del área urbana del municipio, principalmente debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada a 15 días y las pendientes del terreno, y en menor medida a factores antrópicos.

De acuerdo a los resultados presentados en la Figura 72, se aprecian similares resultados a los expuestos anteriormente, donde es notoria la semejanza en el costado oriental del municipio en la cual por la

combinación de los factores adversos detonantes como un evento sísmico y la lluvia, generan las mayores probabilidades de ocurrencia de un evento catastrófico. Así mismo, se aprecian similitudes en algunos puntos específicos, en especial en el costado noroccidental y en los cerros El Volador y Nutibara.

Es realmente notorio que la mayor parte del suelo urbano de la ciudad presenta en general pendientes de terreno medias, y que se presentan muy poca cantidad de procesos asociados a este tipo de amenaza, y que por tanto cualquier tipo de ocurrencia se da principalmente debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada a 15 días.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

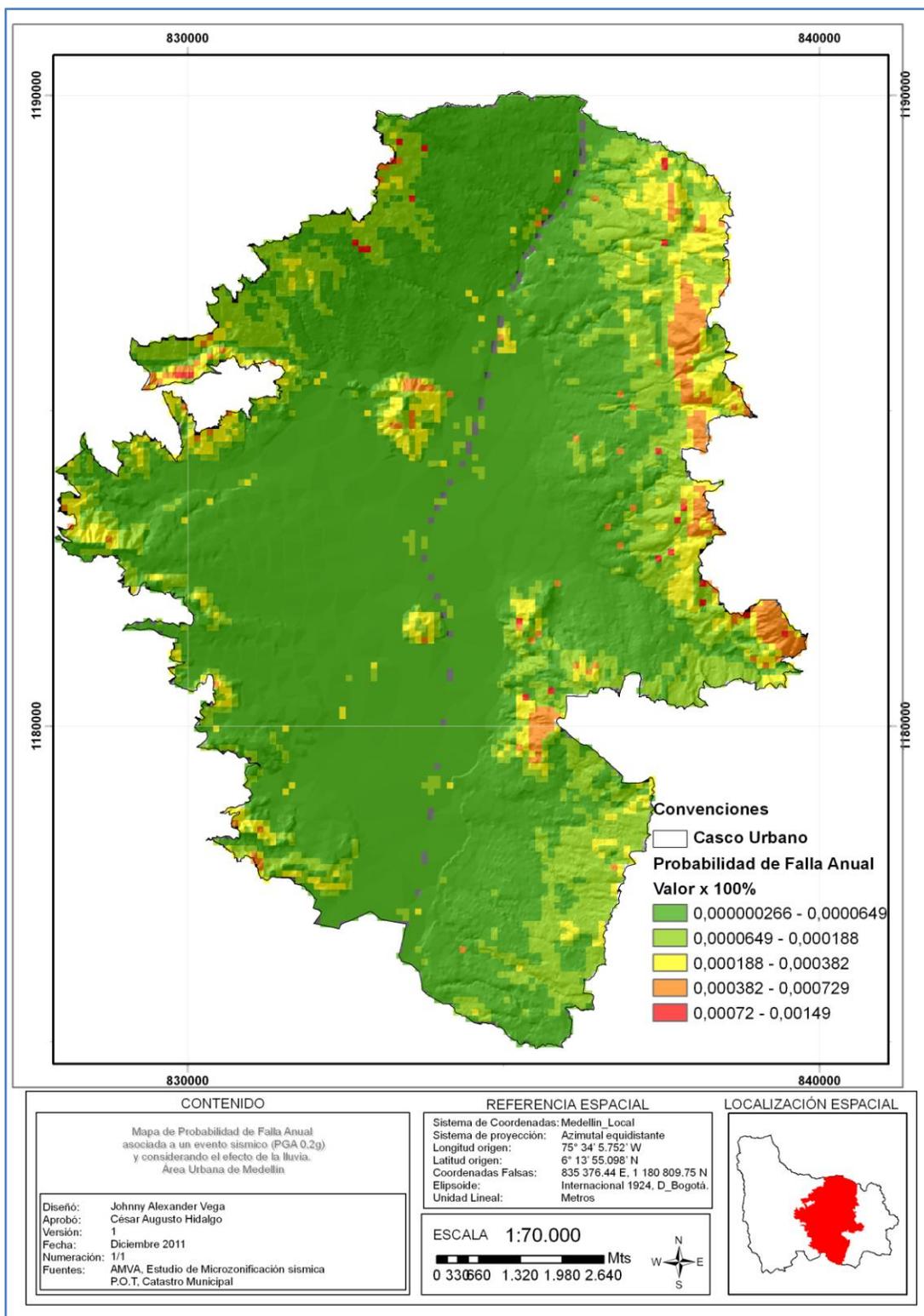


Figura 72. Mapa de Probabilidad de Falla Total Anual obtenida en la investigación.

[Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas.]

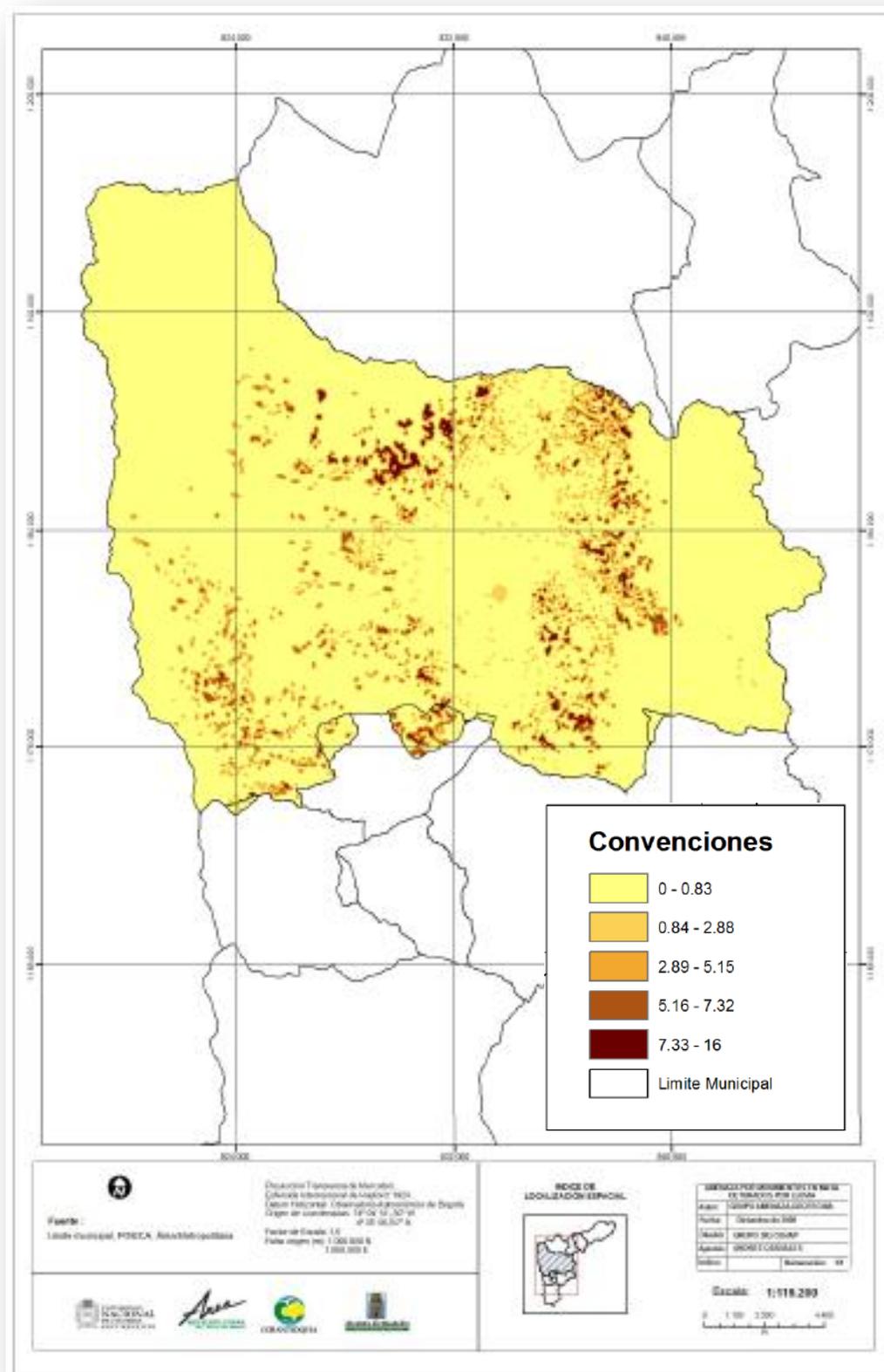


Figura 73. Mapa de amenaza de movimientos en masa en el municipio de Medellín considerando la lluvia como factor detonante. Probabilidad de movimiento en masa anual (%).

Fuente: AMVA (2009)

## CAPITULO NUEVE

### 9. Conclusiones

Por medio de modelos implementados en software SIG, es posible la modelación y simulación de las variables inherentes a un proceso de deslizamientos de masas de tierra, involucrando diferentes variables que actúan como detonantes del movimiento. Dichas implementaciones tienen como propósito, eliminar la subjetividad en la evaluación de la estabilidad de las laderas, puesto que involucra en este caso, un modelo de base física asociado al análisis, empleando tanto técnicas determinísticas como técnicas probabilísticas.

El modelo propuesto desarrollado bajo una plataforma SIG permite estimar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo en viviendas y/o en la infraestructura urbana, debido a movimientos de masa accionados por sismos, considerando la influencia de las condiciones de saturación del suelo, mediante un análisis de base física de la estabilidad de las laderas y un análisis probabilista de las condiciones de falla y la influencia de la lluvia como agente desestabilizador.

Cabe resaltar la pertinencia de una herramienta computacional como los SIG en este tipo de investigaciones aplicadas, puesto que permiten implementar y modelar varios escenarios (por ejemplo simular diferentes valores de PGA, considerar la variabilidad espacial de los parámetros geomecánicos, considerar diferentes marcos de vulnerabilidad, entre otros), que involucran una gran cantidad de variables, permitiendo modificar fácilmente los parámetros involucrados y ejecutar rápidamente los procesos de análisis espacial, lo cual significa un ahorro significativo de tiempo y capacidad de almacenamiento de la información.

Los resultados obtenidos en esta investigación respecto a los puntos críticos de probabilidad de movimientos de masas en las laderas de estudio, tienen coherencia respecto a los puntos críticos identificados en el mapa de procesos morfodinámicos de la base de datos DESINVENTAR del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que se presentan en la Figura 6, producto de movimientos en masa ocurridos en un intervalo de tiempo de aproximadamente 20 años comprendidos entre 1985-2006, en el que se aprecia que en las zonas críticas identificadas existen movimientos activos como inactivos, y que han presentado episodios de deslizamientos en otras épocas.

Es probable que se presenten movimientos de masa en el caso en que ocurra un movimiento sísmico con las características previstas para la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá, y esta probabilidad se incrementa si los suelos se encuentran saturados.

Así mismo, la adopción de sistemas computarizados de este tipo, permiten su inclusión como precursor o potencializador de sistemas de alerta temprana para la evaluación, atención y prevención de desastres, principalmente en entidades municipales, con lo cual se busca reducir al mínimo la pérdida de vidas humanas principalmente, así como la minimización de daños en la infraestructura urbana.

El método de validación que ha sido empleado en esta investigación radica en la verificación de la compatibilidad entre la respuesta arrojada por el modelo implementado a partir de la base física de estabilidad de taludes y la teoría probabilística, respecto a los resultados presentados en otros estudios de la misma línea de investigación, como lo son el proyecto de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín y el Estudio de Zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en el Valle de Aburrá. Así mismo, se consideraron para el análisis, los eventos de movimientos en masa que han ocurrido en el tiempo del inventario realizado por el SIMPAD.

Cabe destacar que la presente investigación conjuga dos variables principales que actúan conjuntamente como detonante del deslizamiento de masas, como lo son la lluvia y los movimientos sísmicos, mientras que los estudios mencionados para la validación del modelo, solo consideran una de ellas en cada caso.

La implementación y automatización de este tipo de modelos puede ser empleado como una herramienta de planificación para futuras edificaciones y construcciones, de tal manera que se adopte una actitud crítica hacia el cumplimiento de la normatividad relacionada con las condiciones sismo resistentes y de ordenamiento territorial que estipulen las entidades estatales, para garantizar un desarrollo urbano adecuado, seguro y sostenible.

La actividad antrópica también debe ser considerada como una variable dentro de este tipo de modelos, puesto que las actividades desarrolladas por el hombre, tales como tala indiscriminada de cobertura vegetal, inadecuada disposición de aguas residuales, malas técnicas de construcción de las viviendas, asentamientos irregulares, entre otras, pueden generar cambios en el comportamiento de los suelos e incrementar la susceptibilidad a un posible movimiento de masa, cuando se conjuguen diferentes parámetros que se consideran adversos para la estabilidad del terreno.

La inclusión de este tipo de aplicaciones SIG es una propuesta para diversos entes municipales a nivel nacional, en los cuales se pueda implementar de manera práctica y sencilla por los organismos de atención y prevención de desastres de cualquier municipio, haciendo la salvedad de que el modelo sea alimentado con la información cartográfica propia de cada región de estudio.

En síntesis, es clara la utilidad de las herramientas geomáticas para la temática de la gestión del riesgo, pues en cada fase del análisis, desde la captura de la información, su procesamiento, análisis y modelaciones, hasta la presentación de los resultados finales en forma de mapa o reportes, tienen aplicabilidad técnicas como los Sistemas de Información Geográfica, que permiten centralizar la información, modelarla y optimizar el geoprocesamiento de la misma.

## CAPITULO DIEZ

### 10. Proyección de la investigación

Adicionalmente a los factores y generalidades mencionadas, existen otras variables de consideración como el uso del suelo que está asociado al proceso de degradación del terreno, y la curvatura del terreno que es un producto derivado de la topografía, que ofrece información sobre la estabilidad y sobre la susceptibilidad al fenómeno de la lluvia de una ladera.

Es preciso considerar la variabilidad espacial de las propiedades geomecánicas de los diferentes tipos de suelo, ya que para este trabajo se asignó un valor exacto a cada unidad litológica para simplificar la complejidad desde el punto de vista geotécnico, pero mediante técnicas geoestadísticas implementadas en la misma plataforma SIG, puede mejorarse el grado de aproximación a los valores reales de los parámetros considerados en cada Submodelo.

El análisis de este trabajo se centró principalmente en el sector nororiental de la ciudad, razón por la cual se debe extender a toda la extensión del municipio tanto a nivel urbano como rural, con lo cual se pueda implementar una base de datos espacial y un modelo computacional local, para el establecimiento o complementación de los sistemas de alerta temprana de prevención de desastres en la ciudad.

La metodología planteada puede ser aplicable en proyectos lineales de ingeniería, como por ejemplo en la evaluación de riesgos de infraestructura como vías, canales y conducciones, bajo algunas consideraciones especiales de acuerdo al trazado de los mismos y a las condiciones particulares de emplazamiento.

Se pretende implementar el correspondiente modelo bajo una plataforma SIG con licencia libre, de manera que sea asequible para cualquier entidad municipal que no disponga de una gran tecnología ni recursos suficientes para la adquisición de software comercial de altos costos.

## BIBLIOGRAFÍA

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10*. Bogotá – Colombia. 2010.

ALTAREJOS, L. ESCUDERO, I. SERRANO, A. GÓMEZ, M. “Aplicación de métodos probabilísticos de nivel II y de nivel III (simulaciones de Monte Carlo) a la estimación de probabilidades condicionales de fallo de presas de hormigón de gravedad”. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Santiago – Chile. 26 al 30 de Mayo de 2008.

AMVA. Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Publicación Institucional, No. 29, 184 P. 2007.

AMVA. Proyecto en conjunto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con los municipios de Medellín, Envigado, Corantioquia y la Universidad Nacional de Colombia. CONVENIO 4800002397 DE 2007. “AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ. FORMULACIÓN DE PROPUESTAS DE GESTIÓN”. Libro II, 225pp, Julio de 2009.

AMVA. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. [En línea], acceso Junio de 2011; Disponible: [www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co)

ARGÜELLO, M. “Riesgo, vivienda y arquitectura”. Conferencia en el Congreso ARQUISUR, Universidad de San Juan, Argentina. 27 al 30 de Octubre de 2004. Disponible: <http://www.desenredando.org/public/articulos/2004/rva/index.html>

ARISTIZÁBAL E., GAMBOA M. F., LEOZ F. J. “Sistema de Alerta Temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el Valle de Aburrá, Colombia”. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 13, p. 155-169. Julio 2010 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). 2010.

BAECHER, G., CHRISTIAN, J.T. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons. England. 620 pp. 2003.

BENEDETTI D., PETRINI V. “Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione”, *L’industria delle Costruzioni*, No. 18, pp. 66-78. Roma - Italia. 1984.

BOTERO, V. *Geo-information for measuring vulnerability to earthquakes: a fitness for use approach*. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Holanda. 2009.

CARDONA, O. D. “Modelación numérica para la estimación holística del riesgo urbano, considerando variables técnicas, sociales y económicas”. Presentado y publicado en el 1er Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ciencias Sociales. Barcelona – España. 2000.

CARDONA, O. D. *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola tècnica superior de d’enginyers de camins, Canals i ports. Barcelona – España. 2001.

CASTELLANOS, R. *Lluvias Críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa*. Tesis de maestría en geotecnia. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 446 pp. 1996.

CHRISTIAN, J. T. LADD, C. C. and BAECHER, G. B. "Reliability Applied to Slope Stability Analysis". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 12, pp. 2180–2207. 1994.

CORONADO, J.A. *Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistemas de informações geográficas: Aplicação em uma área do eixo cafeeiro Colombiano*. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasil. Outubro 2006.

CROZIER, M. GLADE, T. "Landslide hazard and risk: Issues, Concepts and Approach". In: Glade, T., Anderson, M. & M. Crozier (Eds): *Landslide hazard and risk*.- Wiley, Chichester 1-40. 2005. Disponible: [www.geomorphologie.uni-bonn.de/persons/dr.-thomas-glade/publications\\_view](http://www.geomorphologie.uni-bonn.de/persons/dr.-thomas-glade/publications_view)

DELGADO, J., PELÁEZ, J.A., TOMÁS, R., ESTÉVEZ, A., LÓPEZ, C., DOMÉNECH, C. y CUENCA, A. "Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos: Aplicación a la cuenca de drenaje del Río Serpis (provincia de Alicante)". *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4): 197-218. 2006.

DOMINGUEZ, M. *Geomorfología e inestabilidad de laderas en la cuenca carbonífera central (Valle del Nalón, Asturias)*. Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno. Universidad de Oviedo. Departamento de Geología. 237pp. 2003.

DUQUE, G. *Manual de Geología para Ingenieros*. Capítulo 16: Movimientos basales. Universidad Nacional de Colombia. Manizales – Colombia 2002.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. Página web oficial. [En línea], acceso Enero de 2012; Disponible: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help>

FIGUERAS, S., MACAU, A., GOULA, X., GONZALEZ, M. "Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra". VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24 de Junio de 2005.

FUNVISIS. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. "Susceptibilidad de laderas", [En línea], acceso Agosto de 2011; Disponible: <http://www.funvisis.gob.ve/>

GODT, J.W., SENER, B., VERDIN, K.L., WALD, D.J., EARLE, P.S., HARP, E.L., and JIBSON, R.W. Rapid assessment of earthquake-induced landsliding. en *Proceedings of the First World Landslide Forum*, Tokyo, Japan, Parallel Sessions Volume, International Program on Landslides. November 2008. Disponible en [http://150.217.73.85/wlfpdf/11\\_Godt.pdf](http://150.217.73.85/wlfpdf/11_Godt.pdf).

GSM. Grupo de Sismología de Medellín. Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín. Sistema Municipal Para la Prevención y Atención de Desastres, Alcaldía de Medellín – Colombia. 1999.

HARP, E. and JIBSON, R. "Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake". *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86 (1B) S319-S332. USA. 1996.

HIDALGO, C.A. ASSIS, A. "Herramientas para análisis por confiabilidad en geotécnica: La teoría". Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol 10, N° 18, pp. 69–78, ene-jun, 2011.

HIDALGO, C.A. *Incertezas, Vulnerabilidade E Avaliação De Risco Devido Deslizamento Em Estradas*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília (En elaboración). 2012.

INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Material educativo. [En línea], acceso Noviembre de 2011; Disponible: <http://www.ingominas.gov.co>.

INTEINSA. Ingeniería, Tecnología e Instrumentación S.A. Mapa de puntos geológicos críticos. No publicado. 2012.

JIBSON, R. W., HARP, E. L., MICHAEL J. M. "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps". *Engineering Geology*. 58, 271-289. 2000.

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

LANTADA, M. N. *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona – España. 2007.

MALDONADO, E. GÓMEZ, I. D. CHÍO, G. "Estimación del daño sísmico en edificaciones de mampostería a partir de la aplicación de funciones de vulnerabilidad simuladas". *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, volumen 7, No. 13, pp. 39-56 - ISSN 1692-3324 - julio-diciembre de 2008/164 p. Medellín, Colombia 2008.

MASKREY, A. *Navegando entre brumas. La Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Análisis de Riesgo en América Latina*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. ITDG/LA RED. 344 p. 1998.

Municipio de Medellín. [En línea], acceso Junio de 2011; Disponible: [www.medellin.gov.co](http://www.medellin.gov.co)

MILES, S.B. KEEFER, D.K. "Seismic landslide hazard for the city of Berkeley, California". *US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-2379; /mf/2001/2378*. 2001.

MORENO, C. I. MÚNERA, A. M. "Riesgos y vulnerabilidad: un enfoque de actuación en lo urbano". Texto publicado en *Ensayos FORHUM* No. 15. Medellín - Colombia. 2000.

NEWMARK, N. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique*, 15:2, 139-159. 1965.

Organización de la Naciones Unidas (ONU). *Vivir con el Riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD). Volumen II. 139pp. Ginebra – Suiza. Versión 2004.

PELLING, M. *Vulnerability of Cities: Natural disasters and social resilience*. Earthscan Publications. London. 212pp. 2003.

Prevention Web. Disaster risk reduction. Página web oficial. [En línea], acceso Junio de 2011. Disponible: <http://www.preventionweb.net/english/professional/maps>. 2012.

RESTREPO, L. F. SIERRA, M. C. PÉREZ, M. L. “Probabilidad de licuación y deslizamiento ante un evento sísmico, basado en la teoría de confiabilidad”. III Congreso Colombiano de ingeniería sísmica. II Congreso Nacional y VIII Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica Colombia, Nacional, Universidad del Valle, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2005.

RODRÍGUEZ, M.J., GARCÍA, J., AZAÑÓN, J.M., JABALOY, A. “Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG”. Boletín Geológico y Minero, 119 (4): 459-472 ISSN: 0366-0176. 2008.

ROMEO, R. “Seismically induced landslide displacements: a predictive model”. Engineering Geology. Vol58: 337–351. 2000.

SALGADO, R. *Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la microcuenca del Río Gila en Copán – Honduras*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Escuela de Postgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación. 172pp. Costa Rica 2005.

SIGOT. Sistema de Información Geográfico para la Planeación y el Ordenamiento Territorial. Página web oficial. [En línea], acceso Diciembre de 2012. Disponible: <http://sigotn.igac.gov.co>.

SOLDANO, A. “Inundaciones: ¿Qué es susceptibilidad? Conceptos sobre riesgo”. Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones. 16 al 20 de marzo, Falda del Carmen, Córdoba, Argentina. 2009.

TURNER, B.L., KASPERSON, R.E., MATSON, P.A., MCCARTHY, J.J., CORELL, R.W., CHRISTENSEN, L., ECKLEY, N., KASPERSON, J.X., LUERS, A., MARTELLO, M.L., POLSKY, C., PULSIPHER, A., SCHILLER, A. “A framework for vulnerability analysis in sustainability science”. Proceeding of The National Academy of Science of The United States. 100 (14): 8074-8079. 2003.

USACE. US Army Corps of Engineers. *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies*. ETL 1110-2-556. pp 1-133. USA. 1999.

USGS. United States Geological Survey. HIGHLAND, L.M., y BOBROWSKY, P. *Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes*. Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 129 p. 2008.

VARNES, D.J. Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. Commission on landslides of the IAEG, UNESCO. *Natural Hazards* No. 3, 61 pp. 1984.

VILLALÓN, M. “Guía para la Elaboración de Inventarios de Elementos en Riesgo en Áreas Vulnerables a Inundaciones y Sismos en Costa Rica”. Reporte enviado al International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Julio 2003.

WILSON, R.C. y KEEFER, D.K. “Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding”. In: *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region: An Earth-Science Perspective*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, Washington - USA, P 317-345. 1985.