



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

Rubén Darío Aguilar Collazo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2015



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

Rubén Darío Aguilar Collazo

Trabajo final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director:

P.E. Ing. Álvaro Jaime Gonzalez García

M.Sc., D.I.C.

Línea de Investigación:

Análisis de Confiabilidad y Riesgos Asociados al Entorno Geotécnico

Grupo de Investigación en Geotecnia de la Universidad Nacional

(GIGUN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2015



Agradecimientos

Al Dios de la vida, mi señor por guiarme en cada momento de mi vida. Venga a nosotros tu reino, hágase tu voluntad en la tierra y como en el cielo.

A mi familia, mis padres, María T. y el viejo Leo, hermanos, El Cabe y Antonio, mi prima Kmi y tías, Pablita y Griselda, por apoyarme siempre.

A mi Mary, por su amor y apoyo incondicional.

A mi tutor, Profesor Álvaro J. Gonzalez García, por su guía y valiosos aportes.

A todos mis profesores de la Maestría de Geotecnia, por sus enseñanzas.

A mis amigos y compañeros, especialmente al viejo Richard y Karol, el grupo Caribe en la Unal.

A todos aquellos de que una u otra forma me impulsaron para alcanzar este importante logro.

Muchas gracias a todos.



Resumen

En el presente trabajo académico se utilizó la metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad para Zonas Homogéneas (SES) como herramienta de análisis heurístico en la evaluación y zonificación de la amenaza relativa por deslizamientos de la ciudad de Cartagena, Colombia, con base en SIG, a partir de la calibración de cuatro (4) parámetros detonantes establecidos (Clima, Erosión, Amenaza Sísmica y Factor Antrópico) y usando información base generada por Ingeominas (2001) e información complementaria de seis (6) sitios críticos de Cartagena, en la generación de un escenario "actualizado" de amenaza relativa por deslizamientos de la ciudad. Este escenario evidenció que aproximadamente un 20.9% de la zona de laderas de Cartagena está afectada por procesos de remoción en masa, en un nivel de amenaza alta, siendo el cerro de La popa el sector de la ciudad más susceptible a la inestabilidad de laderas.

Palabras claves: Amenaza, Cartagena, Denudación, Deslizamiento, Heurística, Método, Zonificación



Abstract

In the present academic work was used the Semiquantitative Stability Evaluation System for Homogeneous Zones (SSE) as a heuristic analysis tool in the GIS-based landslide hazard evaluation and zonation for Cartagena city (Colombia), from the calibration of four (4) defined trigger parameters (Climate, Erosion, Seismic Hazard and Antropic Factor) and using primary information generated by Ingeominas (2001) and supplementary information of six (6) critical sites of Cartagena, in the generation of a "current" mapping of landslide's relative hazard of the city. This mapping showed that about 20.9% of the Cartagena's slope zone is affected by high level of landslide hazard, in this case the Popa hill is the sector of the city more susceptible to slope instability.

Keywords: Cartagena, Denudation, Hazard, Heuristic, Landslide, Method, Zonation



COMPONENTE I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1. MARCO CONCEPTUAL GENERAL	13
1.1. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo	13
1.1.1. Amenaza Natural (A)	13
1.1.2. Vulnerabilidad (V)	14
1.1.3. Riesgo (R)	15
1.2. Procesos de Remoción en Masa (PRM)	17
1.2.1. Definiciones de Movimientos en Masa	17
1.2.2. Clasificación de los Movimientos en masa	19
1.2.3. Caídas	22
1.2.4. Volcamientos	24
1.2.5. Deslizamientos	26
1.2.6. Propagación lateral	31
1.2.7. Flujos	33
1.2.8. Movimientos complejos	38
1.3. Zonificación de la Amenaza	39
1.3.1. Zonificación TC4	40
1.3.2. Métodos	41
CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR PRM	46
2.1. Introducción a la Evaluación de la Amenaza por PRM	46
2.1.1. Procesos de Remoción en Masa como Amenaza	48
2.1.2. Vulnerabilidad ante PRM	50
2.2. Metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES)	52
2.2.1. Parámetros Intrínsecos (M, R, D, U)	58
2.2.2. Parámetros Detonantes (C, S, E, A)	67
2.2.3. Evaluación Final del Grado de Amenaza (CE)	72
2.2.4. Resumen de Modificaciones de la Metodología SES	73
2.3. Algunos Antecedentes de la Aplicación de la Metodología SES	75
2.3.1. Estudio en Útica, Cundinamarca (Gonzalez 1992)	75
2.3.2. Tesis de Maestría de Barboza (1996)	79
2.3.3. Tesis de Maestría de Lozano (1996)	86
2.3.4. Estudio en Bogotá D.C. (Gonzalez y Millan 1999)	89
2.3.5. Estudio de Ingeominas (2001a) en Cartagena D.T. y C.	92
2.3.6. Estudio de Ingeominas (2001-2003) en Villavicencio	96
2.3.7. Tesis de Pregrado de Díaz (2004)	98

COMPONENTE II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE CARTAGENA

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL	104
3.1. Generalidades de Cartagena	105
3.1.1. División Administrativa	106



3.1.2. Clima.....	107
3.1.3. Temperatura y Precipitaciones	108
3.1.4. Humedad relativa, Brillo solar y Evaporación	109
3.1.5. Vientos y Marea.....	111
3.1.6. Recuento de Eventos de Amenazas Naturales	113
3.2. Geología de Cartagena.....	114
3.2.1. Marco Geológico Regional.....	116
3.2.2. Litoestratigrafía Regional	118
3.2.3. Litoestratigrafía Local	122
3.2.4. Geología Estructural.....	143
3.2.5. Geomorfología.....	157
<u>COMPONENTE III. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA RELATIVA POR PRM EN CARTAGENA D.T. y C.</u>	
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL SISTEMA SEMICUANTITATIVO DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD EN CARTAGENA.....	
4.1. Descripción de parámetros intrínsecos.....	198
4.1.1. Parámetro Tipo de Materiales (M)	198
4.1.2. Parámetro Relieve (R).....	202
4.1.3. Parámetro Drenaje (D).....	205
4.1.4. Parámetro Vegetación (V).....	209
4.2. Calibración de Parámetros Detonantes	211
4.2.1. Parámetro Clima (C)	212
4.2.2. Parámetro Sismo (S).....	238
4.2.3. Parámetro Erosión (E).....	247
4.2.4. Parámetro Efecto Antrópico (A)	266
CAPÍTULO 5. PROCESOS DE INESTABILIDAD CARACTERÍSTICOS DE CARTAGENA	
5.1. Descripción y análisis de los PRM	269
5.1.1. Flujo de detritos: Loma del Diamante	270
5.1.2. Deslizamiento rotacional: Lo Amador	274
5.1.3. Flujo de detritos: Loma del Peyé	280
5.1.4. Deslizamiento: San Francisco.....	284
5.1.5. Deslizamiento: Nueva Granada - Manzanares.....	288
5.1.6. Flujo de detritos: Salto del cabrón	293
CAPÍTULO 6. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA.....	
6.1. Mapa Final de un Escenario de Amenaza relativa por deslizamientos en la ciudad de Cartagena.....	296
6.1.1. Calibración de zonas y rangos de variación de (CE)	297
6.1.2. Delimitación del área de estudio.....	300
6.1.3. Amenaza relativa Baja a los PRM	301
6.1.4. Amenaza relativa Media a los PRM.....	302
6.1.5. Amenaza relativa Alta a los PRM	303



6.2. Comparación con Zonificación por PRM (2001b)	306
6.2.1. Caso Cerro de La Popa y Estribaciones.....	307
6.2.2. Caso Loma del Marion	309
6.3. Discusión sobre la confiabilidad de la Metodología SES (1989).....	312
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	314
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	320

ANEXO A. INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS 2001-2014

ANEXO B. OTROS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR PRM

ANEXO C. MAPAS DE GEOLOGÍA DE CARTAGENA (INGEOMINAS 2000)



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la Vulnerabilidad (en francés)	15
Figura 2. Ocurrencia temporal de movimientos en masa	22
Figura 3. Caídas primarias y secundarias	23
Figura 4. Esquemas de Caídas de rocas	23
Figura 5. Esquemas de volcamientos	25
Figura 6. Volcamientos simples y múltiples por discontinuidades pre-existentes	26
Figura 7. Deslizamiento rotacional simple, sucesivo y múltiple	28
Figura 8. Nomenclatura de un deslizamiento	28
Figura 9. Esquemas de Deslizamientos rotacionales.....	29
Figura 10. Esquemas de Deslizamientos traslacionales	30
Figura 11. Esquemas de Propagación lateral	32
Figura 12. Esquema de bloques tipo Graben y Horst en falla normal	33
Figura 13. Esquemas de Flujos.....	35
Figura 14. Relaciones entre niveles de estudio, escala e información para zonificación de la amenaza por deslizamientos.....	44
Figura 15. Secuencia de Eventos Naturales y Amenazas.....	49
Figura 16. Definiciones originales de la Metodología SES	53
Figura 17. Calibración de la Calificación de Estabilidad (CE)	53
Figura 18. Flujograma de Empleo de la Metodología SES en Entorno Urbano	55
Figura 19. Metodología SES - Materiales (Definición original).....	56
Figura 20. Metodología SES - Relieve, Vegetación, Inestabilidad, Erosión, Clima y Sismo (Definición original).....	57
Figura 21. Perfil de vertiente propuesto por Dalrymple et al. (1968)	65
Figura 22. Efectos de la acción del hombre en la producción de deslizamientos	71
Figura 23. Calificación de Estabilidad de la Metodología SES.....	73
Figura 24. Vista parcial de Mapa de Zonificación Cualitativa de Estabilidad en Útica.....	77
Figura 25. Vista parcial reciente de flujos de detritos en cercanías a Útica	78
Figura 26. Mapa de Zonificación Geotécnica de Cartagena	81
Figura 27. Mapa de Susceptibilidad a los fenómenos naturales de Cartagena.....	86
Figura 28. Vista parcial de Mapa preliminar de Amenaza de Sector sur de Bogotá	88
Figura 29. Vista parcial Mapa de Amenaza según MTN para distintas localidades de Bogotá	91
Figura 30. Mapas de Amenaza generados para la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá.....	92
Figura 31. Vista parcial de Mapa de Caracterización Geotécnica de Cartagena (Plancha I)	94
Figura 32. Vista parcial de Mapa de cuencas hidrográficas (Plancha I).....	95
Figura 33. Vista parcial de Mapa de Aptitud y uso del suelo de Cartagena (Plancha I)	95
Figura 34. Vista parcial de Mapa de Amenaza Relativa a PRM de Villavicencio	98
Figura 35. Mapas de Valoración de Amenaza a PRM de Villavicencio por las distintas metodologías implementadas	103
Figura 36. Localización geográfica de Cartagena	105
Figura 37. Mapa de Localidades de Cartagena	106
Figura 38. Mapas de Unidades Comunerías de Gobierno (UCG) de Cartagena	107
Figura 39. Temperatura Promedio Multianual	108
Figura 40. Promedio Multianual de Precipitación en mm	109
Figura 41. Promedio Multianual de número de días de precipitación.....	109
Figura 42. Promedio Multianual de Humedad Relativa	110
Figura 43. Promedio Multianual de Brillo Solar	110



Figura 44. Promedio Multianual de Evaporación.....	111
Figura 45. Rosa de Viento de la Época Seca.....	111
Figura 46. Rosa de Viento de la Época Húmeda	112
Figura 47. Rosa de Viento de la Época Húmeda	112
Figura 48. Mapa Geológico de Colombia - Región Caribe.....	115
Figura 49. Rasgos Estructurales de la Región Caribe Colombiana	116
Figura 50. Fenómenos diapíricos en el sector del Cinturón del Sinú	118
Figura 51. Columna Estratigráfica Generalizada del Cinturón de Sinú	119
Figura 52. Mapa de Geología regional de Cartagena	121
Figura 53. Asentamientos en zonas de rellenos en el Sector El Progreso.....	142
Figura 54. Esquema de perfil de elevación de tramo de Anticlinal de Zaragocilla	144
Figura 55. Esquema de perfil de elevación de Anticlinal de Albornoz (Sector Henequén).....	145
Figura 56. Esquema de perfil de elevación de Anticlinal de La Popa.....	146
Figura 57. Esquema de perfil de elevación de un tramo del Sinclinal de Policarpa	146
Figura 58. Antigua zona de plegamiento en Albornoz y Policarpa por efecto del control tectónico	147
Figura 59. Esquema de perfil de elevación de un tramo del Sinclinal de Socorro.....	147
Figura 60. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha I de IV	153
Figura 61. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha II de IV	154
Figura 62. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha III de IV	155
Figura 63. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha IV de IV.....	156
Figura 64. Esquema de jerarquización geomorfológica	158
Figura 65. Vista parcial del cerro de La Popa (Sector Sur)	160
Figura 66. Vista parcial de la loma del Marión (sector sureste: Las Brisas)	161
Figura 67. Vista del cerro de Albornoz (vía Mamonal)	162
Figura 68. Vista parcial de la loma del Peyé, Sector Los Corales	164
Figura 69. Parte alta de la loma del Guerrero (Escarpe principal)	164
Figura 70. Vista parcial de la loma del Colegio de La Salle	165
Figura 71. Vista parcial de la loma del Castillo San Felipe de Barajas.....	166
Figura 72. Vista parcial de la loma del Diamante (sector sur)	166
Figura 73. Vista panorámica del "volcán de lodo" de El Rodeo (Nótese lotes intervenidos)	169
Figura 74. Panorámica hacia el NE de la barra espiga de La Boquilla	178
Figura 75. Panorámica hacia el NE de la barra espiga de Canapote al centro histórico.....	178
Figura 76. Estado de la margen sur de la ciénaga de la Virgen en la década de los 70's	179
Figura 77. Antigua llanura intermareal al lado de la Urbanización Santa Clara	182
Figura 78. Delta de flujo en La Boquilla.....	188
Figura 79. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha I de IV	193
Figura 80. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha II de IV	194
Figura 81. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha III de IV	195
Figura 82. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha IV de IV.....	196
Figura 83. Mapa de litología de Cartagena	200
Figura 84. Mapa de calificación del Parámetro Material (M)	201
Figura 85. Mapa de geomorfología de Cartagena.....	203
Figura 86. Mapa de calificación del Parámetro Relieve (R)	204
Figura 87. Mapa de Subcuencas de Cartagena	207
Figura 88. Mapa de calificación del Parámetro Drenaje (D).....	208
Figura 89. Mapa de Cobertura Vegetal de Cartagena.....	210
Figura 90. Mapa de calificación del Parámetro Vegetación (V).....	211
Figura 91. Localización geográfica de las estaciones hidrometeorológicas	213



Figura 92. Verificación de homogeneidad de datos por análisis de dobles masas	215
Figura 93. Localización geográfica de los puntos sintéticos.....	232
Figura 94. Mapa regional de isoperíodos de retorno.....	235
Figura 95. Mapa de isoperíodos de retorno de Cartagena.....	236
Figura 96. Mapa de calificación del parámetro de lluvia.....	238
Figura 97. Ondas sísmicas en terrenos con diferente capacidad portante.....	239
Figura 98. Comparación de espectro de amenaza uniforme con NSR-10 para Cartagena	240
Figura 99. Aceleración máxima inferida de 0,1g para Cartagena	240
Figura 100. Efecto de sitio sísmico.....	242
Figura 101. Mapa propuesto de perfiles de suelo (NSR-10) en Cartagena.....	242
Figura 102. Mapa del factor de amplificación (Q) de Cartagena	243
Figura 103. Mapa de distribución de aceleraciones superficiales (As) - Amenaza sísmica	245
Figura 104. Mapa de calificación del parámetro sismo	246
Figura 105. Isoyetas de precipitación media anual en milímetros para Cartagena	249
Figura 106. Mapa de erosividad.....	253
Figura 107. Mapa de zonificación geotécnica utilizado para identificar unidades de suelo.....	255
Figura 108. Mapa de erodabilidad.....	257
Figura 109. Mapa de factor de longitud de pendiente (L).....	259
Figura 110. Mapa de grado de pendiente (S).....	259
Figura 111. Mapa del factor de cobertura vegetal (C).....	261
Figura 112. Mapa de potencial de erosión (E)	265
Figura 113. Mapa de calificación del Parámetro erosión (E).....	265
Figura 114. Mapa de Intervención Antrópica entre años 2001 y 2015	267
Figura 115. Mapa de calificación del Parámetro Efecto Antrópico (A)	268
Figura 116. Mapa de localización de PRM estudiados.....	270
Figura 117. Laderas de la loma del Diamante afectadas por procesos denudacionales.....	271
Figura 118. Modelo 3D de la loma del Diamante y dirección de la escorrentía superficial.....	271
Figura 119. Mapa Litológico de la Loma del Diamante	272
Figura 120. Asentamientos irregulares en la parte alta de la Loma del Diamante	274
Figura 121. Vista parcial del Deslizamiento Lo Amador, Sector Ricaurte	275
Figura 122. Mapa Litológico de Lo Amador, Sector Ricaurte	276
Figura 123. Ejecución de SPT en el sector Lo Amador	277
Figura 124. Modelo 3D de Lo Amador y dirección de la escorrentía superficial.....	277
Figura 125. Vista frontal del escarpe principal del deslizamiento Lo Amador	278
Figura 126. Vista parcial del escarpe principal del deslizamiento: Lomas del Rosario	279
Figura 127. Laderas de la loma del Peyé afectadas por procesos denudacionales.....	280
Figura 128. Mapa Litológico de la loma del Peyé, Sector Oriental.....	281
Figura 129. Vista parcial de la loma del Peyé en el año 1948 con sus cauces naturales	282
Figura 130. Vista parcial del sector oriental de la loma del Peyé	283
Figura 131. Vista parcial de escarpe principal de deslizamiento San Francisco	285
Figura 132. Vista parcial de la corona y zanja de deslizamiento San Francisco	285
Figura 133. Mapa Litológico de la loma del Guerrero, Barrio San Francisco	286
Figura 134. Zonas afectadas por la inestabilidad en el deslizamiento San Francisco	287
Figura 135. Localización de referencia de los deslizamientos Nueva Granada -Manzanares	288
Figura 136. Mapa Litológico de Nueva Granada	289
Figura 137. Mapa Litológico de Sector Manzanares	290
Figura 138. Escarpe principal y flujo de material por efecto de las lluvias - Nueva Granada	291
Figura 139. Escarpe principal y corona del deslizamiento de Manzanares.....	292
Figura 140. Vista parcial de pie y flanco oriental del deslizamiento de Manzanares.....	292



Figura 141. Modelo 3D de los sectores Nueva Granada - Manzanares.....	293
Figura 142. Sector sur del Salto del cabrón afectado por procesos denudacionales	293
Figura 143. Mapa Litológico del Cerro de la Popa, Sector Salto del Cabrón	294
Figura 144. Modelo 3D del Salto del cabrón y dirección de la escorrentía superficial.....	295
Figura 145. Mapa de agrupación de puntajes de CE cada 5 unidades	298
Figura 146. Mapa de calificación de estabilidad (CE) obtenido de la metodología SES	299
Figura 147. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos (calibrado)	305
Figura 148. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Cerro de La Popa y estribaciones...	307
Figura 149. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos - Sector Cerro de La Popa.....	308
Figura 150. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Loma del Marión	310
Figura 151. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos - Sector Nueva Granada.....	310
Figura 152. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Cerro de Albornoz.....	311



LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación Europea de Procesos de Remoción en Masa	21
Cuadro 2. Uso de datos para tres niveles de zonificación en PRM.....	40
Cuadro 3. Valores de susceptibilidad del factor Roca	59
Cuadro 4. Valores de susceptibilidad del factor Material intermedio	60
Cuadro 5. Identificación de estructuras heredadas (Material intermedio)	60
Cuadro 6. Influencia de las estructuras heredadas (Material intermedio)	60
Cuadro 7. Valores de susceptibilidad del factor Suelo residual.....	61
Cuadro 8. Valores de susceptibilidad del factor Suelo transportado	61
Cuadro 9. Valores de susceptibilidad del factor condición del suelo	62
Cuadro 10. Clasificación de los perfiles de suelo según la NSR-10.....	63
Cuadro 11. Tipos de perfil de suelo de la NSR-98 y NSR-10.....	63
Cuadro 12. Relación de perfiles de suelo de la NSR-98 y NSR-10.....	64
Cuadro 13. Valores de susceptibilidad del factor inclinación de la pendiente	64
Cuadro 14. Valores de susceptibilidad del factor forma de la pendiente.....	66
Cuadro 15. Valores de susceptibilidad del factor densidad de drenaje	66
Cuadro 16. Valores de susceptibilidad del parámetro Vegetación	67
Cuadro 17. Valores de susceptibilidad del parámetro Uso del suelo de Villavicencio.....	67
Cuadro 18. Valores de susceptibilidad del parámetro Clima	68
Cuadro 19. Valores de susceptibilidad del parámetro Erosión.....	68
Cuadro 20. Valores de susceptibilidad del parámetro Sismo	69
Cuadro 21. Valores de susceptibilidad del parámetro Efectos Antrópicos	72
Cuadro 22. Categoría de Amenaza de la metodología SES - Estudio Bogotá (1999)	90
Cuadro 23. Categoría de Amenaza según MTN - Estudio Bogotá (1999).....	91
Cuadro 24. Climatología de Cartagena	108
Cuadro 25. Puntajes del parámetro Material (M)	199
Cuadro 26. Puntajes del parámetro Relieve (R).....	202
Cuadro 27. Puntajes del parámetro Drenaje (D)	205
Cuadro 28. Puntajes del parámetro Vegetación (V).....	209
Cuadro 29. Estaciones hidrometeorológicas utilizadas	212
Cuadro 30. Precipitación media anual obtenida de cada estación	217
Cuadro 31. Ecuaciones lineales obtenidas del ajuste Gumbel.....	225
Cuadro 32. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Aeropuerto Rafael Núñez.....	225
Cuadro 33. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Bayunca	225
Cuadro 34. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Cañaveral.....	226
Cuadro 35. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación CIOH.....	226
Cuadro 36. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Galerazamba	226
Cuadro 37. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Santa Ana	226
Cuadro 38. Magnitud de la lluvia y duración crítica de las estaciones hidrometeorológicas	227
Cuadro 39. Períodos de retorno de la lluvia crítica de cada estación	231
Cuadro 40. Elevación, precipitación anual y período de retorno de las estaciones	232
Cuadro 41. Elevación, precipitación anual y período de retorno de los puntos adicionales	234
Cuadro 42. Precipitación media anual, precipitación crítica y período de retorno	234
Cuadro 43. Relación de puntajes de Ramírez (1988) y períodos de retorno críticos	236
Cuadro 44. Porcentaje del área de lluvia de Cartagena según el puntaje asignado	237
Cuadro 45. Factores de amplificación (Q) para $Aa \leq 0.1$ (períodos cortos del espectro)	241
Cuadro 46. Determinación del factor potencial erosivo de la lluvia R.....	251



Cuadro 47. Determinación del factor R para cada isoyetas (Distribución espacial)	252
Cuadro 48. Determinación del factor de erodabilidad K	254
Cuadro 49. Clasificación del índice de erodabilidad K	255
Cuadro 50. Valores del factor de cobertura vegetal (C)	260
Cuadro 51. Valores asignados del factor (C) a las unidades de cobertura vegetal	261
Cuadro 52. Valores del factor de prácticas de manejo (P)	262
Cuadro 53. Clasificación sugerida del grado de erosión	263
Cuadro 54. Porcentaje de erosión en la región Caribe.....	263
Cuadro 55. Resumen de los PRM en estudio	269
Cuadro 56. Agrupación de puntaje de CE cada 5 unidades.....	298
Cuadro 57. Clasificación de la calificación de estabilidad para definir grado de amenaza relativa por PRM de Cartagena	299
Cuadro 58. Comparativo de niveles de amenaza por PRM 2001-2015	307



LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de doble masa de la Estación Galerazamba	215
Gráfica 2. Curva de doble masa de la Estación CIOH	216
Gráfica 3. Curva de doble masa de la Estación Santa Ana.....	216
Gráfica 4. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación A. Rafael Núñez.....	219
Gráfica 5. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Bayunca	220
Gráfica 6. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Cañaveral.....	221
Gráfica 7. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación CIOH	222
Gráfica 8. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Galerazamba	223
Gráfica 9. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Santa Ana	224
Gráfica 10. Precipitación máxima acumulada - Estación Aeropuerto Rafael Núñez	228
Gráfica 11. Precipitación máxima acumulada - Estación Bayunca	228
Gráfica 12. Precipitación máxima acumulada - Estación Cañaveral	229
Gráfica 13. Precipitación máxima acumulada - Estación CIOH	229
Gráfica 14. Precipitación máxima acumulada - Estación Galerazamba.....	230
Gráfica 15. Precipitación máxima acumulada - Estación Santa Ana.....	230
Gráfica 16. Precipitación media anual vs Elevación.....	233
Gráfica 17. Período de retorno crítico vs Precipitación media anual	233
Gráfica 18. Correlación de puntajes y períodos de retorno críticos (Tr-7).....	236
Gráfica 19. Correlación de puntajes y Aceleración en roca.....	245
Gráfica 20. Erodabilidad para cada unidad de suelo propuesta	256
Gráfica 21. Correlación de puntajes y tipo de erosión.....	264
Gráfica 22. Relación de categorías de Amenaza Vs Area (%).....	300



Introducción

Los procesos de remoción en masa (PRM) son causantes de múltiples emergencias en Colombia, por lo tanto su análisis y estudio acucioso es de suma importancia en la prevención y atención de este tipo de eventos que afectan a la comunidad, incluyendo la de la ciudad de Cartagena. Si bien es cierto que se han hecho grandes esfuerzos para mitigar este tipo de procesos, en la actualidad no es posible predecir con exactitud, la ocurrencia de los mismos, sin embargo desde hace tiempo se han desarrollado múltiples metodologías de evaluación, que nos permiten tener una idea aproximada sobre la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos y sus niveles de impacto sobre la infraestructura relacionada.

La mayoría de estudios de zonificación de amenazas tienen el propósito de orientar los desarrollos urbanísticos de forma segura y de alguna manera se constituyen en herramientas de análisis basadas en ciertas hipótesis y simplificaciones, por lo tanto es fundamental para el avance del conocimiento que las metodologías empleadas sean evaluadas a la luz de los acontecimientos y procesos que en realidad han ocurrido y comparar las condiciones reales con las previstas; solo de esta manera es posible identificar en forma objetiva las bondades y deficiencias de las metodologías propuestas.

La metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad para Zonas Homogéneas (SES) es una herramienta de análisis heurístico que se viene utilizando en Colombia desde 1989 en distintos proyectos de ingeniería, de índole académico y consultoría, para evaluar y zonificar el nivel de amenaza relativa a los procesos de remoción en masa, a partir de la evaluación de parámetros intrínsecos o de susceptibilidad y de parámetros detonantes de la inestabilidad.

Es importante señalar que la metodología SES al igual que muchos métodos heurísticos, ha sido desarrollada para un ambiente físico-geológico y ambiental específico y no ofrece probabilidades de ocurrencia de deslizamientos y menos de amenaza, sino directamente evaluaciones y zonificaciones de posibilidades de deslizamientos ó de amenaza relativa, que se califican cualitativamente, por lo tanto es indispensable la calibración con el inventario de deslizamientos (ver Anexo A).

En el presente trabajo se calibraron los parámetros detonantes (Clima, Erosión, Amenaza Sísmica y Factor Antrópico) de la metodología SES, para la ciudad de Cartagena, usando información base generada por Ingeominas (2001a) e información complementaria reciente de seis (6) sitios críticos de Cartagena, para posteriormente generar un escenario "actualizado" de amenaza relativa por deslizamientos de la ciudad de Cartagena.

En los sitios críticos seleccionados se han reactivado antiguos deslizamientos y/o generado nuevos movimientos en masa, que han modificado las condiciones de estabilidad, por consiguiente se profundizó en la evaluación de los factores desencadenantes de PRM para las condiciones particulares que tiene la ciudad y en la incidencia de la variación de dichos factores en los niveles de amenaza.

La pretensión de este proyecto es ofrecer a la comunidad académica en general un documento de consulta que coadyuve al estudio de la susceptibilidad y amenaza por



deslizamientos que afectan a la ciudad de Cartagena y que los resultados obtenidos puedan ser utilizados por las autoridades locales, así como por consultores y profesionales que lo requieran, como primera aproximación en la toma de decisiones, en las etapas de pre y factibilidad de proyectos relacionados.

A continuación se describen los objetivos de la investigación.

Objetivo general

- Calibrar los parámetros detonantes de la Metodología SES a partir de las condiciones particulares de estabilidad de la ciudad de Cartagena, utilizando información técnica disponible para generar un escenario de amenaza por deslizamientos.

Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros detonantes de la metodología SES mediante análisis estadístico, con el fin de establecer rangos de variabilidad para Cartagena.
- Generar un escenario de amenaza por deslizamientos de Cartagena a partir de la asignación de puntajes dentro de los rangos de variabilidad, con el fin de identificar zonas potenciales de mayor inestabilidad.
- Comparar la zonificación por remoción en masa de Cartagena del año 2001 con el escenario de amenaza generado, a partir de las condiciones actuales de estabilidad de seis (6) zonas críticas para establecer la evolución de los deslizamientos en dichas zonas.

El presente trabajo de grado final está repartido en tres componentes esenciales, que a su vez están divididos en 6 capítulos. La primera parte consta de 2 capítulos donde se relacionan en principio los conceptos teóricos necesarios de introducción y profundización en la temática de los deslizamientos (p.e. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo), para posteriormente desarrollar la temática de evaluación de la amenaza por PRM, explicar las características y particularidades de la metodología SES y algunos antecedentes de su aplicación en trabajos académicos y de consultoría.

En la segunda parte se describen las generalidades de la ciudad de Cartagena, teniendo en cuenta su localización geográfica, limitantes, su condición de distrito, su división administrativa, variables meteorológicas y amenazas asociadas a fenómenos naturales, así como se destacan las características geológicas de la ciudad de Cartagena, a nivel regional y local y se hace una descripción detallada de la geomorfología local.

La tercera y última parte consta de 3 capítulos en donde se presentan los resultados finales de la aplicación de la metodología SES al describir 4 parámetros intrínsecos (Materiales, Relieve, Drenaje y Vegetación) y evaluar 4 parámetros detonantes (Clima, Sismo, Erosión y Efecto Antrópico). Una vez se describen 6 PRM característicos y críticos de Cartagena, se utiliza el inventario de deslizamientos de los últimos 14 años y el mapa de zonificación de susceptibilidad a los PRM de Ingeominas (2001a) para calibrar un mapa final de un escenario de amenaza relativa por PRM en Cartagena.



Capítulo 1. Marco Conceptual General

El capítulo 1 está constituido por un marco referencial, en primer lugar de algunos conceptos básicos que se relacionan con la temática de los desastres naturales, tales como la Amenaza (A), Vulnerabilidad (V) y Riesgo (R). Posteriormente se busca explicar de modo conciso lo que conlleva la elaboración de una zonificación de la amenaza por Procesos de Remoción en Masa (PRM), donde se explica en principio la naturaleza de estos procesos denudativos que inciden en el relieve del terreno, desde la perspectiva de distintos autores que han realizado aportes muy valiosos a este tipo de estudios.

Dentro de este contexto, se describe la clasificación de los Movimientos en Masa, tomando como punto de referencia lo planteado por Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996), y complementado con algunos conceptos expuestos por Hutchinson (1988). Finalmente el capítulo termina haciendo una breve explicación acerca de los lineamientos necesarios para realizar una zonificación de la amenaza natural en un terreno dado, de acuerdo con los alcances del presente trabajo.

1.1. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo

El impacto de los desastres en las actividades humanas ha sido un tema tratado en las últimas décadas en un amplio número de publicaciones científicas desarrolladas por diversas disciplinas que han conceptualizado sus componentes en forma diferente, aunque en la mayoría de los casos de una manera similar. La UNDR0 (1979) en conjunto con la UNESCO promovió una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones (Cardona, 1993) tales como Amenaza (A) o Peligro, Vulnerabilidad (V), Riesgo específico (RS), Elementos bajo riesgo (E), Riesgo total (R), entre otras.

Es importante destacar que el entendimiento de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo se ha aproximado con perspectivas que van desde lo científico, es decir, siguiendo un marcado interés positivista con predominio de análisis cuantitativos, hasta perspectivas más humanistas que no necesariamente siguen una filosofía positiva y en donde prevalece el análisis cualitativo (Muñoz, 1997).

En el desarrollo del presente trabajo es de suma importancia la definición de la Amenaza, debido al alcance propuesto en el mismo, así como de los términos relacionados Vulnerabilidad y Riesgo. Aunque se han propuesto varias definiciones concisas como las de UNDR0 (1979), Varnes (1984), Gonzalez (2005), ISDR (2004) y UNISDR (2009), es más común de lo que se cree confundir aún dichos términos, al utilizarlos en algunos casos como si fueran la misma cosa o al emplearlos indiscriminadamente para referirse a algo que implica peligro, es decir, a una situación que se podría presentar y causar algún tipo de daño.

1.1.1. Amenaza Natural (A)

La Amenaza es la probabilidad de ocurrencia de la magnitud de un fenómeno potencialmente desastroso (Varnes, 1984), que puede causar daño, en un espacio y horizonte de tiempo dados (Gonzalez, 2005). Esta definición de Amenaza natural incorpora conceptos de magnitud, localización geográfica y tiempo de recurrencia. Según



Guzzetti et al. (1999) la primera se refiere a la dimensión ó intensidad del fenómeno natural que condiciona su comportamiento y poder destructivo; la segunda implica la capacidad de identificar el lugar donde se puede producir el fenómeno y la tercera se refiere a la frecuencia temporal del evento. Es importante destacar que el Proyecto Multinacional Andino (2007) diferencia los conceptos de magnitud e intensidad en contraste con lo planteado por Guzzetti et al. (1999), donde la magnitud se refiere al tamaño, ya sea en volumen o en área del movimiento y la intensidad se refiere al potencial destructivo del movimiento y su relación con parámetros de velocidad, fuerzas de impacto, espesor o altura.

Según Cardona (1993) la amenaza es sinónimo de factor de riesgo externo de un sistema, que se representa por un peligro latente asociado con un fenómeno físico en un sitio y tiempo dado produciendo efectos adversos en personas, bienes y/o medio ambiente.

El concepto de amenaza ha sido ampliado con el paso del tiempo, pues además de un fenómeno que puede causar daño, hoy en día se asocia a la ocurrencia de proceso y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones u otros impactos a la salud, pérdida de medios de sustento y de servicios, daños materiales, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).

Las amenazas incluyen condiciones latentes que pueden derivar en futuras amenazas/peligros, los cuales pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrometeorológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas). Pueden ser individuales, combinadas o secuenciales en su origen y efectos. Cada una de ellas se caracteriza por su localización, magnitud o intensidad, frecuencia y probabilidad (ISDR, 2004).

1.1.2. Vulnerabilidad (V)

La vulnerabilidad es la susceptibilidad de los elementos a sufrir daño por la magnitud del fenómeno. Se puede descomponer en exposición (E) y resistencia (S) según lo descrito por Gonzalez (1990a).

$$V = E/S \quad [1.1]$$

Varnes (1984) consideró que la vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la ocurrencia de un fenómeno, de una magnitud dada.

Para Cardona (2001) la vulnerabilidad es una acepción que a pesar de que en principio su percepción fue confusa, ha contribuido a dar claridad a los conceptos de riesgo y desastre. Según Cardona (2001) la vulnerabilidad es sinónimo de factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño. La vulnerabilidad, en otras palabras, es la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso que un fenómeno desestabilizador de origen natural o antrópico se manifieste.



Estas definiciones han sido ampliamente evaluadas con el tiempo, donde la vulnerabilidad ha sido ligada a condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de un elemento o grupo de elementos (comunidad) al impacto de amenazas. En la Vulnerabilidad también se evalúan los factores positivos que aumentan la habilidad de las personas o comunidad para hacer frente con eficacia a las amenazas, por ejemplo la capacidad de reacción y preparación (ISDR, 2004).

La vulnerabilidad varía considerablemente dentro de una comunidad y en el transcurso del tiempo. Este concepto identifica la vulnerabilidad como una característica de los elementos de interés (comunidad, sistema o bien) que puede ser independiente de su exposición. Sin embargo, en su acepción común, con frecuencia esta palabra se utiliza más ampliamente para también incluir el grado de exposición de esos elementos (UNISDR, 2009), como se puede apreciar en la figura 1.

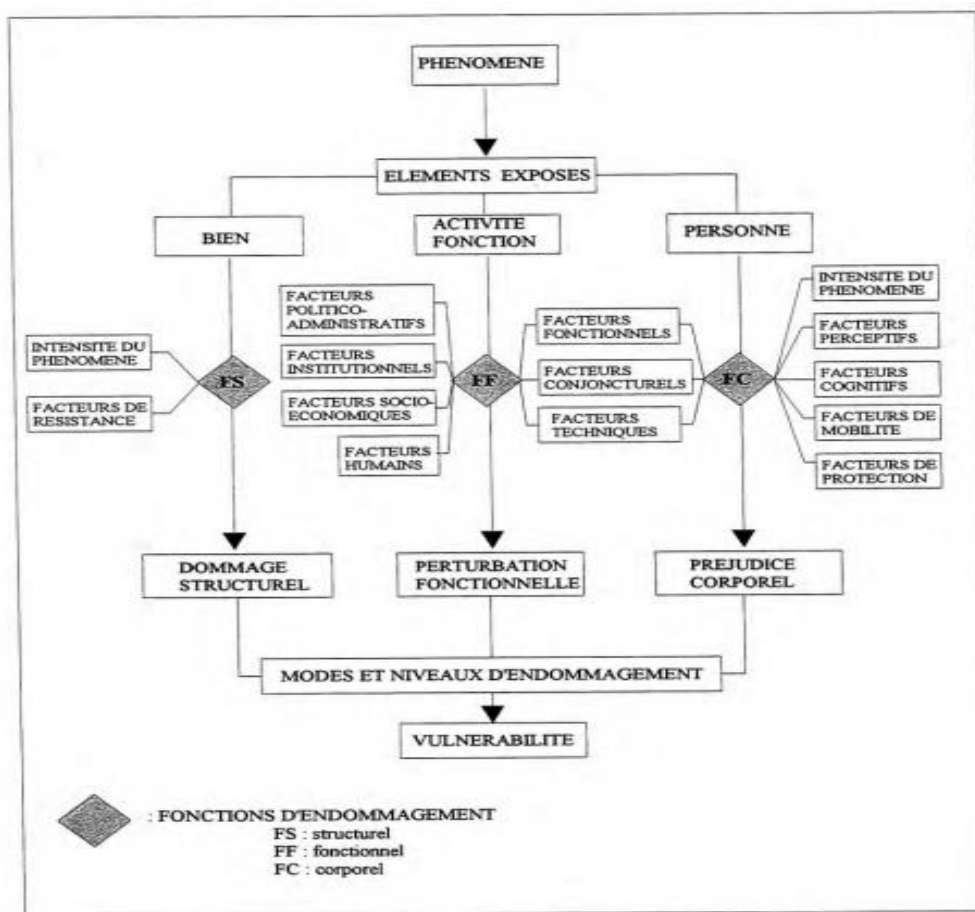


Figura 1. Componentes de la Vulnerabilidad (en francés)

Fuente: Tomado de F. Leone (1996)

1.1.3. Riesgo (R)

Según Varnes (1984) el riesgo es el número esperado de pérdidas de vida, heridos, daños en propiedades o interrupción de actividades económicas debidas a un fenómeno desastroso.



Gonzalez (2005) consideró que el riesgo es el nivel de daño o afectación esperada de los elementos, lo cual puede evaluarse conceptualmente a través de las siguientes expresiones:

$$R = A \times V \rightarrow R = A \times E/S \quad [1.2]$$

Con estas definiciones simplificadas se deduce que el riesgo puede disminuirse: (1) reduciendo o evitando la exposición de los elementos al fenómeno, (2) reduciendo o controlando la amenaza del fenómeno e (3) incrementando la resistencia del elemento al fenómeno.

Todo lo anterior dentro de un marco de decisión económica. De la fórmula [1.2] también es posible deducir que, en general, el riesgo tendrá un valor finito salvo cuando la exposición sea nula ($E = 0$), caso en el cual el riesgo también es nulo.

En términos específicos, la amenaza del fenómeno debería evaluarse en unidades de potencial destructivo, la resistencia del elemento en unidades compatibles de absorción de este potencial sin presentar daños y la exposición en función de la atenuación o incremento espacial o temporal de la magnitud del fenómeno y la posición relativa de los elementos amenazados.

Debido a lo anterior existen diversos grados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. En particular para el riesgo, éste puede catalogarse dentro de las siguientes clases (Mora, 1990 citado por Gonzalez, 2005):

Riesgo evitable: Aquel cuyos orígenes se pueden evitar y cuyas consecuencias se pueden anular con obras técnica y económicamente factibles.

Riesgo controlable: Cuando el fenómeno amenazante puede predecirse pero sus consecuencias solo pueden atenuarse o mitigarse, pues no se pueden manejar completamente ni técnica ni económicamente.

Riesgo Incontrolable: Aquellos en los cuales la capacidad de predicción y evaluación es incompleta y la ciencia y tecnología no están capacitadas para proveer soluciones técnica o económicamente viables.

De la escala anterior, surge el riesgo **aceptable** o mejor, riesgo **aceptado**, definido como la diferencia entre el mayor nivel de riesgo que se decide o puede controlar (riesgo controlable) y la magnitud máxima previsible de ese riesgo (riesgo incontrolable). Corresponde al nivel "tolerable" en términos de daños materiales y pérdida de vidas humanas y normalmente no es nulo.

Adicionalmente, el planteamiento de obras y trabajos de prevención, corrección y mitigación, debe basarse en relaciones beneficio/costo aplicables a cada caso particular (Gonzalez, 2005).

El concepto de riesgo se asocia a la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro del ambiente), resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad (ISDR, 2004).



En este contexto, Spence (1990) citado por Cardona (1993) habla del riesgo, o daño, destrucción o pérdida esperada, obtenida de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas. Es importante mencionar que la "convolución" es un concepto matemático que se refiere a la concomitancia y mutuo condicionamiento, en este caso, de la amenaza y la vulnerabilidad. Dicho de otra forma, no se puede ser vulnerable si no se está amenazado y no existe una condición de amenaza para un elemento, sujeto o sistema si no está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza (Cardona, 2001).

Estudios recientes han llegado a la conclusión que la palabra "riesgo" tiene dos connotaciones distintas: en el lenguaje popular, por lo general se hace énfasis en el concepto de la probabilidad o la posibilidad de algo, mientras que en un contexto técnico, con frecuencia se hace más énfasis en las consecuencias, en términos de "pérdidas posibles" relativas a cierta causa, lugar y momento en particular. Se puede observar que la gente no necesariamente comparte las mismas percepciones sobre el significado y las causas subyacentes de los diferentes riesgos (UNISDR, 2009).

Las definiciones de Amenaza y Riesgo son totalmente diferentes entre sí, desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, aunque en ocasiones han sido consideradas erróneamente como sinónimos. Según Fournier (1985) la diferencia fundamental entre la Amenaza y el Riesgo está en que la Amenaza se relaciona con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el Riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

1.2. Procesos de Remoción en Masa (PRM)

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra (PMA-GCA 2007), por lo tanto la configuración morfológica y evolución de las laderas juegan un papel determinante (Brunsdén 2002). Aunque los PRM producen modificaciones del terreno dentro del ciclo geomorfológico natural y continuo (Scheidegger 1998) en los últimos años la ocurrencia de estos movimientos ha estado más asociada a la acción del hombre sobre el medio físico (factor antrópico), que ha intervenido en las zonas de laderas, cambiando el uso del suelo.

1.2.1. Definiciones de Movimientos en Masa

Los primeros estudios que se desarrollaron entorno al término "movimiento de remoción en masa" están basados en los aportes hechos por Albrecht Penck (1894) en su obra titulada en español "*Morfología de la superficie terrestre*", en la cual diferenció los términos "movimiento de remoción en masa" y "transporte de una masa". Es importante destacar antes de continuar que hay una amplia variedad de nombres para los Procesos de Remoción en Masa, tales como movimientos en masa, procesos de ladera, movimientos de pendiente, procesos gravitacionales, "deslizamientos", entre otros.

Siguiendo con los inicios en este campo, tiempo después Sharpe (1938) definió los "deslizamientos" como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa



relativamente seca de tierra, roca o de ambos materiales, por efecto de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Sharpe definió una escala cualitativa de velocidad, de imperceptible a perceptible en movimientos tipo flujo y de lento a muy rápido en movimientos tipo deslizamiento.

En este punto es importante mencionar que en general algunos movimientos en masa son pequeños e imperceptibles, en tanto otros involucran grandes volúmenes de material y alcanzan distintas velocidades con un gran poder destructivo (PMA-GCA 2007).

Para Karl Terzaghi (1950) un "deslizamiento" es un sistema mecánico que se desarrolla en el tiempo a través de varias etapas. Terzaghi enfocó su estudio hacia los movimientos en masa que ocurren a mayor velocidad y que son generados por falla o rotura, por lo tanto los concibió como un desplazamiento rápido de una masa, que puede estar conformada por roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de dicha masa que se desliza se mueve hacia abajo y hacia el exterior.

Por su parte, Varnes (1958) especificó que en un movimiento en masa, los materiales constituyentes de la masa que se desliza pueden ser naturales y artificiales. Al identificar rellenos artificiales en la masa deslizada, se empezó a estudiar la incidencia de la acción del hombre (factor antrópico) en este tipo de movimientos. Skempton y Hutchinson (1969) introdujeron en la definición de movimiento en masa, el concepto de superficie de cizallamiento en los límites de la masa deslizada, haciendo referencia a una superficie de rotura bien definida que se genera cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material. Es importante mencionar que otros autores como Zaruba y Mencl (1969), Gary y Wolf (1972), Coates (1977) y Brusden (1979) han hecho valiosos aportes para la definición de los "movimientos en masa".

De acuerdo con algunos autores, la definición más aceptada es la dada por Cruden (1991), quien conceptuó que el término "movimientos en masa" incluye todos aquellos movimientos en dirección ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. García et al. (1998) consideran que la gravedad es una fuerza de carácter universal, que para efectos de los PRM, está relacionada con el peso de los diferentes materiales que conforman el talud y que puede encontrarse en un momento dado en capacidad de movilizarse, aunque concluyen que la gravedad no siempre desestabiliza un talud ya que su efecto depende en buena medida de la disposición espacial de los materiales que lo conforman.

Para Hauser (1993), estos PRM son procesos de transporte de material definidos como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores. Por otra parte, Ojeda et al. (2001) llama a la masa que se desliza "material geológico" y considera que los Movimientos en masa comprenden una gran variedad y complejidad de movimientos debido a la fuerza de la gravedad. Rodríguez-Pineda (2001) coincide con Crozier (1986) al considerar que un movimiento en masa es aquel movimiento gravitacional de material del terreno, sin la ayuda de corrientes de agua como un agente de transporte.

Según la USGS (2004), el término "Movimiento en masa" describe una amplia variedad de procesos que resultan en el movimiento hacia abajo y hacia el exterior de los materiales que conforman un talud, que incluye roca, suelo, relleno artificial, o una combinación de éstos. Los materiales pueden movilizarse por la caída, vuelco, deslizamiento, esparcimiento, o cuando fluyen. Este concepto de la USGS (2004) cita los



distintos tipos de PRM, que se analizarán más adelante en la clasificación de los Movimientos en masa.

Es importante mencionar que los movimientos en masa, junto con la erosión, son procesos naturales de denudación de la corteza terrestre (Gonzalez 2005) que en ocasiones han sido confundidos entre sí. La diferencia fundamental radica en que en la erosión si existe un agente de transporte (agua, viento, hielo, hombre) capaz de arrancar y movilizar el material (Ojeda et al. 2001).

En ciertas ocasiones los movimientos en masa son incorrectamente denominados deslizamientos ("landslides"). El error es de concepto, dado que la traducción literal es correcta. Es importante clarificar que el término "deslizamiento" se utiliza en forma general, pero en el sentido estricto de su significado solo correspondería a algunos tipos de PRM, y quizá poco adecuado para referirse a otros tipos de movimiento en masa tan diferentes en su mecanismo (Ojeda et al. 2001). Para Guzzetti et al. (1999) la confusión conceptual del término "deslizamiento" surge al emplearlo tanto para el depósito de material ya deslizado, como para el movimiento del material de una ladera o de una masa deslizada existente.

El término "deslizamiento" se utiliza para distintos movimientos de ladera que se producen a lo largo de una superficie de rotura bien definida. Aunque ya se ha explicado que esto no es lo ideal, en el presente trabajo se sigue utilizando de forma genérica para cualquier tipo de rotura de ladera.

1.2.2. Clasificación de los Movimientos en masa

En la actualidad existe un buen número de métodos y sistemas de clasificación para los diversos tipos de movimiento masivo de suelos y rocas (García et al. 1998), definidos con base en las características que pueden distinguir a un movimiento de otro, como el tipo de material (suelo, detritos o roca), la forma de la masa desplazada, la velocidad, la dinámica del movimiento y otras (Ojeda et al. 2001). Según Rodríguez-Pineda (2012) para realizar la clasificación de los "deslizamientos" se han utilizado los siguientes factores:

- Material
- Atributos geomorfológicos
- Geometría del deslizamiento
- Tipo de movimiento
- Clima
- Humedad
- Velocidad de movimiento
- Detonante

García et al. (1998) considera que la clasificación de "deslizamientos" en un medio tropical debe ser el primer paso hacia la selección de medidas preventivas o correctivas de la inestabilidad. Según Denness (1973) citado por García et al. (1998) en cada categoría los "deslizamientos" tienen características reconocidas casi constantes, típicas del mecanismo particular que interviene en la falla, utilizables para la clasificación visual en el terreno.

A continuación se citan de modo sucinto a nivel cronológico algunos sistemas de clasificación propuestos de los movimientos en masa (Rodríguez-Pineda 2012):



Sharpe (1938): En esta clasificación se distinguen distintos tipos de flujos de "barro" a partir del tipo de clima y ambiente; se incluye la subsidencia como un proceso; se evalúan todo tipo de geomateriales. La soliflucción se define como un flujo de suelo y se considera un factor de inestabilidad.

Skempton & Hutchinson (1969): Estos autores propusieron un sistema de clasificación de deslizamientos en taludes de materiales arcillosos. Parte de la base de que un talud falla ante todo en respuesta a fuerzas gravitacionales y en ocasiones con la ayuda de la actividad sísmica (García et al., 1998).

Coates (1977): Este sistema identifica los movimientos en masa como deslizamientos, flujos y caídas; diferencia los puntos donde comienza la falla en roca y en suelos.

Varnes (1978): Los criterios principales se refieren al tipo de deslizamiento y al tipo de material; incluye el concepto de movimientos complejos en los casos en que se combinan dos o más movimientos.

Pierson y Costas (1987): Este sistema propone una clasificación en términos de los tipos de flujos, la concentración de sedimentos, su velocidad media y como es el comportamiento de dichos fluidos. Se considera que los flujos se comportan como un fluido para una carga baja de sedimentos.

Hutchinson (1988): La clasificación se rige por la morfología de los movimientos de ladera, con alguna consideración al mecanismo, el material y la velocidad del movimiento. Este sistema se aplica principalmente a los movimientos de masas subaéreos, a los generados en las laderas naturales y a los provocados por el hombre.

Sassa (1989): Este sistema describe los tipos de movimientos en masa a partir de la evaluación de las trayectorias de esfuerzos de los deslizamientos, los cuales están controlados por la resistencia al corte pico y residual. También diferencia el proceso de licuación por carga estática y carga cíclica.

De las clasificaciones de movimientos en masa citadas, la clasificación más ampliamente conocida y aceptada es la propuesta por Varnes (1978) y actualizada por Cruden & Varnes (1996). Estos autores emplean como criterio principal para la clasificación, el tipo de movimiento y el tipo de material, de los cuales puede surgir una gran complejidad de movimientos.

Los tipos de movimientos definidos inicialmente por Varnes (1978) y que servirán de guía en el presente documento, son los siguientes:

- Caídas
- Volcamientos
- Deslizamientos
- Flujos
- Propagación lateral
- Movimientos complejos

En tanto los materiales se pueden dividir en suelo (tierra), detritos (derrubio) y roca. Es importante resaltar que Cruden y Varnes (1996) consideran **detritos** a un material que contiene una proporción significativa, entre el 20 y el 80% de partículas de diámetro mayor a 2 mm mientras que un **suelo** contiene el 80% o más de partículas de diámetro menor a 2 mm (límite superior del tamaño arena). En caso de los suelos, cuando el contenido de limo y arcilla es el mayoritario de la fracción fina, se considera **barro**.



La clasificación de movimientos en masa definida en el Proyecto EPOCH (1993) llamado en español "Ocurrencia Temporal y Prevención de Deslizamientos en la Comunidad Europea", es sencilla de entender y relativamente completa (ver cuadro 1); se basa en los criterios de tipo de movimiento (mecanismos de falla) y tipo de material (Roca, detritos y suelo), de acuerdo con lo planteado en la clasificación de Varnes (1978) y en menor medida en lo expuesto en la clasificación de Hutchinson (1988).

Tipo de movimiento	Roca	Detritos	Suelo
Caída	Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de suelo
Volcamiento	Volcamiento de rocas	Volcamiento de detritos	Volcamiento de suelo
Deslizamiento (Rotacional)	Simple (Slump) Múltiple Sucesivo	Simple Múltiple Sucesivo	Simple Múltiple Sucesivo
Deslizamiento (Traslacional) - No rotacional	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de detritos en bloque	Deslizamiento traslacional de suelo
Planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de barro
Propagación lateral	Propagación lateral en rocas	Propagación lateral en detritos	Propagación lateral en suelo
Flujo	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de tierra, arena o suelo
Complejo	Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujo de tierra

Cuadro 1. Clasificación Europea de Procesos de Remoción en Masa

Fuente: Tomado de Proyecto EPOCH (1993)

El proyecto EPOCH (1993) ha contribuido a la definición de los atributos temporales de los movimientos en masa en términos de actividad, tipo, período de retorno, modo y período de la última actividad (ver figura 2), además del estado de la actividad que a menudo se prevé en las bases de datos (Panizza, 1996).

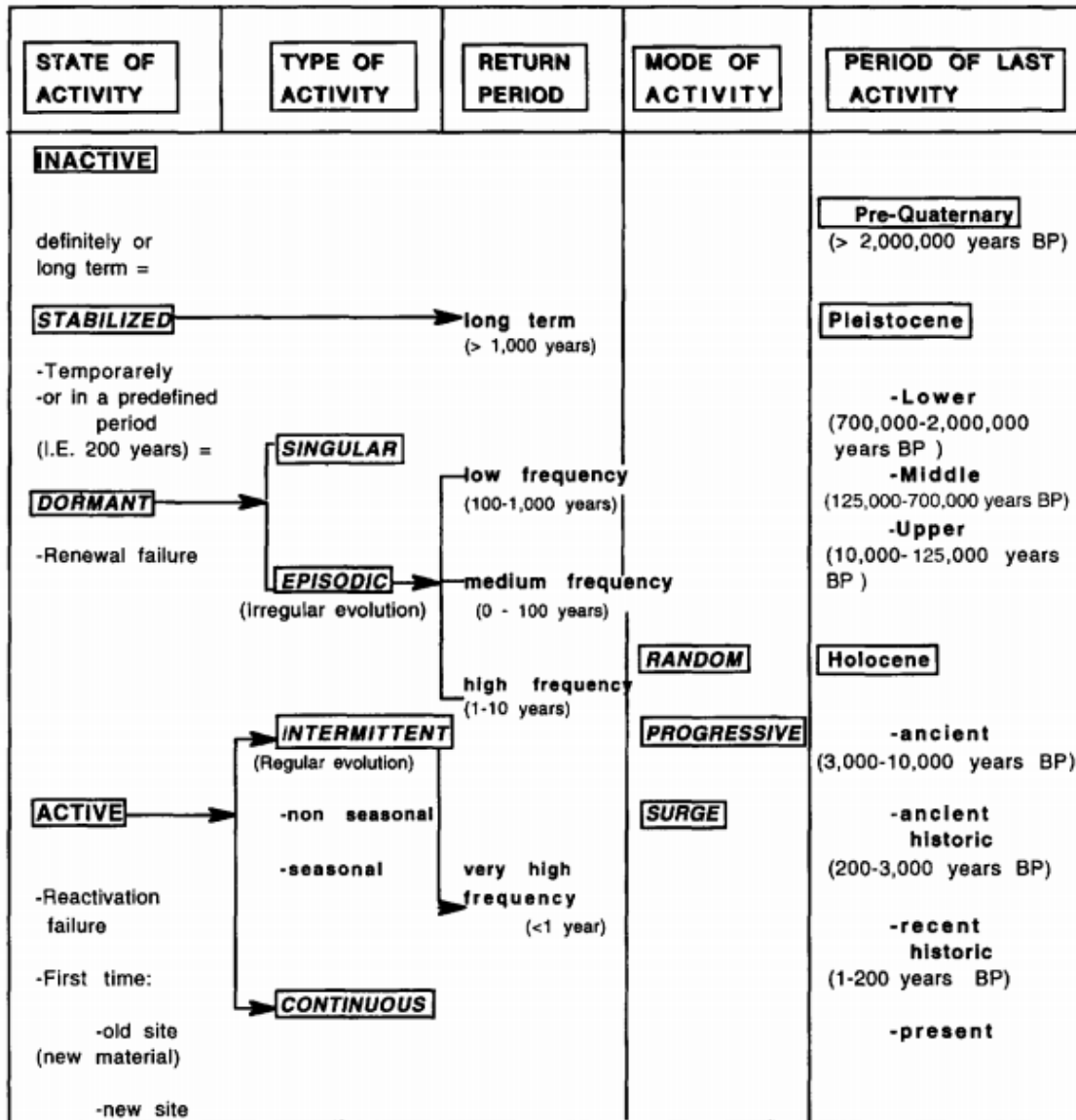


Figura 2. Ocurrencia temporal de movimientos en masa

Fuente: Tomado de Flageollet (1996)

1.2.3. Caídas

En este tipo de movimientos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de roca empinado o un acantilado, a lo largo de una superficie sobre la cual hay poco o ningún desplazamiento cortante y desciende en la mayoría de los casos por caída libre, rebote o rodando. Los movimientos son muy rápidos a extremadamente rápidos y pueden estar o no precedidos de movimientos menores (Varnes, 1978), que van separando paulatinamente los bloques de la masa rocosa (ver figura 4).

Según García et al. (1998) la caída de roca se refiere esencialmente a la de una masa fresca, desprendida del macizo. La caída de detritos ocurre en una masa que ya estaba compuesta de fragmentos o detritos rocosos antes de la falla. En el documento de Varnes (1978) se sugiere que las caídas de material nuevo se llamen primarias y las que



abarcan detritos sueltos transportados con anterioridad, se llamen secundarias. Se podría distinguir dentro de las caídas de detritos las de cascajo (tamaños menores de 20 mm), guijarros (20 a 200 mm) y cantos o bloques (más de 200 mm).



Figura 3. Caídas primarias y secundarias

Fuente: Tomado de Hutchinson (1988)

En este mismo sentido, en la clasificación de Hutchinson (1988) se consideran caídas primarias para roca y suelo que se separan de modo progresivo y prolongado de una masa parental hasta desprenderse, en tanto que las secundarias se refieren a la caída de piedra y cantos rodados ya separados con anterioridad de la masa parental (ver figura 3).

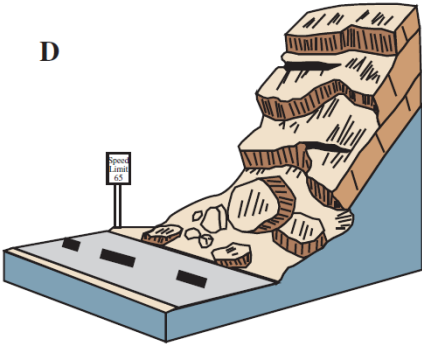
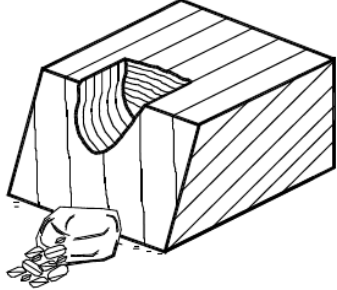
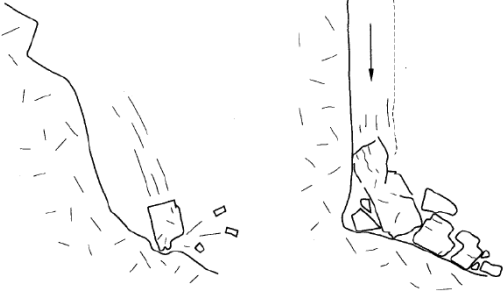
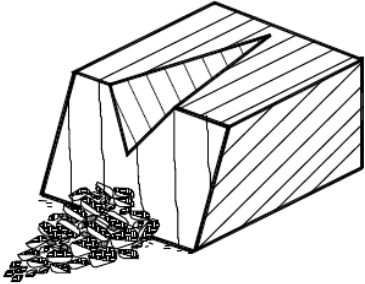
	
<p>Caída de roca en vía Fuente: Tomado de USGS (2004)</p>	<p>Caída de roca Fuente: Tomado de Suarez (1997)</p>
	
<p>Mecanismos de desprendimiento y colapso Fuente: Tomado de Corominas (2004)</p>	<p>Caída de detritos Fuente: Tomado de Suarez (1997)</p>

Figura 4. Esquemas de Caídas de rocas



En relación a los modos de caída, se han hecho observaciones que muestran que los movimientos hacia delante de masas de suelo o roca son frecuentemente suficientes para una caída libre si los taludes debajo de las masas exceden los 76° (0.25:1). En caso de taludes con ángulos inclinados menores de 76° se considera que la caída será de menor impacto y la masa luego de caer rebotará. En largos taludes con ángulos por debajo de 45° (1:1), las partículas tendrán un movimiento dominado por rodadura, hay una transición gradual de rodadura a rebote (Cruden y Varnes, 1996).

En la clasificación de Cruden y Varnes (1996) se incluyen las caídas complejas. Un ejemplo de ellas son los Sturzstroms, que son aquellas masas enormes de detritos (residuos de roca y polvo) extremadamente rápidos (pueden alcanzar velocidades de 50 m/s) generados por grandes caídas y deslizamientos. También han sido llamados como “avalanchas tipo caída de rocas” (Varnes, 1958) y “avalanchas de rocas” (Evans et al., 1989). El movimiento de Sturzstroms depende de la turbulencia del grano fino con esfuerzos dispersivos con origen del momento transferido entre granos colindantes (Cruden y Varnes, 1996).

1.2.4. Volcamientos

El volcamiento se considera un tipo de movimiento distinto. Consiste en la rotación hacia delante de una unidad o varias, alrededor de algún punto de giro o pivote en su parte inferior, debajo de la unidad, por acción de la gravedad y de fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos (agua o hielo) en las grietas (Varnes, 1978). El inicio de un proceso de volcamiento puede conducir a caídas o deslizamientos, dependiendo de la geometría de la masa fallada, geometría de la superficie de separación y orientación y magnitud de las discontinuidades activas. Los rangos de volcamiento van de extremadamente rápido a extremadamente lento, algunas veces acelerados a través del movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

Dentro del mecanismo de volcamiento pueden distinguirse varios procesos:

Volcamiento flexural: Ha sido descrito por Goodman and Bray (1976) citado por Cruden y Varnes (1996) como: “Los que ocurren en rocas con un sistema de discontinuidades principal, orientado para presentar en un talud de roca con vigas semi-continuas en voladizo (...) Columnas continuas se rompen en flexión a medida que se inclinan hacia adelante (...) Deslizándose, socavando o erosionando la punta (de la masa desplazada), de esta forma se inicia la falla y su retroceso hacia atrás con grietas amplias a tensión profundas”.

Volcamiento en bloque: Ocurre “cuando las columnas individuales son divididas por discontinuidades ampliamente espaciadas. La punta del talud con columnas cortas, recibe la carga de las columnas largas de encima. Éste empuja la columna de la punta hacia adelante, permitiendo además el volcamiento” (Goodman and Bray, 1976 citado por Cruden y Varnes, 1996).

Volcamiento Chevron o Cabeceo: Son bloques volcados en los cuales los buzamientos de los bloques caídos son constantes y el cambio de buzamiento es concentrado en la superficie de ruptura (Cruden et al., 1993 citado por Cruden y Varnes, 1996). Ellos han sido llamados así por su parecido con los pliegues Chevron (Ramsay, 1967 citado por Cruden y Varnes, 1996). Este tipo de volcamiento ocurre sobre pendientes más pronunciadas que los volcamientos en bloque. La superficie de ruptura es



frecuentemente una superficie deslizante que forma un volcamiento complejo de roca combinado con un deslizamiento de roca.

Volcamiento de bloque por flexión: Este tipo de volcamiento es caracterizado por la flexión pseudo-continua de largas columnas a través de movimientos acumulados a lo largo de las numerosas diaclasas transversales (Goodman and Bray, 1976 citado por Cruden y Varnes, 1996). El movimiento de deslizamiento es distribuido a lo largo de varias discontinuidades en la punta de la masa desplazada, mientras que en el resto de la masa dicho movimiento de deslizamiento y la sobrecarga ocurren en estrecha asociación.

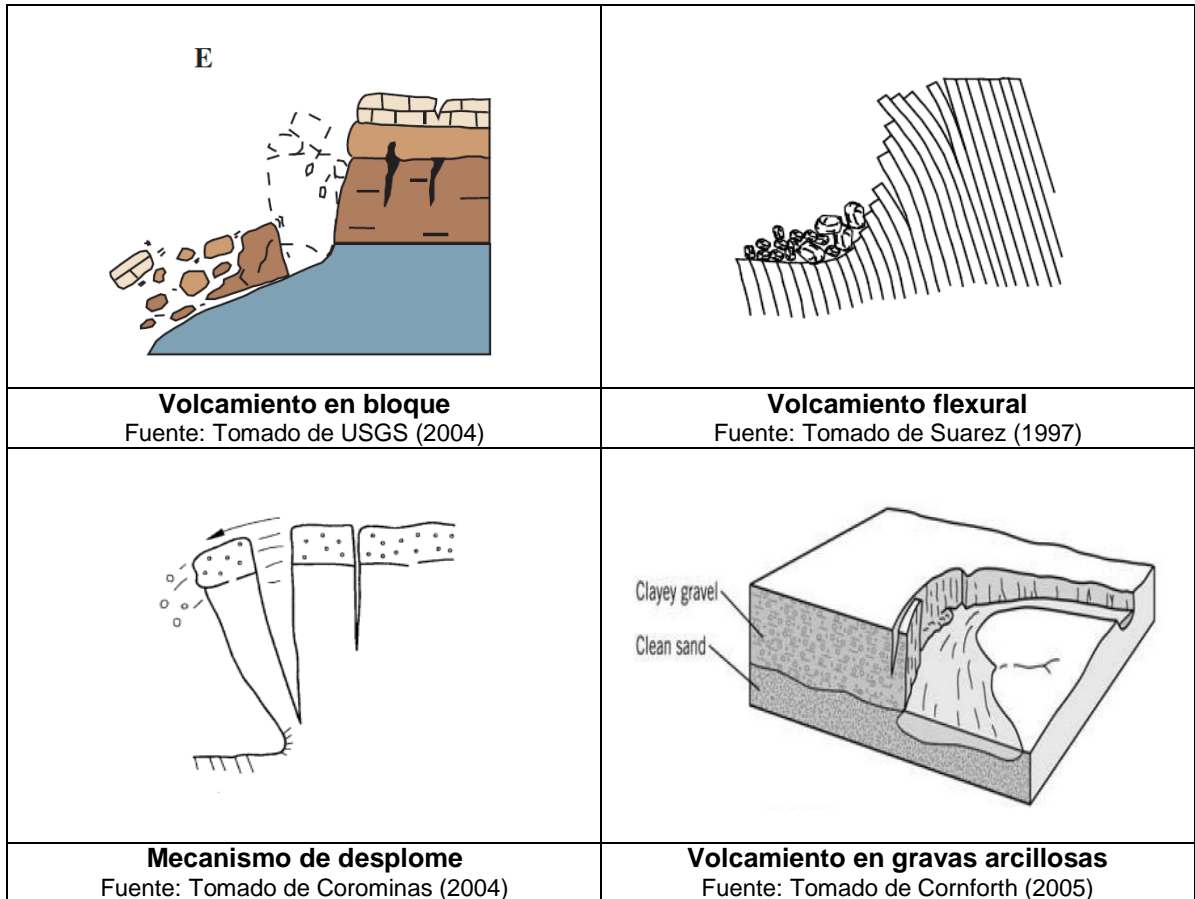


Figura 5. Esquemas de volcamientos

Volcamientos compuestos y complejos: Se han identificado cuatro modos de deslizamiento compuesto, en los cuales el volcamiento es causado por deslizamientos tempranos (Goodman and Bray, 1976 citado por Cruden y Varnes, 1996).

- Un volcamiento retrogresivo de roca en combinación con un deslizamiento de roca ocurre cuando los bloques de la corona se vuelcan sobre la cabeza de la masa desplazada.
- Un volcamiento de avance en roca en combinación con un deslizamiento rotacional de tierra o detritos ocurre cuando un deslizamiento rotacional de tierra sobre una masa rocosa sedimentaria con un buzamiento muy empinado causa un



volcamiento de base, pues el deslizamiento induce fuerzas de corte en el tope de la masa rocosa.

- Deslizamiento en roca combinado con un volcamiento en la punta de dicho deslizamiento, ocurre cuando el volcamiento por debajo de la punta de la superficie de ruptura de un deslizamiento de roca es causado por una carga transmitida por dicho deslizamiento.
- Un volcamiento retrogresivo múltiple ocurre cuando la formación de grietas de extensión en las coronas de los deslizamientos pueden crear bloques capaces de volcarse, formando vuelcos por grietas de tensión.

Por otra parte, en la clasificación de Hutchinson (1988) se consideran dos fallas por volcamientos, aquellas limitadas por discontinuidades pre-existentes que son las más predominantes y las liberadas por fallas a tensión en materiales anteriormente intactos. En las primeras se presentan volcamientos simples y múltiples (ver figura 6). En los volcamientos simples, el bloque en principio descansa sobre una base firme, el volcamiento parece ser provocado por la falta de fundación del bloque que es socavada por la erosión o por fallas cortantes. Los volcamientos múltiples son más comunes, se presentan sobre varios bloques que interactúan unos con otros y se generan predominantemente por discontinuidades pre-existentes.

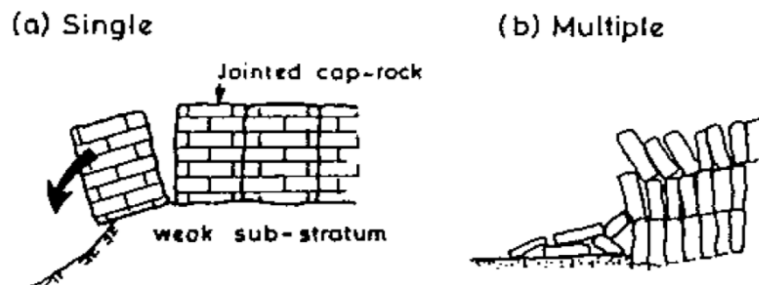


Figura 6. Volcamientos simples y múltiples por discontinuidades pre-existentes

Fuente: Tomado de Hutchinson (1988)

En el caso de los volcamientos por fallas a tensión en materiales previamente intactos, la socavación de estos materiales puede generar volcamiento por las fallas a tensión en la parte posterior de la masa rocosa. Este tipo de volcamiento ha ocurrido en suelos congelados a lo largo de riberas, orillas de lagos y líneas de costa en Alaska y Siberia donde se ha presentado fuerte socavación, en forma de nicho o cueva termo-erosionada, especialmente durante las inundaciones de primavera (Walker, 1983 citado por Hutchinson, 1988).

1.2.5. Deslizamientos

Este movimiento consiste en la deformación por corte y desplazamiento generados a lo largo de una o varias superficies que son visibles o pueden inferirse de forma razonable, o dentro de una zona más o menos estrecha. La rotura del talud no siempre es simultánea en todos los puntos de la superficie de falla, sino que puede propagarse desde una zona de falla local. La masa afectada puede deslizarse más allá de la superficie original de rotura sobre el terreno natural (Varnes, 1978), generando una superficie de separación. Algunas veces la primera señal de estos movimientos son



grietas de tracción en la superficie original del suelo a lo largo de la cual se formará el escarpe principal (Cruden y Varnes, 1996).

Hutchinson (1988) enfocó su estudio hacia los deslizamientos que ocurren a mayor velocidad, que tienen lugar en una o más superficies de falla que definen el movimiento en masa y que exhiben una etapa de falla inicial seguido del movimiento. Los deslizamientos según lo planteado por Hutchinson (1988) poseen una geometría de falla característica y dominante, su movimiento es moderado, los suelos y rocas constituyentes son de predominio friccional y su resistencia tiende a aumentar con la profundidad en proporción a la presión efectiva de sobrecarga, por lo tanto el desarrollo de fallas profundas es generalmente inhibido y la mayoría de deslizamientos son relativamente superficiales.

Para Varnes (1978) los deslizamientos se subdividen en dos (2) grupos, en los primeros el material en movimiento no se deforma considerablemente y se conforma por una o pocas unidades, mientras que en los segundos el material se deforma significativamente o se constituye de muchas unidades semi-independientes. Estos grupos se clasifican respectivamente en deslizamientos rotacionales y en deslizamientos planares (traslacionales) y presentan diferencias significativas tanto en el análisis de estabilidad como en la planificación y diseño de medidas correctivas.

Deslizamientos Rotacionales: Según Varnes (1978) los ejemplos más comunes de deslizamientos rotacionales son los que presentan pequeñas deformaciones, los cuales son movimientos que se generan a lo largo de una superficie de ruptura que describe una curva cóncava hacia arriba. Si la superficie de falla es circular o cicloidal en perfil, cinemáticamente, la masa desplazada puede moverse a lo largo de la superficie con deformaciones internas pequeñas (Cruden y Varnes, 1996).

Las deformaciones combinadas con otro tipo de movimientos constituyen una alta proporción de problemas de inestabilidad en la ingeniería. El movimiento en las deformaciones se da solo a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, las grietas expuestas son concéntricas vistas en planta y cóncavas hacia la dirección del movimiento. En muchos deslizamientos, la superficie subyacente de ruptura en conjunto con los escarpes expuestos en la corona constituye la forma de una cuchara. (Varnes, 1978). Si el deslizamiento rotacional se extiende una distancia considerable a lo largo del talud perpendicular a la dirección del movimiento, las superficies de ruptura se pueden aproximar a la forma de un sector de un cilindro, cuyo eje sería paralelo al talud (Cruden y Varnes, 1996).

Para Hutchinson (1988) estos deslizamientos ocurren en laderas constituidas por depósitos de arcilla o shale, relativamente homogéneos de espesor grueso, por materiales granulares o roca muy fracturada, en la cual la presión de poros es suficientemente alta para causar una falla rotacional en lugar de una traslacional. Según Hutchinson (1968) existen tres (3) tipos principales de deslizamientos rotacionales, teniendo en cuenta el número de superficies de falla y su ubicación: simples, sucesivos y múltiples, los cuales se pueden apreciar en la figura 7.

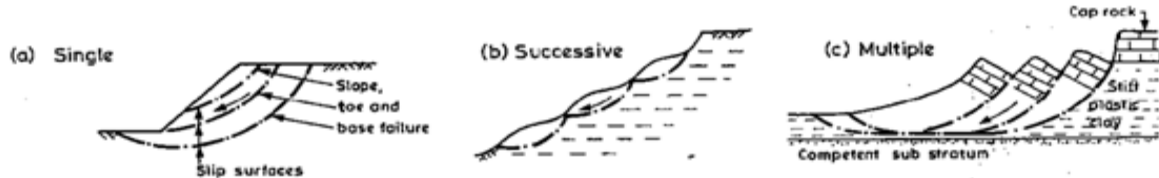


Figura 7. Deslizamiento rotacional simple, sucesivo y múltiple

Fuente: Tomado de Hutchinson (1988)

Por otra parte, los deslizamientos rotacionales son movimientos en masa muy comunes, por lo tanto se han utilizado para definir una nomenclatura general que identifique las partes de un deslizamiento típico, como se muestra en la figura 8.

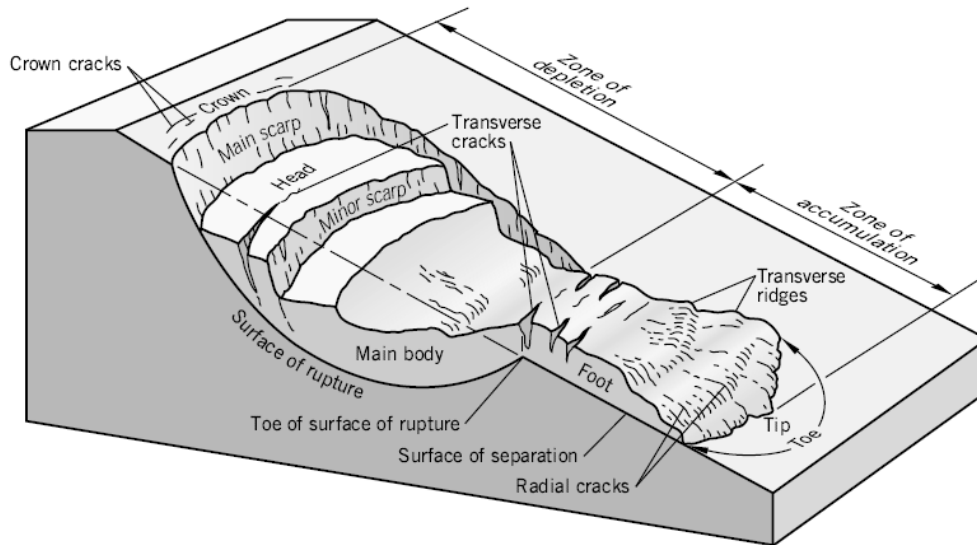


Figura 8. Nomenclatura de un deslizamiento

Fuente: Tomado de Varnes (1978) y modificado por Cornforth (2005)

En la corona, el movimiento puede ser totalmente hacia abajo y tendría una leve rotación aparente, sin embargo la parte superior de la superficie de cada unidad comúnmente se inclina hacia atrás, hacia la pendiente, originando lo que se denomina deslizamientos rotacionales múltiples retrogresivos, aunque en ciertos casos, algunos bloques pueden inclinarse hacia adelante (Varnes, 1978). En algunos casos, al aumentar el número de unidades en estado de falla, el conjunto puede llegar a desarrollar un movimiento traslacional (García et al., 1998).

En general este tipo de movimiento es en esencia de rotación alrededor de un eje paralelo al talud, y es por lo general profundo en suelos homogéneos de gran espesor, como en muchos coluviones, capas arcillosas gruesas, rellenos terraplenes y botaderos. Pueden ser superficiales en los mantos de suelo residual, pero de todas maneras tienen el carácter rotacional y dejan la concavidad típica en la corona (García et al., 1998).

En casos avanzados de mayor gravedad, se distinguen varios escarpes, hundimientos y protuberancias sucesivas en el cuerpo del deslizamiento; en la pata se llegan a generar flujos de tierra e incluso flujos de lodo. Casi siempre la retrogresión avanza desde abajo hacia la parte superior de la ladera, pero hay casos en los cuales se desencadena la



inestabilidad de arriba hacia abajo, por sobrecarga impuesta por los materiales que se deslizan (Varnes, 1978).

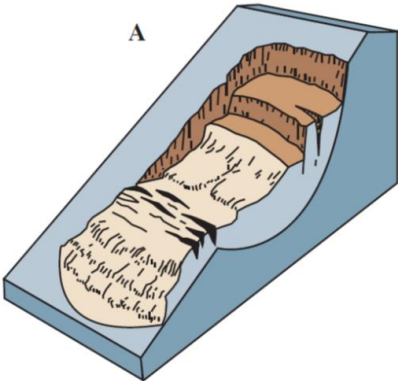
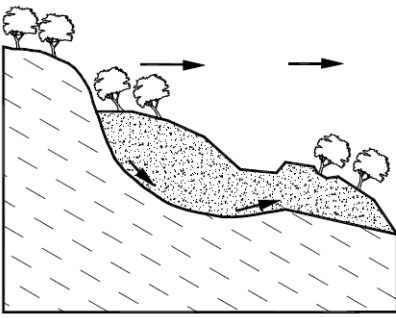
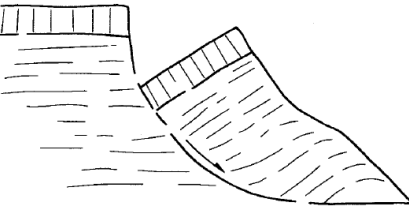
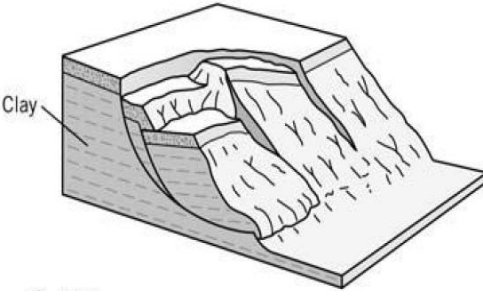
	
<p>Deslizamiento rotacional Fuente: Tomado de USGS (2004)</p>	<p>Dirección del deslizamiento rotacional Fuente: Tomado de Suarez (1997)</p>
	
<p>Movimiento rotacional Fuente: Tomado de Corominas (2004)</p>	<p>Deslizamientos en arcillas Fuente: Tomado de Cornforth (2005)</p>

Figura 9. Esquemas de Deslizamientos rotacionales

Deslizamientos Traslacionales: En este tipo de deslizamientos, la masa avanza hacia fuera o hacia abajo; hacia fuera a lo largo de una superficie más o menos plana o suavemente ondulada y tiene un leve movimiento en forma de curva o se presentan deformaciones con inclinaciones hacia atrás (ver figura 10). Un deslizamiento traslacional puede desarrollarse indefinidamente si la superficie en la que reposa es suficientemente inclinada y larga, de tal modo que la resistencia al corte permanezca menor que la fuerza del movimiento (Varnes, 1978).

La masa se moviliza comúnmente a lo largo de una superficie de ruptura planar o suavemente ondulada, deslizándose por fuera de la superficie original (Cruden y Varnes, 1996). En muchos de estos deslizamientos, la masa movilizada se deforma considerablemente o se rompe en múltiples unidades independientes cuando la deformación y la desintegración son continuas y hay incrementos en el contenido de agua o en la velocidad o en ambas, la ruptura de la masa deslizada puede cambiar su estado convirtiéndose en un flujo (García et al., 1998).



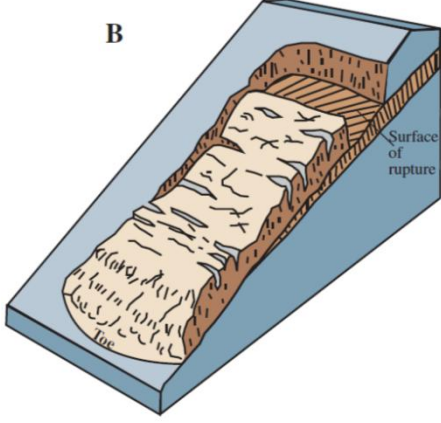
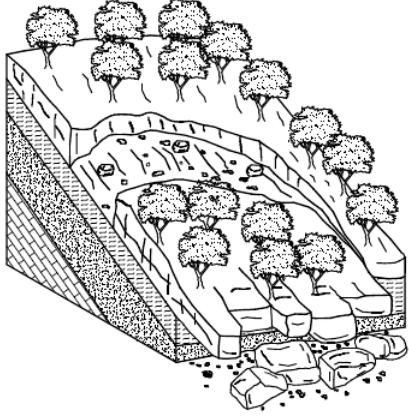
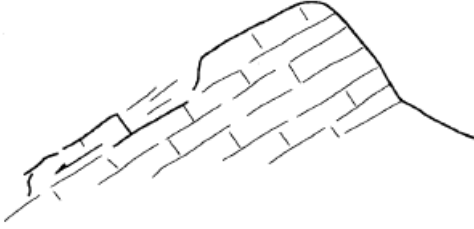
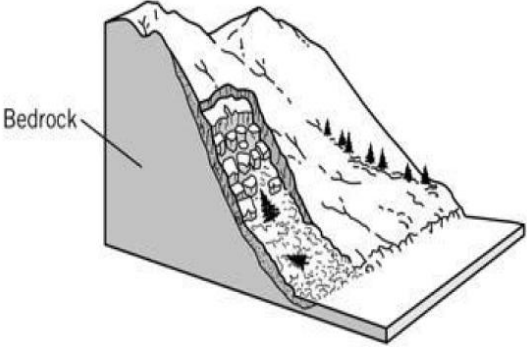
	
<p>Deslizamiento traslacional en suelo Fuente: Tomado de USGS (2004)</p>	<p>Movimiento traslacional Fuente: Tomado de Suarez (1997)</p>
	
<p>Mecanismo por resbalamiento Fuente: Tomado de Corominas (2004)</p>	<p>Deslizamiento traslacional en roca Fuente: Tomado de Cornforth (2005)</p>

Figura 10. Esquemas de Deslizamientos traslacionales

El movimiento de un deslizamiento traslacional es comúnmente controlado estructuralmente por superficies de debilidad tales como fallas, diaclasas, planos estratificados y variaciones en la resistencia al corte entre las capas o los depósitos estratificados o en el contacto entre la roca sana y los detritos suprayacentes (Varnes, 1978).

Los deslizamientos traslacionales se dan normalmente por el movimiento de espesores delgados de fragmentos de roca, mezclas de suelo y roca fracturada (detritos o escombros de meteorización), coluvión, suelo, material orgánico y vegetación a lo largo de las superficies casi planas. Algunos clasifican este tipo de movimientos en deslizamientos de roca y en deslizamientos de detritos (Varnes, 1978).

Deslizamientos compuestos: Estos deslizamientos son movimientos intermedios entre los rotacionales y los traslacionales (Skempton y Hutchinson, 1969 citado por Cruden y Varnes, 1996). Las superficies de ruptura tienen escarpes principales empinados que pueden aplanarse con la profundidad. La punta de estas superficies de ruptura puede tener pendientes ascendentes. El desplazamiento a lo largo de superficies de ruptura de curvas complejas usualmente requiere deformaciones internas y cortes a lo largo de las



superficies dentro del material desplazado y resulta en la formación de escarpes intermedios (Cruden y Varnes, 1996).

Un deslizamiento compuesto a menudo indica la presencia de estratos débiles o límites entre el material meteorizado y no meteorizado, que controlan la localización de superficies de ruptura (Hutchinson, 1988 citado por Cruden y Varnes, 1996). Según Cruden (1991) citado por Cruden y Varnes (1996) en un deslizamiento compuesto, el ancho de un bloque deprimido por una falla puede ser proporcional a la profundidad de la superficie de ruptura.

Hutchinson (1988) divide los deslizamientos compuestos en dos tipos, aquellos generados por corte interno hacia la parte posterior de la masa deslizada y los deslizamientos continuos progresivos, que involucran fallas rotacionales en la parte posterior del deslizamiento en mención, seguido por largas fallas traslacionales en el resto del mismo. Es importante mencionar que los deslizamientos generados por corte interno se distinguen por la fragilidad de la falla interna, unos presentan fragilidad baja a media y su velocidad de falla es generalmente moderada y los otros presentan fragilidad alta y la velocidad puede ser extremadamente rápida como en la falla de Vaiont, Italia en el año de 1963.

1.2.6. Propagación lateral

El término propagación fue introducido en la ingeniería geotécnica por Terzaghi y Peck en el año de 1948 para describir movimientos repentinos sobre acuíferos de arena o limos cubiertos por arcillas homogéneas o rellenos. Se entiende por propagación a una extensión de un suelo cohesivo o masa de roca combinada, con un proceso de subsidencia general de las masas fracturadas de material cohesivo en un material subyacente más blando. La propagación lateral puede darse por licuación o flujo (y extrusión) del material más blando (Cruden y Varnes, 1996). De acuerdo con Varnes (1978) la extensión lateral es acomodada debido a fallas de corte o tracción. Se pueden distinguir tres (3) tipos de propagación lateral, así:

Propagación en bloque: Ocurre cuando una capa gruesa de roca está sobre un material blandos; la fuerte capa superior de roca se puede fracturar y separar en cantos o pedazos. El material blando subyacente se escurre en las grietas entre los cantos y puede rellenar el material (roto) que se ha desplazado (Cruden y Varnes, 1996). Este tipo de propagación es extremadamente lenta. Según Varnes (1978) estos movimientos se distribuyen por efecto de la extensión pero sin una superficie basal bien definida de corte o de flujo plástico. Esto ocurre predominantemente en las rocas, especialmente en las crestas de las serranías.

Propagación por licuación: Son aquellos movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a licuación o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir. El mecanismo de falla puede involucrar elementos no solo de rotación y traslación, sino también de flujo (Varnes, 1978). Este tipo de propagación se puede formar en arcillas y limos sensitivos que pierden su resistencia con perturbaciones que dañan su estructura. El movimiento es a menudo retrogresivo y traslacional, comienza en la orilla de un arroyo o línea de costa y se extiende a gran distancia, puede iniciarse súbitamente y alcanza velocidades muy rápidas (Andrus y Youd, 1987 citado por Cruden y Varnes, 1996).



Propagación compleja: Ocurren cuando se presentan grandes deformaciones en estratos de roca, como las que se dieron en muchos valles del norte y centro de Inglaterra durante la construcción de presas en el siglo XIX. Estas deformaciones se produjeron en capas de rocas casi horizontales, rígidas y diaclasadas, localizadas sobre una capa gruesa de arcillas rígidas y fisuradas o arcillas con shale, que se ubican a su vez sobre un estrato más competente (ver figura 11). La flexión o "alaveo" de estratos rígidos genera bloques del mismo estrato que tienen una inclinación hacia el valle. Esta flexión del estrato superior puede estar acompañada de deformaciones severas y pandeo del estrato inferior blando en el fondo del valle (Cruden y Varnes, 1996).

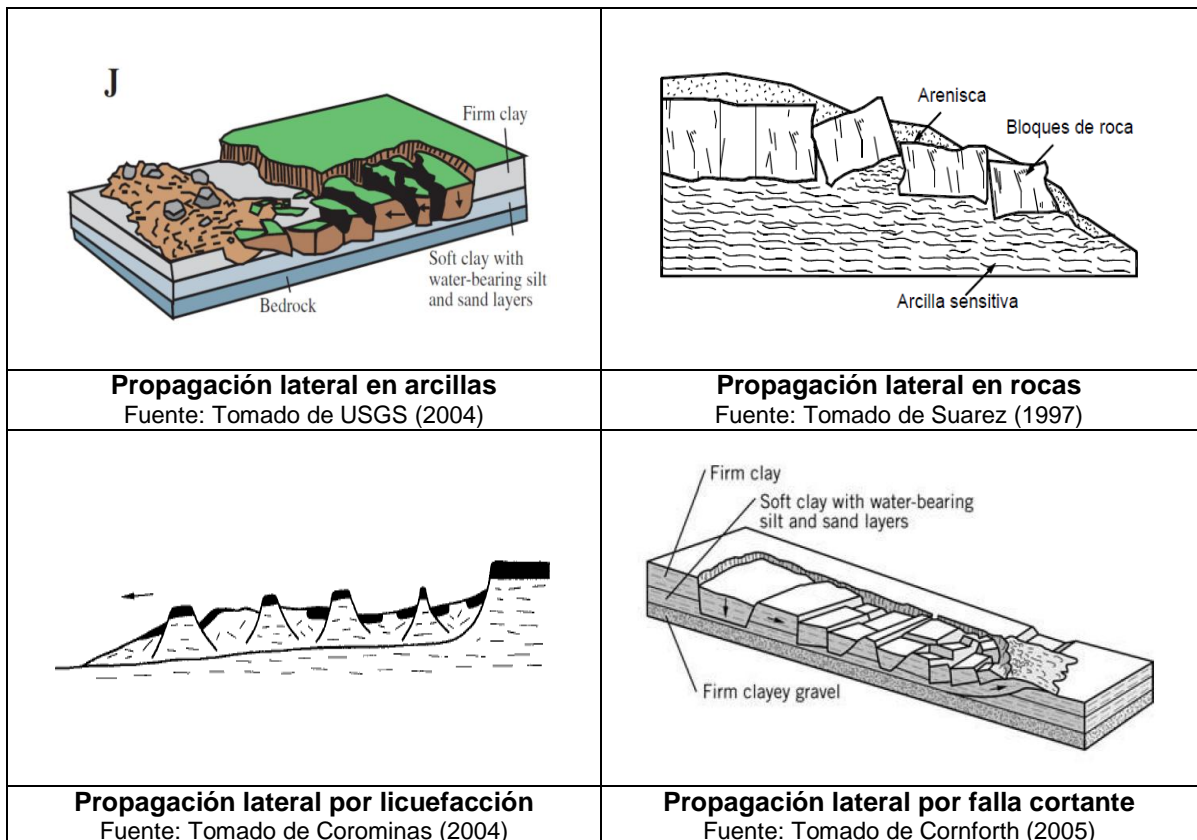


Figura 11. Esquemas de Propagación lateral

Según García et al. (1998) la velocidad del movimiento de la mayoría de las propagaciones laterales en roca es aparentemente muy baja. Los movimientos del talud por propagación lateral se generan en materiales de grano fino cuando las pendientes son bajas, en especial en limos y arcillas sensibles que pierden casi toda su resistencia al corte debido a la alteración o por remoldeo. La falla es usualmente progresiva, empieza en un área local y se propaga. A menudo la falla inicial es una deformación y la falla progresiva se extiende retrogresivamente detrás de la falla inicial. El movimiento principal de propagación lateral es la traslación y no la rotación.

Es importante mencionar que la propagación lateral es considerada por Hutchinson (1988) una variante de los deslizamientos traslacionales. Este tipo de fallas están caracterizadas por las pendientes suaves con amplios frentes, rapidez de los movimientos, sucesión de pendientes cruzadas y por las estructuras de los bloques deprimidos (Graben) y que sobresalen (Horst) en razón de las fallas en mención



generadas por la extensión de la masa de deslizamiento (ver figura 12). Las estructuras de los bloques que sobresalen (Horst) frecuentemente toman la forma de crestas afiladas. Según Hutchinson (1988) algunas experiencias han demostrado que la propagación ocurre en arcillas varvadas y en otros depósitos cuaternarios asociados con arcillas rápidas o en capas subhorizontales, sueltas y saturadas de arena o limo propensas a la licuefacción por sismo.

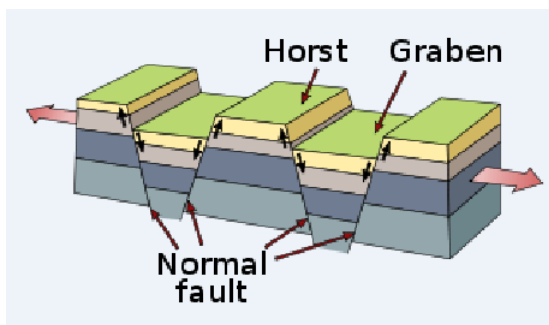


Figura 12. Esquema de bloques tipo Graben y Horst en falla normal

Fuente: Tomado de USGS (2008)

1.2.7. Flujos

Varnes (1978) definió la categoría de Flujos de material, al observar que muchos ejemplos de movimientos en masa no podían ser clasificados como caídas, volcamientos, deslizamientos o propagación. En materiales no consolidados, estos movimientos generalmente toman la forma de flujo, ya sea rápido o lento, húmedo o seco. En rocas, los movimientos más difíciles de categorizar incluyen aquellos que son extremadamente lentos y distribuidos estrechamente, fracturas no interconectadas o movimientos dentro del macizo rocoso que dan lugar a plegamientos, dobleces y abultamientos.

Un flujo es un movimiento continuo en el espacio, en el cual las superficies de corte son de poca duración, estrechamente espaciadas y usualmente no se conservan. La distribución de velocidades en las masas desplazadas se asemeja a un líquido viscoso. El límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie con movimiento diferencial apreciable o una zona de corte distribuido. Hay entonces un cambio del terreno, por lo tanto los movimientos varían de deslizamientos a flujos dependiendo del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento. Los deslizamientos de detritos pueden convertirse en flujos de detritos extremadamente rápidos o en avalanchas de detritos, porque el material desplazado pierde cohesión, por ganancia de agua o por estar localizadas en pendientes muy pronunciadas (Cruden y Varnes, 1996).

□ Reptación

Para García et al. (1998) la reptación debe ser considerada una categoría de flujo para movimientos lentos. La reptación se manifiesta como un desplazamiento muy lento de la parte superficial del terreno, aún en taludes de pendiente moderada y con cobertura vegetal; el fenómeno puede pasar inadvertido puesto que tiene velocidad promedio cercana a 1 cm/año (Suarez, 1997). Por otro lado, Hutchinson (1988) categoriza la reptación como un movimiento en masa independiente, y siguiendo a Sharpe (1938) la explica como cualquier movimiento extremadamente lento, el cual es imperceptible, a menos que sea medido a través de largos periodos.



Hutchinson (1988) distingue dos tipos de reptación, la superficial y la profunda. La primera se da en las capas superficiales del terreno por cambios estacionales de volumen, cambios de contenido de agua y temperatura y congelación y descongelación del suelo (humedad); puede generarse en regolitos (capa de material no consolidado) de grano fino de climas no periglaciares y en climas donde ocurren fluctuaciones por procesos de congelación y descongelación. La segunda es una reptación profunda y continúa, se hace significativa por debajo del límite de fluencia superficial y se produce a un esfuerzo esencialmente constante, muy por debajo de la resistencia a la rotura del material involucrado. Hansen (1984) distingue un tercer tipo de reptación, de tipo progresivo, el cual está asociado con taludes que alcanzan el punto de falla por otros movimientos en masa.

Para Varnes (1978) la reptación puede ocurrir en muchos tipos de volcamientos, deslizamientos, propagación y flujos, sin embargo no se puede restringir a una deformación continua lenta, por lo tanto este autor plantea inicialmente varios tipos de flujo tales como en roca y de detritos.

Flujos en rocas

Los movimientos de flujos en roca incluyen deformaciones que son distribuidas entre fracturas grandes y pequeñas, sin concentración de desplazamientos a lo largo de la fractura que atraviesa dicha roca. Los movimientos de un flujo son generalmente muy lentos y aparentemente constantes en el tiempo, pueden generar plegamientos, dobleces y abultamientos, u otras manifestaciones de comportamiento plástico. La distribución de velocidades puede simular la de un fluido viscoso (Varnes, 1978).

Para la formación de grandes flujos de bloques de roca, se necesita que haya planos importantes de debilidad en el macizo rocoso, tales como intercalaciones de areniscas y lutitas y fallas geológicas cercanas, con aferencias importantes de roca fracturada, para lo cual se requieren alturas importantes y pendientes grandes de la superficie del talud. A mayor altura y/o pendiente, la velocidad de los flujos de roca es mayor. El tamaño de los bloques depende de los patrones de fracturación del macizo de roca (Suarez, 1997).

Es importante mencionar que en la clasificación de Hutchinson (1988) se consideran los deslizamientos de roca como una variante de los deslizamientos traslacionales. Estos deslizamientos están relacionados al igual que los flujos de roca que plantea Varnes (1978) con superficies de ruptura formadas por discontinuidades persistentes tales como dobleces, diaclasas, clivajes o planos de foliación que a menudo son ocupados por rellenos arcillosos y con planos de falla.

Flujos en detritos y tierra

Los movimientos distribuidos en los detritos y en tierra son a menudo más reconocidos como flujos que los que se dan en roca porque los desplazamientos relativos dentro de la masa son comúnmente grandes y más estrechamente distribuidos y la apariencia general es más obvia que un cuerpo que se comporta como un fluido (Varnes, 1978). Por lo general los flujos de detritos son movimientos de velocidad variable entre rápidos o muy rápidos y los flujos de tierra son lentos y de carácter viscoso. Se forman en materiales provenientes de meteorización de las rocas, que pierden su estabilidad estructural por efecto del agua; originando desplazamientos con formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior; también se pueden desarrollar a partir del cuerpo de otros tipos de deslizamiento, para formar movimientos complejos (García et al., 1998).



Hay una gradación completa desde deslizamientos de detritos hasta flujos de detritos dependiendo del contenido de agua, movilidad y características del movimiento. También puede presentarse transición desde deslizamiento de detritos hasta avalancha de detritos, a medida que el movimiento es más rápido por disminución de cohesión, aumento del contenido de agua o incremento en la pendiente del talud (Varnes, 1978). Los flujos de materiales finos tales como arena, limos o arcilla, están clasificados por Varnes (1978) como flujos de tierra. Estos toman gran variedad de formas y su contenido de agua fluctúa desde saturados a secos, y en velocidad, de extremadamente rápidos a extremadamente lentos. En la figura 13 se pueden apreciar algunos tipos de flujo.

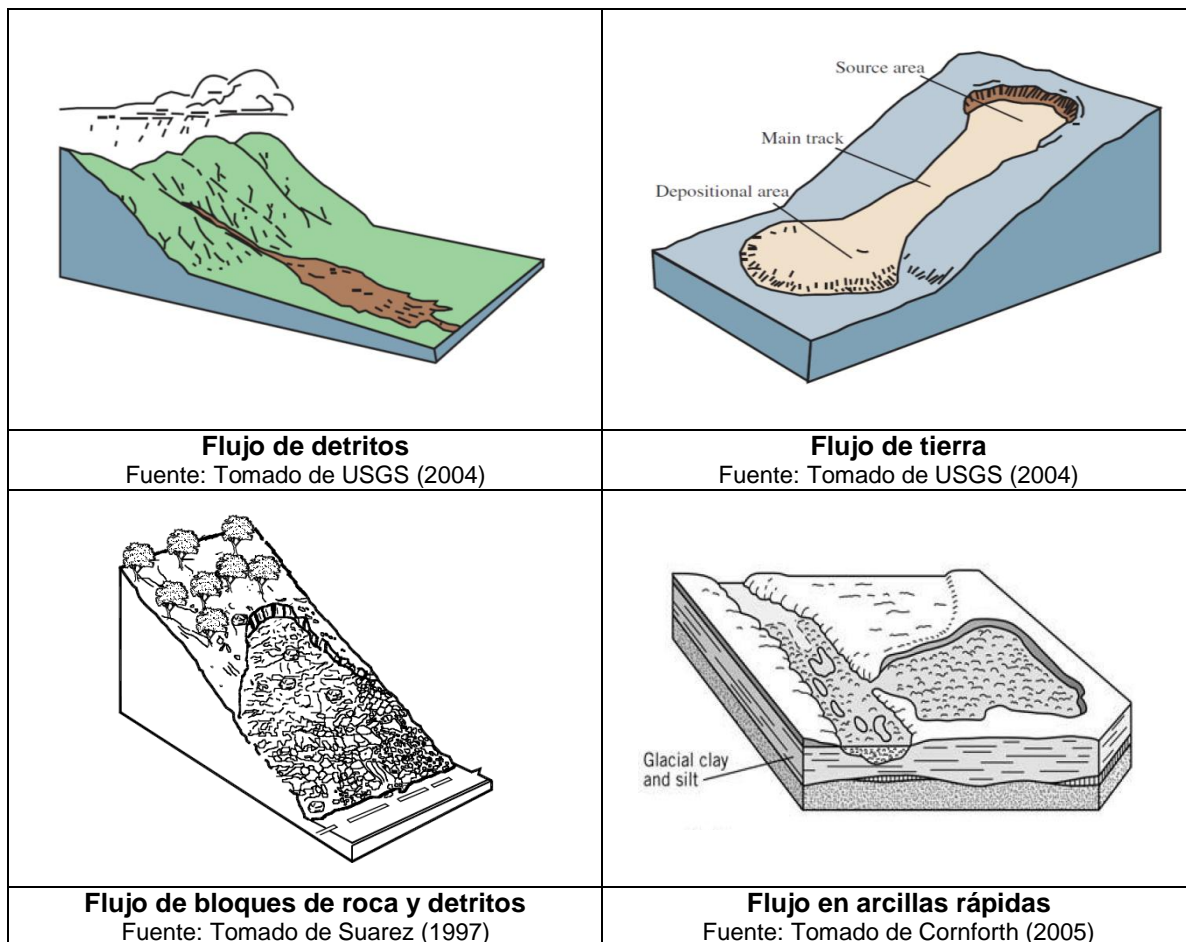


Figura 13. Esquemas de Flujos

Posteriormente Cruden y Varnes (1996) incluyen conceptos propios y de otros autores para complementar la discusión acerca de los tipos de flujo que se presentan en zonas de laderas. Estos conceptos se citan a continuación.

- Varnes (1978) usa el término "flujo de tierra" y "flujo lento de tierra" para describir una parte de los flujos de tierra que son lentos y secos en estado plástico, esto es común en arcillas o rocas meteorizadas arcillo-soportadas con pendientes moderadas y humedad adecuada.



- Keefer y Johnson (1983) concluyen que aunque algunas deformaciones internas ocurren dentro de los flujos de tierra, la mayoría de movimientos tienen lugar en sus límites adyacentes o en inmediaciones.
- El uso del término "flujo de tierra" abarca modos de deslizamientos desde "flujo lento de tierra" hasta "flujo de tierra - deslizamiento de tierra" de carácter lento y compuesto a "deslizamiento lento de tierra". Cuando las superficies de ruptura son visibles, extensas, estriadas, con superficies de deslizamiento, pueden ser llamadas "deslizamientos de tierra"; cuando la masa desplazada está muy deformada internamente, el deslizamiento es probablemente un "flujo de tierra". Sí el mismo deslizamiento muestra ambos modos de deformación es claro que se trata de un "flujo de tierra - deslizamiento de tierra" de carácter compuesto.
- En relación a los movimientos en masa en regiones de congelamiento permanente, McRoberts y Morgenstern (1974) usan el término "flujos superficiales", mientras que Hutchinson (1988) usa el término "deslizamientos de capas activas", para describir movimientos en masa de rápido a muy rápido en una capa delgada o capa superficial de un suelo descongelado y flujos de vegetación o de un deslizamiento sobre una superficie plana congelada permanente. Las capas de descongelamiento debidas al cambio de estación se llaman capas activas, miden hasta un metro o son de un espesor menor, pueden contener agua que tiene su origen en los frentes de congelación donde fue formado el hielo segregado. Al derretirse el hielo en mención se pueden generar presiones de poros artesianas que reducen significativamente la resistencia de la capa activa al movimiento. Fallas superficiales similares también pueden ocurrir en materiales tipo loess que se saturan o pueden estar sujetos a movimientos sísmicos.
- Los flujos de detritos en taludes abiertos forman su propia trayectoria, en dirección hacia abajo por un lado del valle en pendientes suaves en el pie del mismo. La depositación de los diques puede marcar un surco más sinuoso. Los flujos pequeños de material granular pueden generar cárcavamiento (canales) o pueden extenderse como láminas por cierta distancia a través del talud.
- Los flujos canalizados se mueven por las cárcavas existentes. Los flujos de detritos son a menudo de alta densidad, con un 80% de sólidos por peso y pueden exceder la densidad del concreto húmedo (Hutchinson, 1988). Estos flujos pueden mover bloques de metros de diámetro. Los suelos en pendientes empinadas sin vegetación, cuya cobertura vegetal pudo haber sido destruida por fuego, son propensos a los flujos de detritos. Los detritos puede ser adicionados a las pequeñas corrientes superficiales por la erosión o socavación de sus bancos, incrementando el poder de los flujos. El material más grueso puede formar diques naturales, dejando los finos en suspensión moviéndolos hacia las cárcavas. Los flujos pueden extenderse muchos kilómetros hasta dejar caer su carga suspendida al entrar en cárcavas de gradiente bajo. El flujo puede darse en forma de impulso, presumiblemente causado por movilización periódica de material o por la formación y rotura de presas de detritos en las cárcavas.
- Pierson y Costa (1987) observaron que el término "torrente de detritos" era un término engañoso por dos razones. La primera, en Europa y Japón significa una



cárcava muy empinada y la segunda, el término se usa para diferenciar entre flujos de detritos gruesos que ocurren en cárcavas y flujos que ocurren en taludes abiertos.

- Las avalanchas de detritos son largas, extremadamente rápidas y a menudo se dan en forma de flujo en taludes abiertos. Estas avalanchas involucran comúnmente roca, hielo, nieve y suelo que viaja a velocidades de más de 100 m/s. En este caso, el impacto de la corriente y el aire influyen en la alta velocidad y larga distancia de viaje de los detritos (Varnes, 1978). Sin embargo la contribución de la nieve y el hielo en este movimiento también debe ser considerada.
- De acuerdo con Varnes (1978), los flujos de roca incluyen deformación continua en el espacio y superficial como una reptación profunda. Estos flujos involucran movimientos extremadamente lentos y generalmente movimientos diferenciales no acelerados entre unidades relativamente intactas. Los movimientos pueden darse a lo largo de múltiples superficies de corte que no están aparentemente conectadas, generando plegamiento, doblamiento y abultamiento o simulando un fluido viscoso por la distribución de velocidades.
- Los flujos en roca se inician por deslizamientos en la estratigrafía o esquistosidad del macizo rocoso, su estudio puede definir modos complejos de movimientos en los cuales el deslizamiento es seguido por pandeo (Hu y Cruden, 1993). Los casos de flujo de roca deben ser explorados con detalle antes de ser clasificados.
- Los lahares son flujos de barro en laderas de volcanes activos (p.e. Volcán Nevado del Ruíz - Armero, Colombia). Estos flujos movilizan acumulaciones de suelo piroclástico en estado suelto sobre las pendientes de los volcanes. El agua de los flujos es posible que provenga de la expulsión de los lagos del cráter, las condensaciones de vapor expulsado, la nucleación de vapor de agua de las partículas expulsadas y su precipitación, y el derretimiento de la nieve y el hielo acumulado en los conos volcánicos altos (Voight 1990).

Para Hutchinson (1988) la morfología es el principal factor en la clasificación de movimientos de detritos en forma de flujo, los cuales difieren marcadamente entre sí por el tipo de mecanismo de falla. Este autor considera que estos movimientos se dividen en cinco tipos, (1) los flujos de lodo de climas no periglaciares son relativamente lentos, se presentan como masas lobuladas o elongadas de detritos acumulados en matriz de arcilla blanda, que avanzan principalmente por deslizamientos de las superficies de corte. (2) Los flujos o avalanchas de lodo de climas periglaciares surgen a través de un proceso de solifluxión periglacial que involucra la congelación y descongelación de materiales arcillosos; se presentan en forma de lámina o de lóbulo de detritos acumulados. (3) Los deslizamientos de flujo se caracterizan por el colapso repentino, extensivo y extremadamente rápido de una masa de material granular o detrito, tras alguna perturbación. Existen tres tipos de deslizamientos de flujo, aquellos que se presentan en materiales sueltos y sin cohesión, los que se dan en limos de alta porosidad, ligeramente cementados y aquellos que se presentan en rocas débiles de alta porosidad. (4) Los flujos de detritos húmedos son muy rápidos a extremadamente rápidos. Este tipo de movimiento de ladera tiene un potencial destructivo muy alto asociado a las áreas de montaña, donde el acceso brusco de agua, usualmente de lluvias muy fuertes o por el



derretimiento de la nieve, puede movilizar detritos que cubren las laderas y aportan al flujo de detritos. Existen tres tipos de flujos de detritos húmedos, los que involucran flujos de roca meteorizada que se presentan en taludes de colinas o en flujos canalizados, los que involucran flujos de turbas húmedas en pantanos o lugares similares y los asociados por erupciones volcánicas (lahares). Finalmente (5) los Sturzstroms que son considerados por Hutchinson (1988) flujos de detritos secos y los coloca en la categoría de flujos, sin embargo para Cruden y Varnes (1996) estos movimientos son considerados caídas complejas, dentro de la categoría de caídas.

1.2.8. Movimientos complejos

Los movimientos complejos involucran una o más combinaciones de los principales tipos de movimiento de ladera, teniendo en cuenta las múltiples partes de una masa que se mueve y/o las diferentes etapas del desarrollo del movimiento (Varnes, 1978). Aunque este tipo de movimiento propuesto por Varnes (1978) ha sido reducido de la clasificación de Cruden y Varnes (1996) y el término “complejo” ha sido tomado como una descripción del estilo de actividad de un deslizamiento, en el presente documento se sigue la categorización planteada por Varnes (1978). A continuación se citan algunos movimientos complejos que se distinguen:

- Hundimiento - volcamiento
- Deslizamiento - caída de roca
- Caída de roca - flujo de detritos (Avalancha de rocas caídas)
- Combadura y pandeo en valle
- Hundimiento - flujo de tierra

Hutchinson (1988) al igual que Varnes (1978) considera que es bastante común que dos o más tipos de movimientos en masa descritos por independiente en sus respectivas clasificaciones se combinen y formen un movimiento complejo. A consideración de Hutchinson (1988), en su clasificación se citan algunos de los más importantes y frecuentes movimientos complejos, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Movimientos complejos de ladera tipo bloque
- Movimiento en acantilados de arcilla sometidos a erosión
- Deslizamientos causados por erosión en procesos de infiltración
- Deslizamientos multi-capas y multi-plantas

Para García et al. (1998) los movimientos complejos más frecuentes en las regiones de Colombia son el hundimiento-flujo de tierras y la caída de rocas-avalancha de detritos. Los del primer tipo se presentan casi siempre en deslizamientos rotacionales que adquieren una componente traslacional, en los cuales la masa abarcada se deforma y disgrega bastante por el corrimiento; en presencia del agua los detritos se ablandan y dan lugar al flujo de tierras o, dado el caso, al de lodos. El segundo tipo se origina al desprenderse de laderas muy empinadas series o grupos de lajas y bloques de roca, cuya forma y tamaño están controlados por las discontinuidades de la masa rocosa (fracturas, diaclasas y fallas). Los bloques pueden volcarse y caer por acción del agua y de sismos, desintegrándose en parte y arrastrando a su paso material alterado y vegetación, evolucionando a avalanchas debido a su alta energía cinética y a la pendiente del terreno. Estas avalanchas pueden engrosarse al incorporar más adelante otros materiales sueltos y alcanzan grandes distancias. En ocasiones el movimiento es



sólo de bloques que se mueven a gran velocidad por las cañadas existentes, y al llegar a zonas planas se extienden en todas las direcciones; a veces quedan en forma de lengüeta que taponan la quebrada que ocuparon.

Según García et al. (1998) en los botaderos de materiales sobrantes de excavaciones de ingeniería o de minería (desechos térreos) son muy comunes los casos de hundimiento y flujo de tierra y de lodos. El problema de su estabilidad es complicado puesto que al movimiento se suman casi a diario volúmenes apreciables de materiales de desecho debido a la continua disposición de ellos en las actividades mineras o de explanación para obras de ingeniería. El alto volumen acumulado, la alteración de los materiales que lo forman, la pluviosidad y la pendiente hacen que no pueda descartarse la posibilidad de movimientos rápidos y de tipo catastrófico ante la ocurrencia de un temblor, a pesar de la función de contención que prestan los diques y del drenaje y las técnicas de disposición general de los desechos.

1.3. Zonificación de la Amenaza

Cada año se generan cientos de movimientos en masa de distinta intensidad y magnitud, que interrumpen las actividades normales en municipios, corregimientos, veredas, caseríos y carreteras, provocando daños y muerte a sus habitantes y causando serias pérdidas económicas. El origen de los movimientos en masa obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre y en la interfaz entre esta, la hidrósfera y la atmósfera. La meteorización, las lluvias, los sismos y otros eventos (incluyendo la acción del hombre) actúan sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición más plana, lo cual se presenta como un proceso contrario a la formación de las montañas por causa del levantamiento tectónico (PMA-GCA, 2007).

La zonificación de la amenaza por PRM es de suma importancia en la planificación territorial y desarrollo de las zonas de laderas que son susceptibles a estos movimientos. En áreas pobladas, este tipo de zonificación ayuda a determinar los puntos amenazados por los PRM, de este modo se puede condicionar el uso de ciertos sectores e incluso desarrollar medidas de prevención para contrarrestar parcial o totalmente los efectos de la dinámica del suelo.

En principio es importante hablar acerca del concepto de Zonificación, que se relaciona con un área geográfica dividida en zonas o sectores con características homogéneas, las cuales se definen conforme a criterios específicos, en este caso del grado de amenaza potencial a FRM.

Según Varnes (1984) el término Zonificación se aplica en un sentido general a la división de la superficie terrestre en áreas que están clasificadas de acuerdo al grado de amenaza potencial o actual de deslizamientos u otros movimientos en masa en taludes. Cientos de mapas de deslizamientos o de sus depósitos activos (viejos o nuevos) han sido realizados por todo el mundo, sin embargo pocos estudios hacen énfasis en el tratamiento y asignación de grados de amenaza en las áreas evaluadas.

La evaluación de la amenaza por PRM se establece siguiendo una metodología reconocida y con validez que ofrezca lineamientos en la forma de afrontar el estudio del área de estudio. Es importante delimitar que área se va a cubrir y por consiguiente la



escala de trabajo; usualmente se analiza el modo de falla de las laderas en el tiempo hasta donde sea posible hacerlo y las causas que lleven al proceso de falla.

1.3.1. Zonificación TC4

Según el Comité Técnico de Ingeniería Geotécnica y Sísmica (TC4) de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) se emplean enfoques válidos para la evaluación de tres (3) clases de amenaza geotécnica: Respuesta local del suelo, Inestabilidad de laderas (PRM) y Licuefacción. Para cada clase de amenaza geotécnica se utilizan tres (3) niveles de zonificación (ver cuadro 2):

- Nivel 1: Zonificación General
- Nivel 2: Zonificación de Detalle
- Nivel 3: Zonificación Rigurosa

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Registro histórico de sismos e información disponible	Fotografías aéreas y sensores remotos	Investigación Geotécnica
Mapas Geológicos y Geomorfológicos	Estudios de campo y datos de precipitación y vegetación	Análisis específicos
Escala 1:1.000.000 a 1:50.000	Escala 1:100.000 a 1:10.000	Escala 1:25.000 a 1:5.000

Cuadro 2. Uso de datos para tres niveles de zonificación en PRM

Fuente: Tomado de TC4, ISSMGE (1999)

Es importante destacar que aunque los niveles de zonificación establecidos por la ISSMGE están asociados con la variable sísmica, sirven de marco de referencia en la elaboración del presente documento. A continuación se describen de modo sucinto los tres niveles de zonificación que se pueden utilizar para la evaluación de PRM.

□ Zonificación General

Según el TC4- ISSMGE (1999) el primer nivel de zonificación se basa en la recopilación e interpretación de la información existente disponible a partir de documentos históricos, informes publicados y otras bases de datos disponibles. Este es el enfoque más simple y de más bajo costo, que se utiliza para cubrir una amplia región, como un país, estado, provincia o área local.

Los mapas geológicos y geomorfológicos existentes son generalmente fuente de información muy importante para la evaluación del potencial de falla del terreno. Aunque varían mucho en los detalles y la aplicabilidad de área a área, estos mapas suelen proporcionar información útil sobre las características geológicas de los sedimentos cuaternarios. Los informes de investigaciones en el sitio realizados para grandes proyectos de construcción en la región también pueden proporcionar información útil sobre las condiciones geológicas y del suelo. Mediante la correlación de la geología regional o la geomorfología con diferentes niveles de amenaza, se pueden elaborar mapas de amenaza por inestabilidad de taludes.

La calidad del mapa de zonificación puede variar notablemente dependiendo de la calidad de la base de datos; la cartografía en este nivel 1 de zonificación es probable que sea en el rango de 1:1.000.000 a 1:50.000.



❑ **Zonificación de Detalle**

La calidad del mapa de zonificación del nivel 1 se puede mejorar considerablemente, a un costo moderado, haciendo uso de otras fuentes de datos. Por ejemplo usando fotografías aéreas que puedan ayudar a definir mejor las estructuras de falla y las condiciones geológicas. En algunos casos, las fotografías de más edad pueden ser más útiles en la comprensión de la estructura de las unidades geológicas locales si son anteriores al desarrollo urbano. También se pueden llevar a cabo estudios de campo adicionales para trazar las unidades geológicas pertinentes al potencial de inestabilidad de taludes. Se sugiere consultar informes de ingeniería geotécnica de empresas públicas y privadas, los cuales pueden proporcionar datos de pruebas de campo y de laboratorio adicionales.

Los residentes locales pueden proporcionar información histórica detallada sobre la inestabilidad de laderas en el pasado. Este enfoque de nivel 2 se puede lograr a un costo razonable y permite una mejora sustancial de los mapas de zonificación a escalas de 1:100.000 a 1:10.000 (TC4- ISSMGE, 1999).

❑ **Zonificación Rigurosa**

Cuando se requiera un nivel de zonificación muy alto y detallado, por ejemplo, en las escalas de 1:25.000 a 1:5.000, o de menor escala, se necesitarán datos adicionales de una investigación del sitio específico de estudio. Los resultados de estas investigaciones se pueden incorporar en los análisis asistidos por computador del comportamiento de inestabilidad de taludes. Este nivel de zonificación, requiere información detallada de lugar, por lo tanto la inversión es generalmente costosa, pero para sitios donde el potencial de amenaza se considera muy alto, o el desarrollo existente o propuesto se considera crítico o de alto valor, entonces este nivel de inversión puede estar justificado (TC4- ISSMGE, 1999).

1.3.2. Métodos

Según Van Westen et al. (1997) una zonificación de amenaza por movimientos en masa se compone de dos (2) aspectos diferentes:

- La evaluación de la susceptibilidad del terreno por falla en el talud, en la cual la susceptibilidad, ante un proceso amenazante, expresa la probabilidad de que tal fenómeno ocurra bajo unas condiciones o parámetros dados del terreno.
- La determinación de la probabilidad de que un evento detonante ocurra. La probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa se evalúa principalmente mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de eventos detonantes tales como lluvias torrenciales o terremotos. Es importante mencionar que el cálculo de la probabilidad de un movimiento en masa se puede realizar a través de una relación entre la magnitud de un evento de deslizamiento y un periodo de retorno.

Para Van Westen et al. (1997) un área se declara susceptible a los movimientos en masa cuando las condiciones del terreno en un sitio dado son comparables con aquellas de un área dónde haya ocurrido un deslizamiento. La inestabilidad de una ladera es gobernada por parámetros de terreno interrelacionados tales como la litología y las condiciones estructurales de los materiales, las propiedades del suelo, la pendiente y forma de la ladera, las condiciones hidrológicas, el uso del suelo y las prácticas de conservación y,



finalmente, las actividades humanas que alteren las condiciones de la ladera. Adicional a los parámetros citados por Van Westen et al. (1997), se pueden adicionar la vegetación y la actividad sísmica regional.

El análisis conjunto de todas éstas variables del terreno en relación con la distribución espacial de los deslizamientos, se ha beneficiado enormemente por la introducción de Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramienta ideal para el análisis de parámetros con un alto grado de variabilidad espacial. Teniendo en cuenta que para la evaluación de la amenaza de los PRM se parte del supuesto de que las condiciones iniciales de fallas en taludes en el pasado también serán condiciones potenciales de inestabilidad en el presente, los pasos esenciales que deben seguirse en la zonificación de la susceptibilidad por deslizamientos según Van Westen et al. (1997) se definen así:

- Mapeo de la distribución de los deslizamientos, diferenciados según tipo, actividad, dimensiones, etc., y basado en información que cubra un rango de tiempo lo más amplio posible.
- Una cartografía de los parámetros de terreno más relevantes relacionados con la ocurrencia de los movimientos en masa.
- El análisis de las condiciones de terreno, el cual puede ser considerado responsable por la ocurrencia de los diferentes tipos de movimientos en masa.
- La evaluación de los pesos a cada factor de causa, la formulación de reglas de decisión y la designación de la clase de susceptibilidad.

De acuerdo con Hartlen y Viberg (en Soeters y Van Westen, 1996) citado por Ojeda et al. (2001), un mapa ideal de amenaza por inestabilidad de laderas debería suministrar información sobre la probabilidad espacial y temporal de ocurrencia, el tipo, la magnitud, la velocidad, la distancia de viaje y el límite de avance retrogresivo de los movimientos en masa. No obstante, este ideal rara vez se logra, en parte por la gran dificultad que entraña establecer cuantitativamente la probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa en grandes áreas y por el costo y tiempo que se requería para obtener la información para un análisis de estabilidad detallado de todas las laderas. Sin embargo, se han logrado buenas aproximaciones en áreas relativamente pequeñas a escala mayores a 1:5.000. Para estudios a escalas medias y regionales, es necesario acudir a otro tipo de métodos cualitativos o semicuantitativos, como la Metodología de Ramírez y Gonzalez (1989).

Para Ojeda et al. (2001) la precisión y la objetividad del cálculo de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo dependen en gran medida del método empleado para su evaluación y zonificación en mapas. A su vez, el método está en función de los objetivos y recursos de un proyecto en especial y está estrechamente ligado con la escala de trabajo.

En la figura 14 adaptada por Ojeda (1996) se presenta la relación entre niveles de estudio, escalas sugeridas para esos niveles y los factores que hay que considerar en una zonificación de amenaza por PRM; también se mencionan los métodos y técnicas de zonificación recomendables para cada escala de zonificación. En el proceso de zonificación cada factor de análisis constituye una capa de información representable cartográficamente y tiene un grado de importancia que se representa con tramas en la figura 14.



De acuerdo con la manera como se sintetizan los factores o capas de información para obtener el mapa final de amenaza, Ingeominas en: Ojeda, (1996) citado por Ojeda et al. (2001) clasifica tales métodos como sigue:

Método implícito: La zonificación de un área geográfica se realiza mediante observación directa por un experto, quien se basa primordialmente en su conocimiento y experiencia. Esta evaluación es objetiva en el sentido de que no sigue reglas que pueda repetir con exactitud otro evaluador; no obstante, este método puede ser bastante preciso y el Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano, lo ha empleado comúnmente para zonificaciones en varias escalas de diferentes regiones del país, así como en visitas de emergencia.

Método semi-implícito: Es también de tipo observacional, pero ayudado por una “lista de chequeo” y contando con algunos criterios predefinidos, de manera que el grado de subjetividad se reduce, ya que se realiza una evaluación de los mismos factores con criterios semejantes. Es igualmente aplicable a todas las escalas de trabajo.

Por su parte, los métodos explícitos se subdividen en tres tipos (Ojeda, 1996 citado por Ojeda et al. 2001):

Método Explícito Empírico: Los factores de análisis se combinan mediante el uso de puntajes ponderados que se asignan a cada uno. La ponderación es dada por un especialista, quien con base en su experiencia y conocimiento de la zona asigna valores a los componentes de un factor (por ejemplo, el tipo de material) para indicar algún grado de contribución a la inestabilidad del terreno.

La suma de los puntajes de todos los factores da como resultado un mapa de valores numéricos, los cuales se pueden dividir en rangos para definir zonas con distintos niveles de amenaza relativa.



GENERAL										NIVEL DE ESTUDIO SEMIDETALLADO										DETALLADO																			
ESCALA		INFORMACIÓN BÁSICA										ESCALA		INFORMACIÓN BÁSICA										ESCALA		INFORMACIÓN BÁSICA													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9													
1:50.000 a 1:250.000		a		g					1:10.000 a 1:25.000	b		g						Mayor a 1:5.000	c			g																	
TIPOS DE ANÁLISIS Y TÉCNICAS RECOMENDABLES										MÉTODOS EXPLÍCITOS 1. Combinación de mapas cualitativos MÉTODOS IMPLÍCITOS 1. Análisis geomorfológicos o de mapeo directo										MÉTODOS EXPLÍCITOS 1. Combinaciones de mapas cualitativos 2. Análisis estadístico bivariado 3. Análisis estadístico multivariado MÉTODOS IMPLÍCITOS 1. Análisis geomorfológicos o de mapeo directo										MÉTODOS EXPLÍCITOS 1. Análisis de factores de seguridad de laderas MÉTODOS IMPLÍCITOS 1. Análisis geomorfológicos o de mapeo directo									
										GRADO DE IMPORTANCIA DE LA INFORMACION BÁSICA ■ IMPRESCINDIBLE ■ NECESARIA ■ RECOMENDABLE ■ NO SE REQUIERE										TIPO DE INFORMACIÓN BÁSICA 1 TOPOGRAFÍA 2 GEOLOGÍA a. Litología b. Litología y estructuras c. Litología, estructuras e hidrogeología 3 GEOMORFOLOGÍA d. Morfometría e. Morfología f. Morfodinámica 4 AGROLOGÍA 5 CLIMA g. Lluvia h. Temperatura i. Evapotranspiración j. Viento										6 COBERTURA DEL SUELO k. Vegetación l. Uso del suelo 7 SISMOS 8 ELEMENTOS ANTRÓPICOS m. Población n. Actividades socio-económicas o. Infraestructura 9 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS									

Figura 14. Relaciones entre niveles de estudio, escala e información para zonificación de la amenaza por deslizamientos

Fuente: Adaptado de Ojeda (1996)



Esta técnica, conocida como combinación de mapas cualitativos, es bastante atractiva y popular por su facilidad de aplicación al emplear Sistemas de Información Geográfica (SIG). Su dificultad radica en la asignación apropiada de puntajes que, en caso de no contar con expertos idóneos, que tengan un conocimiento apropiado del terreno, puede conducir a resultados muy pobres.

Método Explícito Semianalítico: En este método los factores son calificados en forma semejante al método anterior, pero se combinan con formulaciones matemáticas. Entre las técnicas que se podrían incluir están los llamados Análisis Estadístico Univariado (o Bivariado) y el Análisis Estadístico Multivariado. El primero es aplicable a zonas en donde se tenga una muestra estadística representativa de movimientos en masa de manera que se pueda obtener un mapa de distribución de movimientos en masa. Este mapa se combina con cada uno de los otros mapas de factores (por ejemplo, pendientes, geología, cobertura, etc) y para cada clase de parámetro (rango de pendiente, material geológico, tipo de cobertura, etc) se calcula la densidad de deslizamientos y se le asigna un peso ponderado.

En el Método Multivariado también se toman todos los factores de análisis, pero dividiendo la zona de estudio en cuadrículas o unidades morfométricas. Para cada una de las unidades se establece la presencia o ausencia de movimientos en masa para conformar una matriz que luego se analiza para cada factor mediante regresiones múltiples o análisis discriminantes.

Método Explícito Analítico: Corresponde a un análisis cuantitativo en donde se calcula el Factor de Seguridad de cada ladera. Entre los métodos empleados se encuentran los análisis de equilibrio límite ampliamente utilizados por la geotecnia convencional para el análisis de estabilidad de taludes. González (1999) da una excelente descripción de la aplicación de este método a estudios detallados de riesgo por remoción en masa.

NOTA: Por efectos de presentación y desarrollo del presente trabajo académico, se optó por consignar en el Anexo B titulado "*Otros métodos de evaluación de la amenaza por PRM*" la información relacionada con los antecedentes, alcances, fundamentos y variables que intervienen en los diferentes métodos que han sido utilizados usualmente en el medio académico y de consultoría para la evaluación de la amenaza por procesos de remoción en masa, incluyendo aquellos de reciente aparición.



Capítulo 2. Evaluación de la Amenaza por PRM

El capítulo 2 desarrolla inicialmente algunos conceptos introductorios referentes a la evaluación de la amenaza por procesos de remoción en masa (PRM), donde se destaca que estos fenómenos se han convertido en una de las principales amenazas naturales en razón de su potencial destructivo, lo cual causa pérdidas significativas especialmente en áreas pobladas del país. Estas pérdidas y sus efectos adversos contribuyen en la definición del concepto de vulnerabilidad ante PRM y sus diversos significados a partir del tipo de variable que involucra, por ello en este capítulo se mencionan aspectos conceptuales que se relacionan con el grado de exposición, el daño esperado y la pérdida que un elemento puede experimentar ante un evento de esta naturaleza. Posteriormente se busca explicar brevemente que son los factores intrínsecos o condicionantes y los factores detonantes o desencadenantes de los PRM, se describen las principales variables geoambientales que intervienen y se citan algunas causas comunes que contribuyen en la ocurrencia de los deslizamientos.

La segunda parte del capítulo 2 explica las características y particularidades de la Metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) desde las definiciones originales de Ramírez (1988) hasta las últimas modificaciones que ha tenido a medida que se ha ido aplicando (González 2006), con el fin de mejorar y adaptar el método a los desarrollos recientes. Se destacan los ocho parámetros de evaluación de la metodología (intrínsecos: M, R, D, U y detonantes: E, C, S, A) y la suma de los valores de cada uno de ellos, para obtener el valor de la Calificación de Estabilidad.

La parte final del capítulo 2 trae algunos antecedentes de la aplicación de la Metodología SES en estudios de consultoría del ámbito nacional y en trabajos académicos que se han desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, enfocados en realizar la evaluación de la amenaza por PRM. Entre estos trabajos que han implementado la metodología SES se destaca un estudio pionero en Colombia realizado en el municipio de Útica, Cundinamarca (1991, 1992) y la zonificación geotécnica realizada por Ingeominas (2001a) en Cartagena D.T. y C.

2.1. Introducción a la Evaluación de la Amenaza por PRM

El análisis de la amenaza es el proceso de identificación y caracterización de los posibles procesos de remoción en masa (PRM) que afectan un área específica, en conjunto con la evaluación de su frecuencia de ocurrencia (Fell et al. 2005). Para el Proyecto Multinacional Andino (2007) la caracterización y representación de los PRM implica la presentación de un escenario del comportamiento probable en un área determinada.

Según Scheidegger (1994), una amenaza natural es la probabilidad de que una condición razonablemente estable pueda cambiar abruptamente. Courture (2011) explicó el concepto de amenaza por PRM como la división del territorio en zonas relativamente homogéneas y su clasificación se define de acuerdo con los grados de susceptibilidad, amenaza o riesgo, actual o potencial a los movimientos en masa o aquello concerniente que se relaciona con estos movimientos.



Para evaluar la amenaza por PRM se han desarrollado e implementado en las últimas décadas numerosos enfoques o metodologías a partir de análisis heurísticos, estadísticos o métodos basados en procesos (Crozier y Glade 2004). Cada método tiene sus ventajas y desventajas y su elección depende del objetivo del estudio, la escala de trabajo y los datos disponibles. La experiencia obtenida en varios países ha estimulado el uso de mapas de zonificación de amenaza y riesgo para el ordenamiento territorial y la gestión de emergencias y muestra que existe la necesidad de métodos estándares y reproducibles para evaluación y zonificación de amenaza, en particular en lo que respecta a la definición de clases de amenazas, de manera que tales zonificaciones puedan ser comparables. Desafortunadamente existe poca consistencia entre los diferentes tipos de mapas que se producen en el mundo, con frecuencia la terminología empleada no es uniforme y las leyendas no están acompañadas por definiciones que faciliten el uso de los mapas. (PMA-GCA, 2007).

La zonificación de la amenaza por PRM está dirigida principalmente a predecir las variaciones espaciales y temporales de estos movimientos. Según Wu et al., (2014) la evaluación temporal y espacial de este tipo de amenaza natural como resultado de la conjunción de varios factores internos y externos, es muy importante para la protección adecuada del medio ambiente y su explotación racional.

Por otra parte, en algunos países del primer mundo, se utilizan modelos avanzados para predecir la localización de futuros deslizamientos que parecen dar resultados aceptables, sin embargo aún no se puede predecir el momento en que se presentarán circunstancias de falla o se desencadenarán mecanismos de deslizamientos, que permitan a las autoridades competentes tomar decisiones sobre cuándo evacuar personas o cuándo cerrar las carreteras ante este tipo de eventos (Terlien, 1998).

Siguiendo lo planteado por Terlien (1998), en la actualidad no parece posible evaluar adecuadamente el riesgo en PRM, ya que aun no hay bases claras para determinar la probabilidad de que estos movimientos ocurran dentro de un período de tiempo dado. Es posible realizar estudios de evaluación de la amenaza en lugar de evaluaciones de riesgos. Las evaluaciones de la amenaza son estimaciones de la susceptibilidad de un área a los PRM sobre la base de algunos factores claves, que pueden ser cartografiados y permiten evaluar áreas de terreno y su susceptibilidad relativa a los PRM (OAS, 1991).

Para Terlien (1996) la mayor parte de las publicaciones sobre evaluación de amenaza a PRM se ocupan principalmente de la cartografía de la susceptibilidad a estos movimientos o en el mejor de los casos de la evaluación de la probabilidad espacial; dice el autor que es muy difícil incluir la probabilidad temporal en el análisis de grandes áreas, debido a la heterogeneidad de las condiciones del subsuelo, necesaria para el modelado físico, o por la ausencia de un registro histórico completo de la ocurrencia de deslizamientos, así como de registros de precipitación y de terremotos.

Se sugieren en general cuatro supuestos fundamentales como base para hacer una evaluación de la amenaza por PRM y trabajos de zonificación (Varnes y IAEG, 1984; Hutchinson 1995 citado por Aleotti y Chowdhury, 1999):

- Los movimientos en masa ocurrirán siempre en las mismas condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y climatológicas que en el pasado.
- Las principales condiciones que causan movimientos en masa son controladas por factores físicos identificables.



- El nivel de amenaza puede ser evaluado.
- Todos los tipos de fallas de taludes o laderas pueden ser identificadas y clasificadas.

Según Aleotti y Chowdhury (1999) Para realizar una evaluación de la susceptibilidad a PRM es necesario responder las siguientes preguntas básicas:

- ¿Donde se producirán los PRM?
- ¿Qué tipo de fallas se producirán?
- ¿Cómo se producirán los PRM?

Sólo respondiendo estas preguntas se puede conocer en realidad la susceptibilidad a los PRM en un área de estudio. Para una evaluación completa de la amenaza, sin embargo, se hacen preguntas adicionales: ¿Cuándo ocurrirán los PRM? y ¿Con que frecuencia se producirán en el tiempo?. Es necesario superar una serie de obstáculos tales como la naturaleza discontinua de las fallas de taludes (en espacio y tiempo), dificultad de identificar las causas, los factores desencadenantes y las relaciones causa-efecto, y finalmente como se mencionó antes la falta de datos históricos completos relacionados con la frecuencia de estos procesos geomorfológicos.

En general la amenaza por PRM se ha determinado sólo en algunos lugares con un alto grado de confiabilidad, lo cual ha requerido de estudios cuidadosos y detallados de la interacción de las condiciones pertinentes, constantes y variables del área objetivo. Esto puede ser un proceso muy costoso y largo que algunas veces no se justifica a efectos de la planificación del desarrollo a gran escala de un área dada (OAS, 1991).

2.1.1. Procesos de Remoción en Masa como Amenaza

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) se han convertido en las últimas décadas en una de las principales amenazas naturales en Colombia, especialmente en la época de invierno cuando la ocurrencia de movimientos en masa en áreas pobladas causa considerables pérdidas humanas, materiales y económicas. La realidad de estos acontecimientos está principalmente relacionada con las consecuencias de urbanizar de modo no planificado y desordenado zonas no aptas e inestables, por efecto de un acelerado crecimiento demográfico del país en los últimos 25 años (pasando de 33 a 48 millones de habitantes en 2014) asociado a un alto porcentaje de la población que vive en situación de pobreza.

En este contexto, según Gonzalez (2005), los PRM pueden considerarse como fenómenos de segundo orden pues son producto de factores naturales o artificiales los cuales constituyen los eventos de primer orden o causas primarias (ver figura 15).

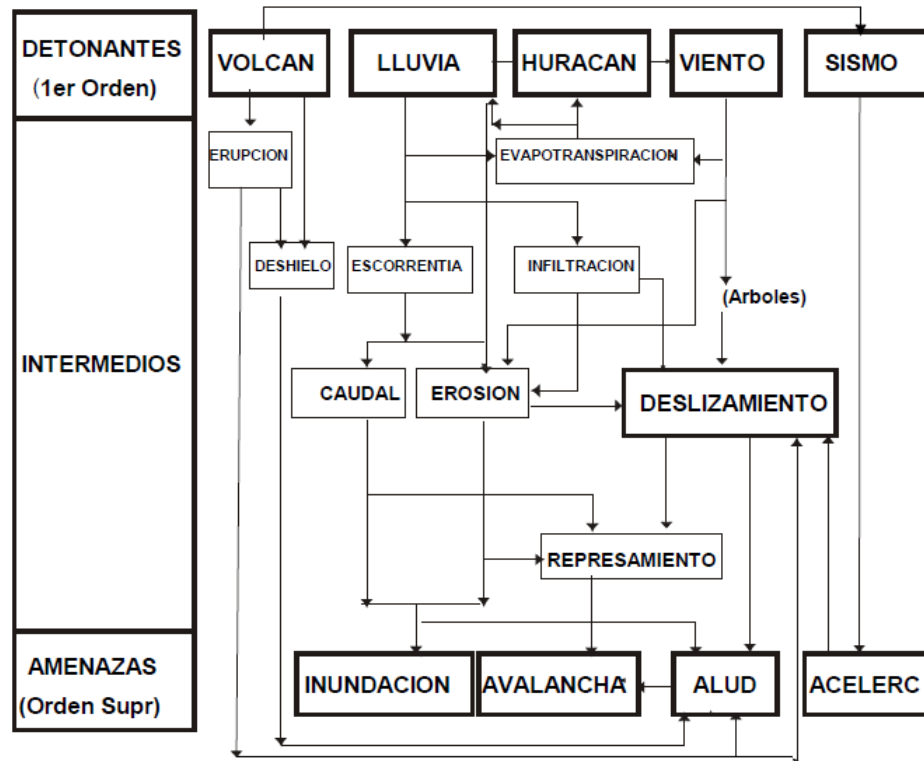


Figura 15. Secuencia de Eventos Naturales y Amenazas

Fuente: Tomado de González (1992)

Las diversas magnitudes de éstas causas provocan el fenómeno con niveles variables de amenaza, dependientes de la susceptibilidad de los materiales in-situ, de la magnitud y recurrencia de los eventos detonantes y de la energía potencial gravitatoria de las masas susceptibles en relación al lugar de interés.

Entonces la amenaza por procesos de remoción en masa (H_{PRM}), expresada como probabilidad de potencial destructivo, podría definirse en forma muy simplificada conceptual como el producto de la susceptibilidad de la masa (Z_M), la magnitud del evento detonante (D_T) y la energía potencial de la masa involucrada (P_M) según lo propuesto por Gonzalez (1990a):

$$H_{PRM} = Z_M \times D_T \times P_M \quad [2.1]$$

En el caso de los PRM, la susceptibilidad está controlada por factores intrínsecos o internos (materiales, topografía, estado de esfuerzos, condiciones de drenaje, cobertura vegetal, etc.) mientras que los eventos detonantes pueden considerarse externos (lluvias, sismos, excavación, aguas de infiltración, sobrecargas, etc.).

Por su parte la energía potencial interna está controlada por el índice de fragilidad, la deformabilidad y la resistencia residual, mientras que la energía potencial externa la controlan el volumen de la masa, la altura de posición y la posible trayectoria desde el deslizamiento hasta el punto amenazado.



Generalmente los factores internos y externos no son fácilmente separables en todos los casos, por lo que, a nivel mundial aún no ha sido fácil plantear modelos de amenaza cuantitativos totalmente válidos en los términos de probabilidad de potencial destructivo.

Según Gonzalez (2005) dado que la amenaza debe expresarse como una probabilidad de potencial destructivo, es conveniente enfatizar que la máxima probabilidad de ocurrencia de potencial de daño por un PRM no sucede necesariamente con la máxima magnitud de los eventos detonantes y que el hecho de que un talud falle no conlleva tampoco necesariamente a un máximo grado de amenaza.

Para tener en cuenta todos los factores es necesario plantear y calibrar modelos adecuados, los cuales, como ya se dijo, aún están en niveles incipientes a nivel mundial, aun cuando el análisis probabilístico de taludes se estableció en forma adecuada hace más de 40 años con los trabajos pioneros del ingeniero colombiano Tomás Shuk (1968, 1970).

2.1.2. Vulnerabilidad ante PRM

Los estudios de la Vulnerabilidad ante PRM son mucho menos abundantes que aquellos enfocados en la Amenaza e incluyen varios métodos para su determinación y ejemplos de evaluación de daños. Sin embargo los investigadores no están de acuerdo sobre los métodos y escalas para determinar los daños que generan los movimientos en masa, y consideran que hacen falta estándares aceptados para medir la vulnerabilidad por estos movimientos; tal es el caso particular de la determinación de la vulnerabilidad para grandes áreas. La falta de métodos establecidos para evaluar los daños y la carencia de información confiable sobre la vulnerabilidad afecta nuestra capacidad de determinar adecuadamente el riesgo ante PRM, cualitativa o cuantitativamente (Galli y Guzzetti 2007).

En su artículo Galli y Guzzetti (2007) mencionan que la vulnerabilidad es esencialmente el potencial de experimentar efectos adversos, una medida de los daños sufridos por un elemento en riesgo cuando se ve afectado por un proceso o evento peligroso. Los elementos en riesgo comprenden personas, propiedades, actividades económicas y servicios públicos. Los autores consideraron la vulnerabilidad ante PRM como una medida de la solidez o la fragilidad de un elemento, o una medida de su exposición o la protección contra un deslizamiento esperado potencialmente dañino. Se define la vulnerabilidad ante PRM como la capacidad de un elemento para soportar movimientos de masas de diferentes tipos y/o tamaños. Matemáticamente, la vulnerabilidad ante PRM (V_L) puede ser enunciada así:

$$V_L = P(D_L \geq 0|L), \quad (0 \leq D_L \leq 1) \quad [2.2]$$

Donde (D_L) es el daño esperado o evaluado de un elemento dado cuando ocurre un deslizamiento peligroso (L). En la ecuación anterior la vulnerabilidad es la probabilidad de una pérdida total o proporcional de un elemento específico ante la ocurrencia de un deslizamiento y se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total). La vulnerabilidad ante PRM puede ser expresada en escala económica (monetaria, cuantitativa) o heurística (cualitativa).



Para González (2005) la ocurrencia de un PRM está relacionada con efectos sobre la ladera como daños sobre la misma (desplazamientos, subsidencia, agrietamientos), generación de aludes y caídas, y obstrucción de corrientes de agua. Entonces, en primer lugar deben realizarse las evaluaciones de exposición y para aquellos casos en los cuales ésta es inevitable, como con los bosques, cultivos y construcciones en la ladera afectada, se hacen los correspondientes análisis de resistencia de los elementos al fenómeno. En todo caso debe evitarse al máximo la exposición de vidas humanas en zonas de alta amenaza, recurriendo a las evacuaciones.

Gonzalez (2005) considera que los estudios de la vulnerabilidad ante PRM deben tener en cuenta cuatro aspectos importantes:

- 1) Vulnerabilidad Humana
- 2) Vulnerabilidad de Edificaciones
- 3) Vulnerabilidad de Puntos y Líneas Vitales
- 4) Vulnerabilidad Física General

Para Hollenstein (2005) existen diversos significados de vulnerabilidad que se analizan a partir del tipo de variable que involucra. La vulnerabilidad estudiada como una variable tipo Boolean (aquellas que contienen valores que pueden ser sólo Verdadero o Falso) se refiere a un objeto, componente, estructura o sistema que puede verse afectado negativamente o no por los efectos de una determinada amenaza natural. La vulnerabilidad como una variable semicuantitativa, expresa el grado de los efectos negativos usando clases cualitativas predefinidas tales como "sin daño", "daño menor", "daño severo" o "daño total", mientras que como una variable totalmente cuantitativa es expresada en valores absolutos o relativos. Finalmente la vulnerabilidad como variable interpolada, se determina a través de una función de interpolación que se utiliza de manera más eficiente en cálculos de gran volumen de datos.

A nivel de desarrollos en materia de evaluaciones y funciones de vulnerabilidad empleadas para el caso de deslizamientos se tiene el trabajo de Tesis Doctoral de Frédéric Leone (1996). Este autor propone una metodología de evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad a los deslizamientos que pueda ser reproducible. Para cuantificar la vulnerabilidad, desarrolla una nueva clasificación de movimientos en masa a partir de la noción de la intensidad de los fenómenos y la formación de los tipos específicos de daños; el núcleo de la metodología de evaluación lo constituye la elaboración de matrices de daño.



2.2. Metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES)

La metodología objeto del presente estudio se propuso en el año de 1988 en el marco del trabajo "*Investigación de Deslizamientos en la Red Vial Nacional: Sistema Semicuantitativo de Evaluación a Escala Intermedia de Zonas Homogéneas de Estabilidad*" desarrollado por Fernando Ramírez Cortés como Tesis de Grado de la Maestría en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y dirigida por el profesor Álvaro J. Gonzalez García.

En 1989 se presentó ante la comunidad académica el "*Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad para Zonas Homogéneas, SES*" (Ramírez, 1988; Ramírez y González, 1989) y desde entonces se ha venido usando en Colombia para zonificaciones de amenaza relativa por deslizamientos o movimientos en masa a escala intermedia (1:5000 - 1:50000) en estudios de consultoría y trabajos de alcance académico.

La metodología SES es en esencia un sistema heurístico de evaluación de estabilidad de taludes que funciona mediante la asignación de puntajes a los factores o parámetros de evaluación (intrínsecos y detonantes). En sus inicios, esta metodología fue implementada para ser usada en forma manual a nivel de Unidad de Terreno en la delimitación de zonas homogéneas (Gonzalez 2006). Ramírez (1988) utilizó un sistema de clasificación planteado por Forero y García (1987), quienes adaptaron el programa de Evaluación de Terrenos P.U.C.E. (Provincia, Patrón, Unidad y Componente de Terreno) desarrollado por Grant (1967). El sistema de Grant (1967) opera en cuatro niveles de clasificación jerárquica, cada unidad mayor está conformada por una asociación de unidades de la clase precedente. Los niveles de clasificación son los siguientes:

- Componente de terreno (nivel de detalle)
- Unidad de terreno (nivel intermedio)
- Patrón de terreno (nivel intermedio)
- Provincia de terreno (nivel general)

El sistema semicuantitativo de evaluación, trabaja en nivel intermedio, en las que la unidad de terreno puede ser definida como un área con litología característica, una asociación de suelos característicos, una asociación de pendientes características y una amplitud de relieve constante (Díaz 2004).

La metodología SES comprende fundamentalmente la evaluación de ocho (8) parámetros, donde cada uno de ellos es el resultado de diversos factores asociados según su naturaleza. Para cada factor se fijan intervalos de variabilidad de acuerdo con su influencia (en mayor o menor grado) en la estabilidad de las laderas. La combinación de los diferentes factores en cada parámetro y la suma de los puntos asignados a cada uno de ellos, resulta en una "calificación de estabilidad" (CE) a partir de la cual se pueden definir diferentes niveles de amenaza (Gonzalez 2006), es decir condiciones particulares de estabilidad favorables o desfavorables.

Los parámetros son evaluados asignándoles una clasificación de estabilidad (valores altos corresponden con zonas estables, mientras que valores bajos corresponden a zonas inestables), que se obtuvo a partir del análisis de resultados de encuestas realizadas entre ingenieros geotecnistas con amplia experiencia en la estabilidad de



taludes (Ramírez 1988). De esta forma a cada parámetro le corresponde un determinado puntaje de estabilidad, resultado de la suma ponderada de índices de cada factor asociado a éste (Ramírez y Gonzalez 1989), como se aprecia en la figura 16.

PARAMETRO	PUNTOS	FACTORES
M - Material.	1 - 50	Roca: Resistencia a compresión, fracturamiento de macizos Suelo: Origen: residual (material parental); transportado (agente) Tipo: granular ; fino Intermedio - Origen (residual o coluvial)- Erodabilidad de matriz. Discontinuidades heredadas
R - Relieve	15- 44	Posición en el talud; gradiente; convexidad del perfil
D - Drenaje	6 - 35	Densidad de drenaje; pendiente promedio de cauce
V - Vegetación	1 - 32	Pendiente; Tipo; % area con vegetación
C - Clima	8 - 40	Lluvia media anual (baja a alta)
S - Sismicidad	0 - 24	Tipo de material (S1, S2, S3); aceleración en roca de 1/475años
E -Erosión	2 - 35	Tipo (desde laminar hasta cárcavas); % de área erosionada
F- Inestabilidad	7 - 40	% of area con inestabilidad
CE	40 -300	

Figura 16. Definiciones originales de la Metodología SES

Fuente: Tomado de Ramírez y Gonzalez (1989)

Según Gonzalez (2005) los valores de categorías y la calibración se hicieron en varios sitios con la clasificación de estabilidad de Crozier (1984) realizada por geólogos (ver figura 17), mientras que ingenieros, de forma independiente, hicieron la clasificación con el método SES, y de ellos se obtuvo la escala de clasificación.

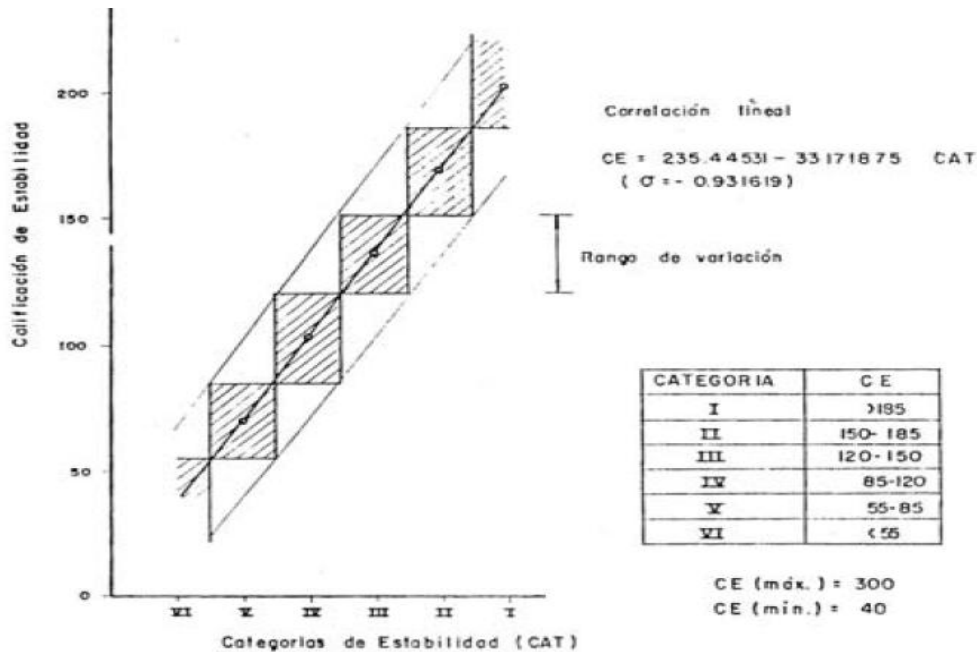


Figura 17. Calibración de la Calificación de Estabilidad (CE)

Fuente: Tomado de Gonzalez (2005)



Gonzalez (2005) elaboró un diagrama de flujo o flujograma para la Metodología SES (ver figura 18), en el cual se representan de manera gráfica los insumos y parámetros que se emplean en la evaluación de la amenaza relativa por PRM y los procesos relacionados, siguiendo un enfoque semicuantitativo. En la parte izquierda del flujograma se observan los parámetros intrínsecos requeridos (susceptibilidad), mientras que al lado derecho se aprecian los parámetros detonantes (amenaza relativa). Todo esto en síntesis, genera a través de una sumatoria de puntajes un mapa de amenaza relativa por PRM.

En las figuras 19 y 20 se pueden apreciar unos cuadros de resumen de la Metodología SES del año 1988, el primero en relación con las variables que intervienen y los puntajes que se pueden asignar para evaluar el parámetro Material (M), mientras el segundo hace referencia al resto de parámetros involucrados.



EVALUACIÓN DE AMENAZA RELATIVA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA MÉTODO SEMICUANTITATIVO

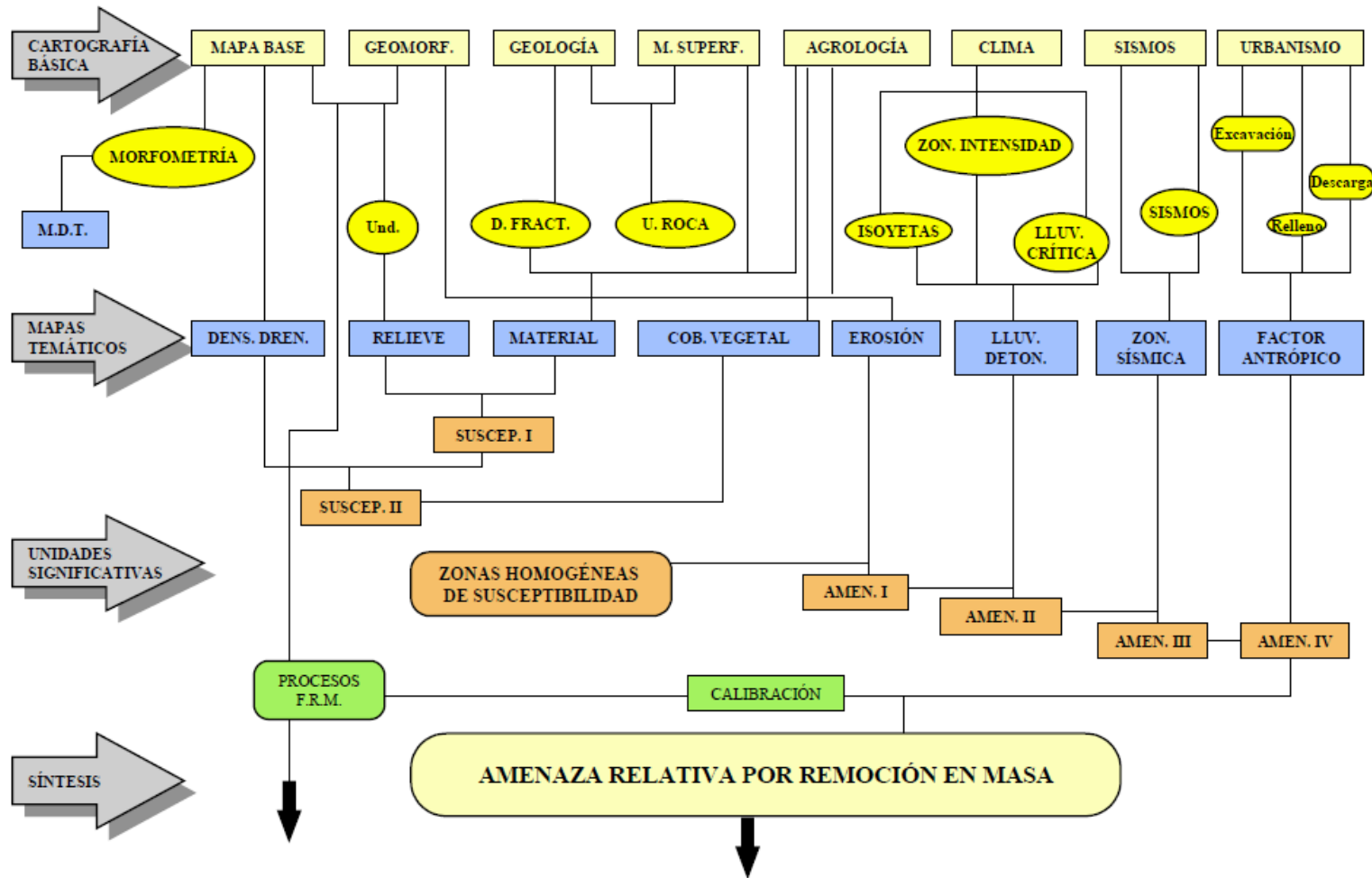


Figura 18. Flujograma de Empleo de la Metodología SES en Entorno Urbano
Fuente: Tomado de Gonzalez (2005)

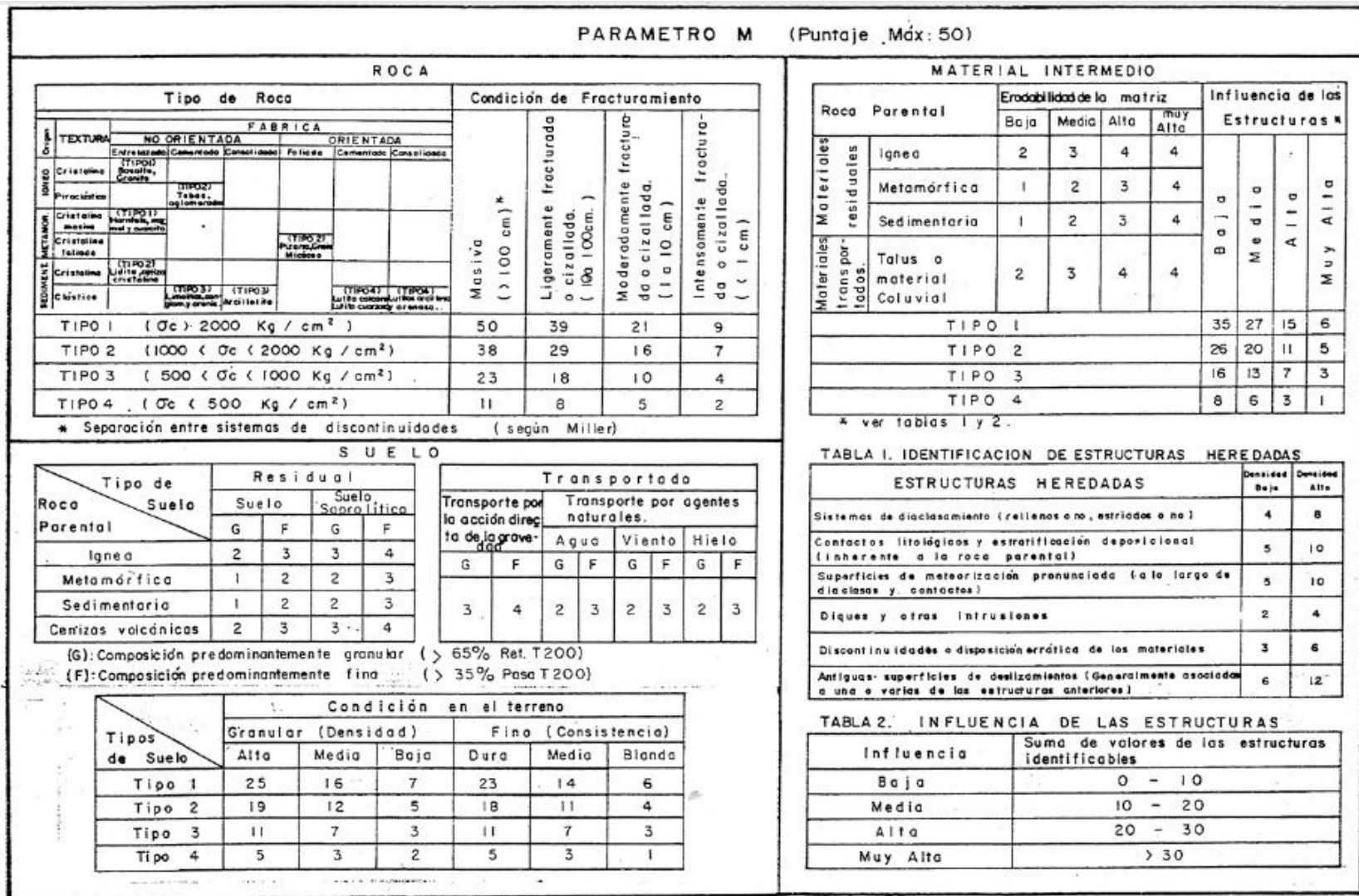


Figura 19. Metodología SES - Materiales (Definición original)

Fuente: Tomado de Ramírez (1988)



PARAMETRO R (R=A+B) Puntaje Máx:44				PARAMETRO D Puntaje Máx:35				PARAMETRO E Puntaje Máx:35																														
Sub - zonas		Rango de pendientes	A	Perfil	B	Pendiente promedio de cauces	Densidad de drenaje			Tipo de erosión	% de área afectada	Leve 0 - 10 %	Moderada 10 - 30 %	Severa 30 - 60 %	Muy severa >60 %																							
							Baja	Media	Alta																													
1. Interfluvio		0 - 1°	30	Convexo	9	Baja (0°- 5°)	35	30	23	Laminar	30	21	14	5																								
2. Ladera con infiltración		2°- 4°	19	Rectilíneo	12	Media (5°- 15°)	25	19	13	Diferencial	22	15	10	4																								
3. Ladera con reptación		10°- 30°	8	Cóncavo	14	Alta (>15°)	16	10	6	Concentrada	15	11	7	3																								
4. Escape o ladera rectilínea		>30°	19	Nota: Cuando no haya erosión el puntaje será 35																																		
5. Ladera intermedia de transporte		20°- 30°	6	PARAMETRO C Puntaje Máx : 40																																		
6. Ladera coluvial		5°- 20°	6	PMA				Baja				Media				Alta																						
7. Aluviones		0 - 4°	21	C				40				19				8																						
8. Ladera de cauce		>40°	6	PMA : Precipitación media anual.																																		
PARAMETRO V Puntaje Máx: 32																																						
Pendiente		0 - 20°			20°- 45°			> 45°			PARAMETRO S Puntaje Máx: 24																											
Tipo de vegetación		0-30%	30-50%	>50%	0-30%	30-50%	>50%	0-30%	30-50%	>50%	Riesgo sísmico																											
Bosque nativo, secundario, rastrojo alto.		12	22	32	10	17	25	8	13	19	Valores de Aa*																											
Rastrojo bajo, cultivos permanentes o semipermanentes.		10	18	27	7	12	17	3	5	7	Tipo de material**																											
Pastos o vegetación herbácea		10	17	25	6	10	14	2	4	6	0.00				0.05				0.10				0.15				0.20				0.25				0.30			
Cultivos limpios o desmonte		8	14	20	3	6	8	1	2	3	S1				S2				S3																			
Nota: Se debe escoger la condición de vegetación más desfavorable, presente en la unidad de terreno.																																						
PARAMETRO F Puntaje Máx: 40																																						
% de área directamente asociada con evidencias de fenómenos antiguos de inestabilidad.		0 - 10 %			10-30%			30-60%			>60%																											
F		40			28			18			7																											
CALIFICACION DE ESTABILIDAD CE Puntaje Máx:300 Mfn:40																																						
CE = M + R + D + E + V + C + S + F																																						

Figura 20. Metodología SES - Relieve, Vegetación, Inestabilidad, Erosión, Clima y Sismo (Definición original)

Fuente: Tomado de Ramírez (1988)



2.2.1. Parámetros Intrínsecos (M, R, D, U)

Los parámetros intrínsecos controlan la susceptibilidad a los PRM de un área dada, tal como se mencionó con anterioridad, por lo tanto también se pueden denominar parámetros de susceptibilidad. Los parámetros intrínsecos considerados en la metodología SES son los siguientes:

- Tipo de material (M)
- Relieve (R)
- Drenaje (D)
- Uso del suelo ó vegetación (U)

A continuación se presenta con mayor detalle la forma de evaluación de los cuatro parámetros intrínsecos según lo planteado por Ramírez (1988), Ramírez y Gonzalez (1989) y lo modificado por Gonzalez y Millan (1998) y Gonzalez (2005, 2006).

□ Tipo de material (M)

Este parámetro es uno de los más complicados del sistema, abarca desde macizo rocoso, pasando por materiales intermedios hasta suelos, con puntaje máximo igual a 50 (Gonzalez 2006) y puntaje mínimo de 1.

Material rocoso: El estado de las masas rocosas, se evalúa bajo tres aspectos principales: litología, consistencia y condición estructural. En cuanto a litología se diferencia entre rocas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario (Ramírez 1988); se tiene en cuenta la fabrica textural del material, desde la clase de textura según el tipo de roca (cristalina masiva y foliada, clástica, piroclástica) hasta la orientación de los minerales, es decir si las texturas son orientadas o no orientadas y se consideran tres condiciones comunes: entrelazada o entrabada, cementada o consolidada.

Con respecto a la consistencia de la roca se consideran cuatros condiciones: muy dura, dura, moderadamente blanda y blanda. Dependiendo de la litología y consistencia de roca, se establecen cuatro tipos de masas rocosas, de las más competentes (tipo 1) a la menos competente (tipo 4). Según la condición de fracturamiento se consideran desde masas rocosas masivas hasta intensamente fracturadas (Ramírez 1988), teniendo en cuenta la separación entre las discontinuidades según lo planteado por Miller.

La evaluación de la resistencia a la comprensión simple (σ_c) del material rocoso y la condición de fracturamiento para un tipo de macizo rocoso, determinan en buena medida la calificación de estabilidad de dicho material. En el cuadro 3 se presentan los valores de susceptibilidad para el factor Material, y como se puede ver, el puntaje maximo es 50 y corresponde a una roca masiva (muy poco fracturada) con una resistencia alta. El puntaje mínimo es 2 y corresponde a una roca intensamente fracturada o cizallada con una resistencia baja (Ramírez 1988).



TIPO DE ROCA								CONDICION DE FRACTURAMIENTO *							
ORIGEN	Textura	FABRICA						Masiva > 100 cm	ligeram. Fracturada. 10-100 cm	Modera-mente Fractu-rada. 1-10 cm	Intensa-mente Fractu-rada. < 1 cm				
		NO ORIENTADA			ORIENTADA										
		Entrelazada	Cementada	Consolidada	Foliada	Cementada	Consolidada								
IGNEO	Cristalino	R 1						50	39	21	9				
	Piroclástico		R 2												
METAMOR.	Cristalina masiva	R 1													
	Cristalina Foliada				R 2										
SEDIMEN.	Cristalina	R 2						38	29	16	7				
	Clástica		R 3	R 3		R 4	R 4								
ROCA TIPO 1 ($\sigma_c > 2000 \text{ Kg/cm}^2$)												23	18	10	4
ROCA TIPO 2 ($1000 < \sigma_c < 2000 \text{ Kg/cm}^2$)												11	8	5	2
ROCA TIPO 3 ($500 < \sigma_c < 1000 \text{ Kg/cm}^2$)															
ROCA TIPO 4 ($\sigma_c < 500 \text{ Kg/cm}^2$)															

* Separación entre discontinuidades (según Miller)

Cuadro 3. Valores de susceptibilidad del factor Roca

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Material intermedio: Se evalúan tres características principales: litología, erodabilidad de la matriz de soporte y por último la identificación e influencia de las estructuras heredadas. La litología se considera a partir del tipo de roca parental de los depósitos saprolíticos (roca meteorizada que conserva parte de la estructura de la roca original), ya sea esta ígnea, metamórfica o sedimentaria. Dentro de los materiales intermedios se han incluido también materiales depositados como talus, coluviones y aluviones, en los cuales la matriz sea menor del 30% del depósito (Ramírez 1988).

Con respecto a la erodabilidad (índice de vulnerabilidad del material a la erosión) de la matriz, se consideran cuatro condiciones: baja, media, alta y muy alta, siendo esta una apreciación relativa a los materiales presentes en un área de estudio dada.

Dependiendo de la litología y de la erodabilidad de la matriz, se establecen cuatro tipos de materiales intermedios, del más favorable, en términos de estabilidad (Tipo I-1), al más desfavorable (Tipo I-4). La influencia de las estructuras se evalúa mediante la identificación de las estructuras heredadas y la presencia de una baja o alta densidad. Dentro de las estructuras heredadas se pueden identificar los sistemas de diaclasamiento, contacto litológico y estratificación, superficie de meteorización, diques, discontinuidades y antiguas superficies de deslizamientos. Finalmente, la evaluación de la condición estructural para un tipo de material intermedio determina la calificación de estabilidad de dicho material.

En el cuadro 4 se presentan los valores de susceptibilidad para el factor material intermedio, y como se puede ver, el puntaje más alto es 35 y corresponde a un material Tipo I-1, cuyo origen puede ser residual de roca parental metamórfica o sedimentaria, con una matriz de baja erodabilidad, y con una baja influencia de las estructuras heredadas. El puntaje más bajo es 1 y corresponde a un material Tipo I-4, con una alta influencia de las estructuras heredadas.



ROCA PARENTAL		Erodabilidad de la Matriz				Influencia de las Estructuras *			
		Baja	Media	Alta	Muy alta	B a j a	M e d i a	A l t a	Muy A l t a
MATERIAL RESIDUAL	Ígnea	I-2	I-3	I-4	I-4				
	Metamór.	I-1	I-2	I-3	I-4				
	Sedimen.	I-1	I-2	I-3	I-4				
MATERIAL TRANSPORTADO	Talus o material coluvial	I-2	I-3	I-4	I-4				
Tipo I-1						35	27	15	6
Tipo I-2						26	20	11	5
Tipo I-3						16	13	7	3
Tipo I-4						8	6	3	1

Cuadro 4. Valores de susceptibilidad del factor Material intermedio

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

En los cuadros 5 y 6 se presenta la identificación de estructuras heredadas con su respectiva clasificación de acuerdo con la densidad y la calificación de la influencia de las estructuras respectivamente.

ESTRUCTURAS HEREDADAS	densi. baja	densi. alta
Sistemas de diaclasamiento (rellenos o no, estriados o no)	4	8
Contactos litológicos y estratificación depositacional (inherente a la roca parental)	5	10
Superficies de meteorización pronunciada (a lo largo de diaclasas y contactos)	5	10
Diques y otras intrusiones	2	4
Discontinuidades o disposición errática de los materiales	3	6
Antiguas superficies de deslizamientos (Generalmente asociados a una o varias de las estructuras anteriores)	6	12

Cuadro 5. Identificación de estructuras heredadas (Material intermedio)

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

INFLUENCIA	Suma de los valores de las estructuras identificables
Baja	0 - 10
Media	10 - 20
Alta	20 - 30
Muy Alta	> 30

Cuadro 6. Influencia de las estructuras heredadas (Material intermedio)

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Suelo: Se considera aquel material con más de 30% que pasa por el tamiz N° 4, es decir que el tamaño del grano es menor de 4.76 mm. Este se evalúa en cuanto a su origen, a su naturaleza granular (<35% pasa T 200) o fina (>35% pasa T 200) y a su condición in situ. En cuanto a su origen se tienen dos tipos de suelo: residual y transportado. Los suelos residuales se diferencian según la roca parental sea ígnea, metamórfica o



sedimentaria y aquellos formados a partir de ceniza volcánica o brechas. Además se distingue entre lo que se ha determinado suelo propiamente dicho (que corresponde al horizonte VI del perfil de meteorización de Dearman), ya que este último exhibe características estructurales inherentes, a diferencia del primero. En el cuadro 7 se presentan los valores de susceptibilidad para el factor suelo residual.

Tipo de Suelo →	RESIDUAL			
	SUELO		SUELO SAPROLITICO	
Roca Parental ↓	G	F	G	F
Ignea	S 2	S 3	S 3	S 4
Metamor.	S 1	S 2	S 2	S 3
Sedimen.	S 1	S 2	S 2	S 3
Volcánica	S 2	S 3	S 3	S 4

(G): Composición predominante granular (> 65% ret. T 2000)
 (F): Composición predominante fina (> 35% pasa T 2000)

Cuadro 7. Valores de susceptibilidad del factor Suelo residual

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Los suelos transportados se diferencian entre aquellos de depósito por la acción directa de la gravedad y los suelos depositados principalmente por agentes naturales de transporte (ver cuadro 8). Dentro de los primeros se pueden mencionar los talus, coluviones, los flujos de lodos y en general depósitos de laderas en los cuales la matriz sea mayor al 30% del depósito. Dentro del segundo tipo se encuentran los suelos depositados por el agua (como aluviones, depósitos lacustres, entre otros), por el viento (Loess, Dunas, cenizas volcánicas) y por hielo (morrenas, por ejemplo).

TRANSPORTADO							
Por acción directa de la gravedad		Por agentes naturales					
		AGUA		VIENTO		HIELO	
G	F	G	F	G	F	G	F
S 3	S 4	S 2	S 3	S 2	S 3	S 2	S 3

(G): Composición predominante granular (> 65% ret. T 2000)
 (F): Composición predominante fina (> 35% pasa T 2000)

Cuadro 8. Valores de susceptibilidad del factor Suelo transportado

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Según el origen del suelo y la granulometría, éste se clasifica en uno de cuatro tipos de suelo, de tal manera que el S1 presenta las características más favorables y el S4 las más desfavorables. Finalmente, se evalúa la condición in situ de los depósitos del suelo, para aquellos de naturaleza granular se considera estado denso a estado suelto y para los de naturaleza fina se considera consistencia dura a consistencia blanda. La “calificación” de estabilidad, estará en función del tipo de suelo (de S1 a S4) y de la condición in situ del mismo.

En el cuadro 9 se presenta la calificación de susceptibilidad para el factor condición del suelo, en la cual el puntaje máximo es 25 y corresponde a un suelo tipo S1 (residual de



composición predominante granular y de roca parental metamórfica o sedimentaria) con alta densidad. El puntaje mínimo es 1 y corresponde a un suelo tipo S4 (suelo saprolítico de grano fino y roca parental ígnea o cenizas volcánicas; suelo de grano fino, transportado por acción directa de la gravedad) de consistencia blanda.

TIPO DE SUELO ↓	CONDICION EN EL TERRENO					
	Granular (Densidad)			Fino (Consistencia)		
	Alta	Media	Baja	Dura	Media	Blanda
Tipo S 1	25	16	7	23	14	6
Tipo S 2	19	12	5	18	11	4
Tipo S 3	11	7	3	11	7	3
Tipo S 4	5	3	2	5	3	1

Cuadro 9. Valores de susceptibilidad del factor condición del suelo

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Amenaza Sísmica - Perfil de Suelo (de la NSR-98 a la NSR-10): Según la NSR-98 el perfil de suelo se define como los diferentes estratos de suelo existentes debajo del sitio de una edificación. El perfil de suelo debe ser determinado por un ingeniero geotecnista a partir de datos geotécnicos debidamente sustentados. Los efectos locales de la respuesta sísmica de la edificación deben evaluarse con base en los perfiles de suelo dados y la identificación de los mismos se realiza a partir de la superficie de terreno.

Es importante destacar que la metodología SES considera fundamentalmente tres tipos de perfil de suelo (S1, S2 y S3) según lo planteado en principio en el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CCCSR) del año 1984 y posteriormente con las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98) se adiciona un cuarto perfil (S4) para suelos blandos. En el parámetro sismo (S) se consideran tres (3) tipos de perfil de suelo, mientras que en el parámetro Material (M) se consideran cuatro (4) tipos.

Estas normas técnicas (CCCSR-84 y NSR-98) son documentos que con el paso del tiempo han ameritado actualizaciones periódicas consecuentes con los avances en las ciencias de la ingeniería y arquitectura y en especial de la ingeniería sísmica y por experiencias de sismos fuertes a nivel nacional e internacional, por lo tanto en el año 2010 entró en vigencia el nuevo Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10).

La NSR-10 contempla específicamente un cambio de cuatro a seis perfiles de suelos (A, B, C, D, E y F), los cuales se presentan en el cuadro 10. Los parámetros usados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A al E. Para el perfil tipo F se aplican otros criterios y la respuesta no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil en los casos de perfiles con espesor de suelo significativo.



Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F_1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F_2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F_3 — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$) F_4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)	

Cuadro 10. Clasificación de los perfiles de suelo según la NSR-10

Fuente: Tomado de NSR-10

La metodología SES requiere de un cambio en los perfiles de suelo propuestos inicialmente en la CCCSR-84 y después por la NSR-98, para ajustarlos a la NSR-10, por lo tanto se toma como referencia lo planteado por Castro-García (2011) en la evaluación del efecto del suelo subyacente, comparando los tipos de perfil de suelo de la NSR-98 y NSR-10, a partir de los coeficientes por efecto del suelo y se obtiene el cuadro comparativo N° 11.

	NSR-98	NSR-10		
		Suelo	F_a	F_v
Suelo S_1 $S = 1.0$		A	0.8	0.8
Suelo S_2 $S = 1.2$		B	1.0	1.0
Suelo S_3 $S = 1.3$		C	1.0 a 1.2	1.3 a 1.7
		D	1.0 a 1.6	1.5 a 2.4
		E	0.9 a 2.5	2.4 a 3.5

Cuadro 11. Tipos de perfil de suelo de la NSR-98 y NSR-10

Fuente: Tomado de Castro-García (2011)

Se propone para la aplicación de la metodología SES a la luz de la NSR-10, una relación conceptual entre los tipos de perfil de suelo de la NSR-98 y la NSR-10, que queda expresada en el cuadro 12:



Tipo de perfil de suelo (NSR-98)	Tipo de perfil de suelo (NSR-10)	Descripción
S1	A, B	Perfil de material rocoso (de rigidez alta a media) o de suelos muy duros o muy densos con una velocidad de la onda cortante (V_s) mayor de 760 m/s.
S2	C	Perfil de suelos densos, o de consistencia dura a media o roca blanda con una velocidad de la onda cortante (V_s) mayor o igual a 400 m/s y $\bar{N} \geq 50$
S3	D	Perfil de suelos medianamente rígido o de consistencia media a blanda con una velocidad de la onda cortante (V_s) entre 180 y 400 m/s y $50 > \bar{N} \geq 50$
S4	E	Perfil de suelos de consistencia blanda con una velocidad de la onda cortante (V_s) menor de 180 m/s.
	F	El perfil de suelo F requiere de una evaluación detallada del sitio según la NSR-10.

Cuadro 12. Relación de perfiles de suelo de la NSR-98 y NSR-10

Fuente: NSR-98, NSR-10 y adaptado por Aguilar-Collazo (2014)

□ Relieve (R)

En este parámetro se evalúan dos factores fundamentales, la pendiente promedio y la forma (perfil longitudinal) de la unidad del terreno. La evaluación de la pendiente promedio de la unidad de terreno representado en el Factor A, se hace utilizando el perfil hipotético de vertiente propuesto por Dalrymple et al. (1968), teniendo presente que cada una de las unidades allí establecidas (ver figura 21), tiene relación con los fenómenos de inestabilidad que pueden desarrollarse en ella, y a la vez están asociadas a un rango de pendiente característico, lo que facilita su calificación en términos de estabilidad. La forma de unidad del terreno representada en el Factor B, se evalúa por medio de su perfil longitudinal representativo, el cual puede ser convexo, rectilíneo o cóncavo. Finalmente se considera la suma ponderada del valor del factor A y el valor del factor B, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R = A + \lambda \cdot B, \quad \text{con } (\lambda < 1) \quad [2.3]$$

En los cuadros 13 y 14 se presentan los valores de susceptibilidad para el factor inclinación de la pendiente (A) y para el factor forma de la pendiente (B). Como se puede apreciar, los máximos puntajes, o valores del parámetro R, corresponden a zonas de interfluvios y a perfiles cóncavos, y los mínimos puntajes a zonas de laderas de cauce y perfiles convexos.

Sub-zonas	Rango de pendiente	Factor A
Interfluvio	0-2°	29
Ladera con infiltración	3° - 7°	19
Ladera con reptación	18° - 58°	8
Escape o ladera rectilínea	> 58°	19
Ladera intermedia de transporte	36° - 58°	6
Ladera coluvial	9° - 36°	6
Aluviones	0 - 7°	21
Ladera de cauce	> 84°	6

Cuadro 13. Valores de susceptibilidad del factor inclinación de la pendiente

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

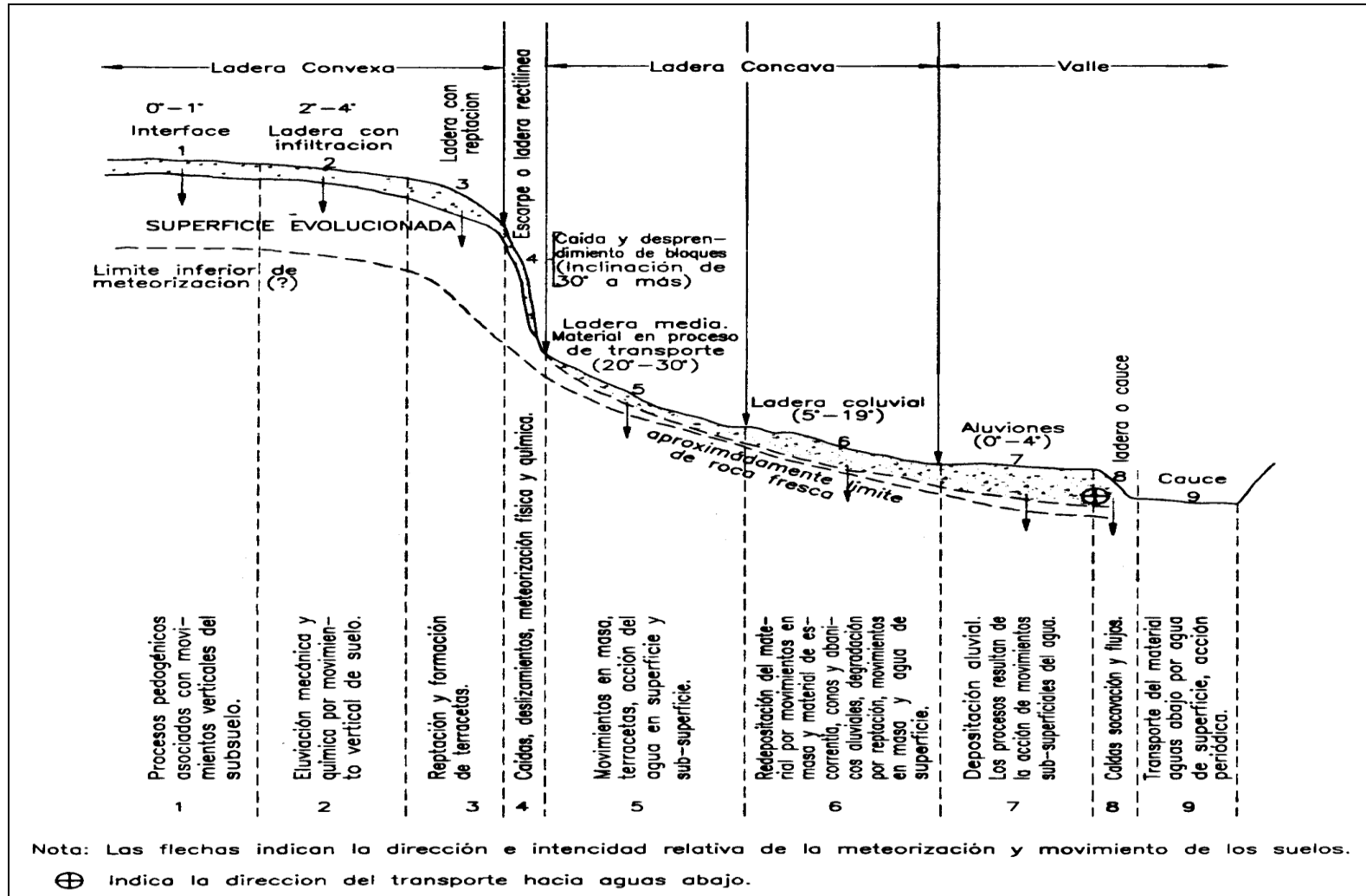


Figura 21. Perfil de vertiente propuesto por Dalrymple et al. (1968)

Fuente: Tomado de Gonzalez (2006)



Perfil de la pendiente	Factor B
Convexo	1
Rectilíneo	3
Cóncavo	5

Cuadro 14. Valores de susceptibilidad del factor forma de la pendiente

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

❑ Drenaje (D)

Se evalúan dos factores fundamentales: Densidad de drenaje y Pendiente promedio de los cauces. Debido a que la densidad de drenaje depende de las características litológicas, climáticas y topográficas del terreno, los rangos de valores para las condiciones de estabilidad baja, media o alta, deberán establecerse para cada ambiente geológico en particular.

Para la pendiente promedio de los cauces, Ramírez (1988) propone utilizar unos rangos de valores, los cuales se aprecian en el cuadro 15, junto con la calificación de la densidad de drenaje. El puntaje máximo es 35 y corresponde a una zona con baja pendiente promedio de cauces y baja densidad de drenaje, mientras que el puntaje mínimo es 6 y corresponde a una zona con alta pendiente promedio de cauces y alta densidad de drenaje.

Pendiente promedio de cauces	Densidad de drenaje		
	Baja	Media	Alta
Baja (0°- 5°)	35	30	23
Media (5°- 15°)	25	19	13
Alta (>15°)	16	10	6

Cuadro 15. Valores de susceptibilidad del factor densidad de drenaje

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

❑ Uso del suelo (U) y Vegetación (V)

El parámetro de Uso del suelo (U) es introducido a la metodología SES como una modificación del parámetro Vegetación (V) según Gonzalez (2006). Inicialmente se evaluaba sólo la cobertura vegetal de una zona de estudio dada, sin hacer especificaciones sobre las especies o clases de cultivos. El cambio en este parámetro se plantea con el propósito de que a través de la metodología SES se pueda evaluar el uso del suelo de un área dada, teniendo en cuenta sus rasgos urbanos y/o rurales.

En el cuadro 16 se presenta la valoración inicial del parámetro Vegetación según Gonzalez y Millan (1998). Los mayores puntajes los obtienen las zonas cubiertas de bosques en bajas pendientes. Los menores puntajes se asignan a zonas de cultivos limpios o desmonte en altas pendientes.



Pendiente \ Tipo de vegetación	0 - 36%	36% - 100%	> 100%
Bosque nativo, secundario, rastrojo alto.	32	25	19
Rastrojo bajo, cultivos permanentes o semipermanentes (zona urbana pavimentada)	27	17	7
Pastos o vegetación herbácea (zona urbana sin pavimentar)	25	14	6
Cultivos limpios o desmonte (canteras)	20	8	3

Cuadro 16. Valores de susceptibilidad del parámetro Vegetación

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

En el cuadro 17 se presenta la valoración a aplicar del parámetro Uso del suelo según lo planteado por Gonzalez (2006), el cual está basado en el parámetro Vegetación, pero en el que se modificaron los grupos y puntajes iniciales, pues está definido para el caso de la ciudad de Villavicencio.

Pendiente \ Uso de suelo	0 - 20°	20° - 45°	> 45°
Bosque nativo, secundario, rastrojo alto.	32	25	18
Rastrojo bajo, cultivos permanentes o semipermanentes	27	17	7
Pastos o vegetación herbácea	25	15	5
Cultivos limpios o desmonte (canteras)	21	11	1
Rasgos Rurales	12	5,5	0
Rasgos Urbanos	6	0	0

Cuadro 17. Valores de susceptibilidad del parámetro Uso del suelo de Villavicencio

Fuente: Tomado de Gonzalez (2006)

2.2.2. Parámetros Detonantes (C, S, E, A)

Los parámetros detonantes son un índice de la amenaza relativa a los PRM de un área dada, tal como se mencionó con anterioridad, por lo tanto también se pueden denominar parámetros que favorecen la ocurrencia de PRM. Los parámetros detonantes considerados en la metodología SES son los siguientes:

- Clima (C)
- Sismo (S)
- Erosión (E)
- Efectos Antrópicos (A)

A continuación se presenta con mayor detalle la forma de evaluación de los cuatro parámetros detonantes según lo planteado por Ramírez (1988), Ramírez y Gonzalez (1989) y lo modificado por Gonzalez y Millan (1998) y Gonzalez (2005, 2006).

☐ Clima (C)

En el caso de la metodología SES, el clima se evalúa a través de un análisis de la precipitación media anual en el área de estudio y sus correspondientes períodos de retorno, y en función de ellos se asigna la calificación correspondiente, de manera relativa al área de estudio. En el cuadro 18 se presenta la calificación del parámetro clima, donde los puntajes se establecen de manera relativa al área de estudio.



PMDA*	Baja	Media	Alta
C	40	19	8

* Precipitación Máxima Diaria Acumulada

Cuadro 18. Valores de susceptibilidad del parámetro Clima

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

□ Erosión (E)

En el parámetro Erosión (E) se tiene en cuenta la cantidad de pérdida de suelo debido a los procesos erosivos, evaluando la erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, la cobertura vegetal y el uso del suelo, y teniendo en cuenta los tipos de erosión que se presentan (Laminar, Diferencial, Concentrada o por Socavación) y porcentaje del área afectada por cada uno de ellos.

En el cuadro 19 se presenta la calificación del parámetro erosión, como se puede apreciar los valores más altos se asignan a zonas con erosión laminar, mientras que los valores bajos se asignan a zonas afectadas por procesos de socavación.

Tipo de erosión	E
Laminar	30
Diferencial	22
Concentrada	15
Por socavación	11

Nota: Cuando no haya erosión el puntaje será 35

Cuadro 19. Valores de susceptibilidad del parámetro Erosión

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

□ Sismo (S)

Para la evaluación del parámetro Sismo (S) se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Valores de Aceleración pico efectiva (Aa),
- Tipo del Material
- Morfología del Terreno

Los valores de Aceleración pico efectiva (Aa) en conjunto con la Velocidad pico efectiva (Av) definen los movimientos sísmicos de diseño. De acuerdo con la zona de amenaza sísmica donde se localiza el área de estudio, se definen los valores de (Aa) que se utilizan en la metodología SES.

Los tipos de material de la metodología SES fueron adoptados de acuerdo a los tres (3) perfiles de suelo establecidos en el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CCCSR) del año 1984, tal como se presenta a continuación:

Perfil S1: Roca de cualquier característica, ya sea cristalina o lutítica que tiene una velocidad de onda de cortante mayor o igual a 750 m/s. Presenta perfiles conformados por suelos duros con un espesor menor de 60 m, compuesto por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras.

Perfil S2: Perfil en donde entre la roca y la superficie hay más de 60 m de depósitos de arcillas duras o suelos no cohesivos.



Perfil S3: Perfil en donde entre la roca y la superficie hay más de 10 m de depósitos de arcillas, cuya dureza varía entre mediana a blanda, con o sin intercalaciones de arenas u otros suelos no cohesivos.

En el cuadro 20 se presenta la valoración del parámetro de sismicidad. Los valores máximos de este parámetro se presentan en el perfil de suelo S1 y con valores bajos de (Aa), mientras que los valores mínimos se dan para el perfil de suelo S3 y con valores altos de (Aa), en términos relativos.

Amenaza sísmica →	Valores de aceleración pico efectiva (Aa)						
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Tipo de Material ↓							
S1	24	21	17	13	8	5	2
S2	12	10	8	7	4	3	1
S3	4	3	3	2	1	1	0

Cuadro 20. Valores de susceptibilidad del parámetro Sismo

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

Es importante reiterar que de conformidad con el cambio de cuatro perfiles de suelo según el CCCSR-84 y la NSR-98 (S1, S2, S3 y S4) a seis perfiles de suelo según la NSR-10 (A, B, C, D, E y F), los parámetros de sismicidad (S) y de Material (M) se deben ajustar a dichas modificaciones donde se propone una relación conceptual o "equivalencia" entre los tipos de perfil de suelo establecidos (antes y en la actualidad) para la aplicación de la metodología SES, la cual queda agrupada de la siguiente forma:

Grupos	Tipo de perfil de suelo (NSR-98)	Tipo de perfil de suelo (NSR-10)
1	S1	A, B
2	S2	C
3	S3	D
4	S4	E
5	S4	F

❑ Efectos Antrópicos (A)

El parámetro Efectos Antrópicos (A) es introducido a la metodología SES para reemplazar al parámetro de Evidencias de Procesos Antiguos de Inestabilidad (F). Inicialmente el parámetro (F) se utilizaba para analizar la intervención del hombre en las laderas, evaluando la cobertura y uso del suelo y su relación con los procesos de inestabilidad actual. Teóricamente este proceso debería conducir a identificar conflictos de uso en relación con los deslizamientos o la erosión. Sin embargo el parámetro (F) fue eliminado pues representaba en parte el resultado que se estaba buscando (Gonzalez 2006).

El parámetro (A) está concebido especialmente para ambientes urbanos (Lozano y Millan, 1995), aunque para zonas rurales o inexploradas (p.e. Villavicencio) se puede evaluar a través de los cambios temporales del parámetro Uso del suelo (U) antes Vegetación (V), utilizando un entorno SIG.



El Factor Antrópico como desencadenante o contribuyente de movimientos en masa, se puede estudiar a partir de considerar el cambio de uso del suelo como transformador del medio físico. En el caso de uso urbano, con la construcción de obras de infraestructura (vías, redes) y de viviendas, y en el caso del uso minero a la modificación de la morfología del área. En primera instancia, cualquier acción del hombre para el cambio del uso, se inicia con la deforestación y en general las obras causan excavación o cortes, sobrecargas (rellenos o botaderos y construcciones), los cuales, acompañados del manejo incontrolado de aguas, generan indiscriminadamente sobre las laderas efectos de cargas, sobrecargas, modificación del drenaje e infiltración. La figura 22 muestra esquemáticamente la acción del hombre sobre el medio físico (González y Millán 2001).

El análisis del Factor Antrópico debe determinar inicialmente las variables que intervienen. Este análisis se dirige a cuantificar los efectos sobre la ocurrencia de deslizamientos, por sobrecarga y descarga de las laderas, por infiltración de agua de escorrentía y por modificación del drenaje, que González y Millán (2001) evalúan para el caso de la ciudad de Bogotá.

Sobrecarga: La sobrecarga la generan los rellenos y las edificaciones. En el mapa de inventario de procesos se deben cartografiar los rellenos y las zonas de actividades mineras (si las hay), donde se presenta disposición de estériles en forma aleatoria y sin ningún control técnico.

Descarga: La descarga de los taludes naturales se manifiesta en las excavaciones mineras, los cortes de las vías y los cortes para edificaciones. Como la descarga de mayor magnitud y severidad se produce en las explotaciones mineras, para su evaluación se tomaron las zonas de actividades mineras.

Infiltración de aguas: Uno de los aspectos que más aporta al incremento del contenido de humedad de los materiales que conforman la zona de estudio, es el vertimiento de las aguas sanitarias en las partes altas de los cortes de canteras, a largo de las vías sin pavimentar y sobre las laderas de los cauces. En áreas urbanas antiguas, las redes de agua potable pueden sufrir rupturas debido al envejecimiento y desgaste, y por lo tanto filtración constante de agua a presión.

En algunas áreas semiurbanas, es usual que los pobladores se abastezcan de agua para el consumo, interceptando la red matriz o captando corrientes naturales y transportándola a través de mangueras. Es muy normal que las mangueras sufran rupturas y que a lo largo de su recorrido estén constantemente aportando agua a las laderas. Para evaluar el incremento de la infiltración por acción del hombre se establecen áreas según la forma de abastecimiento de agua potable y de manejo de aguas sanitarias, además, se incluye el tipo de cobertura en las zonas urbanas (áreas residenciales pavimentadas, áreas residenciales sin pavimentar, áreas pavimentadas de uso diferente al residencial y áreas sin pavimentar de uso diferente al residencial).

Modificación del Drenaje: Las modificaciones del drenaje más severas se encuentran en las áreas de uso minero y urbanizado. La intensidad de la modificación se establece de manera subjetiva y se hace una clasificación en zonas de similar afectación. Se define como ronda de una corriente, el área comprendida a lo largo de su cauce sobre la cual se desarrolla la dinámica fluvial y las áreas de protección lateral del cauce. Por normas legales, a los drenajes principales se les atribuye una zona de 30 m a lado y lado del cauce y a los demás drenajes se les asigna un corredor de 15 m a cada lado del cauce.

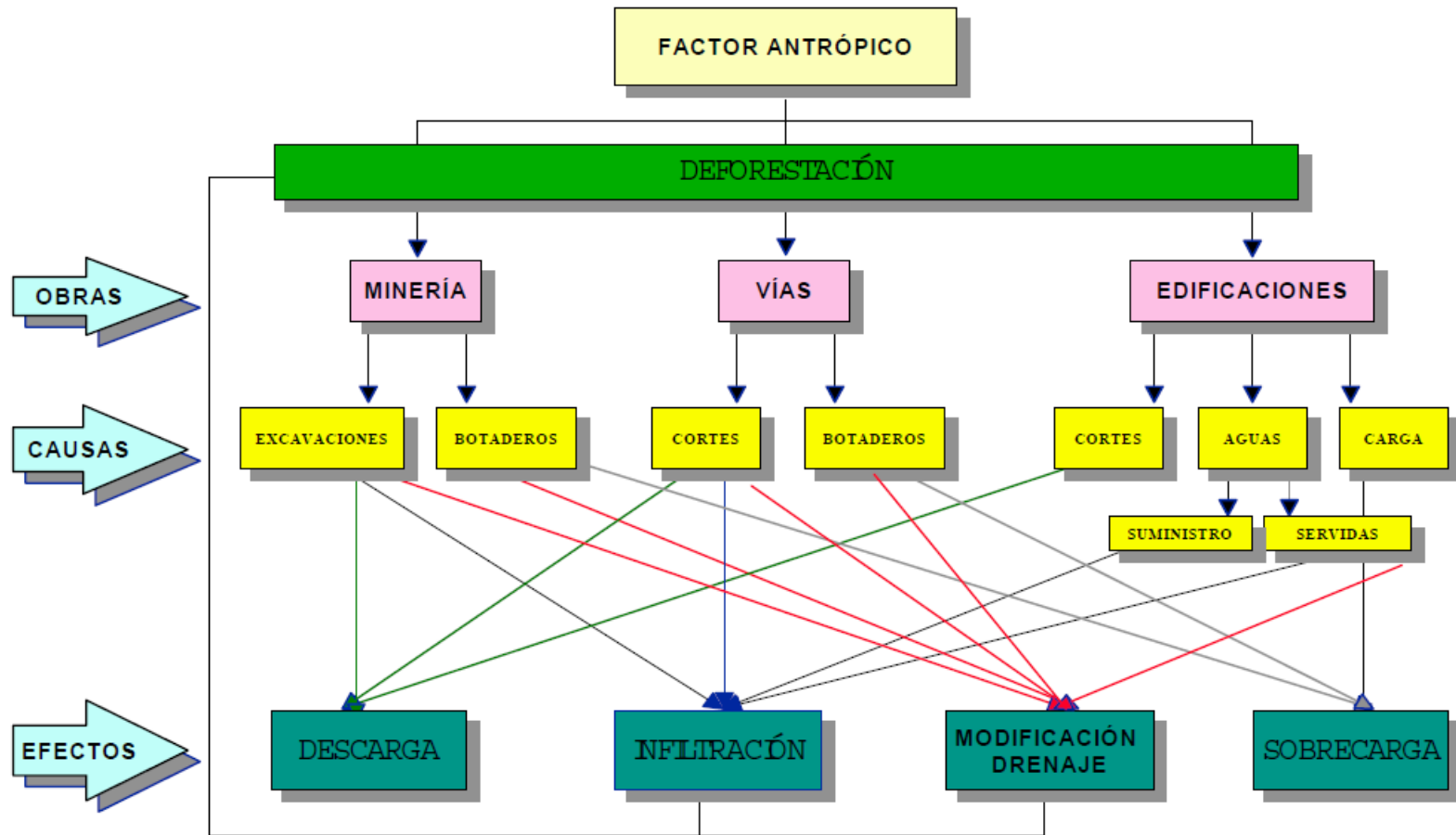


Figura 22. Efectos de la acción del hombre en la producción de deslizamientos

Fuente: Tomado de González y Millán (2001)



Las anteriores dimensiones no necesariamente coinciden con la realidad física de las corrientes naturales. Con la información obtenida en campo y de manera indirecta se clasificaron estas áreas según el grado de modificación del drenaje.

En el cuadro 21 se presenta la valoración del parámetro Efectos Antrópicos (A). Los valores máximos de este parámetro se presentan para zonas urbanas con un grado de intervención bajo, mientras que los valores mínimos se dan para rondas de las quebradas, cuyo grado de intervención es alto.

ZONAS DE AFECTACIÓN				GRADO DE INTERVENCIÓN		
				Bajo	Medio	Alto
ZONAS DE EXPLOTACIÓN	Canteras	Actuales	Urbanizadas		16	
			Sin urbanizar			6
		Abandonadas	Urbanizadas		18	
			Sin urbanizar			10
	Chircales		Urbanizadas		22	
			Sin urbanizar			12
RONDAS			Intervenidas			2
			Poco intervenidas	38		
ZONAS URBANAS			Sin urbanizar	40		
			Con servicios	35		
			Red aguas lluvias		26	
			Red aguas negras		30	
			Sin servicios			4

Cuadro 21. Valores de susceptibilidad del parámetro Efectos Antrópicos

Fuente: Tomado de Ramírez (1988) y modificado por Gonzalez y Millan (1998)

2.2.3. Evaluación Final del Grado de Amenaza (CE)

La formulación de la metodología SES suma los valores de cada uno de los parámetros, para obtener el valor de la Calificación de Estabilidad (CE). Según Gonzalez (2006) la combinación de los diferentes factores en cada parámetro intrínseco y detonante y la suma de los puntos asignados a cada uno de ellos, resulta en una Calificación de Estabilidad a partir de la cual se pueden definir diferentes niveles de amenaza.

La evaluación final del grado de amenaza según lo planteado inicialmente por Ramírez (1988) se expresa de la siguiente forma:

$$CE = M + R + D + V + E + C + S + F \quad [2.4]$$

Donde Material (M), Relieve (R), Drenaje (D), Vegetación (V), Erosión (E), Clima (C), Sismo (S) y Evidencias de Procesos Antiguos de Inestabilidad (F) son los parámetros de evaluación definidos originalmente en la metodología SES según se ha explicado con anterioridad.



Teniendo en cuenta las modificaciones que se han realizado a la metodología SES, la evaluación final del grado de amenaza ha cambiado en relación con algunos parámetros que se han reemplazado y viene dada por la siguiente expresión:

$$CE = M + R + D + U + E + C + S \pm A \quad [2.5]$$

Donde Uso del suelo (U) y Efectos Antrópicos (A) son los parámetros de evaluación que sustituyen a los parámetros Vegetación (V) y de Inestabilidad (F) respectivamente de acuerdo con lo que se ha explicado antes (ver figura 23). Se destaca en la determinación de la Calificación de Estabilidad (CE) que el parámetro de Efectos Antrópicos (A) puede ser sumado o restado según sea su contribución a la inestabilidad o estabilidad del área de estudio.

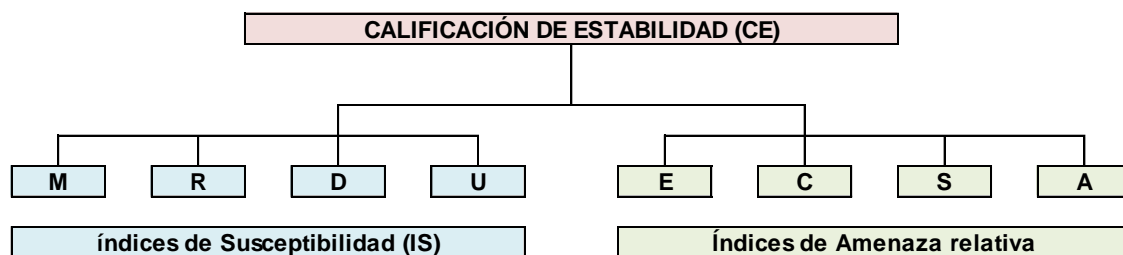


Figura 23. Calificación de Estabilidad de la Metodología SES

Fuente: El autor (2015)

Por otra parte, la suma de los parámetros intrínsecos se denomina Índice de Susceptibilidad (IS) y está dado por la siguiente expresión:

$$IS = M + R + D + U \quad [2.6]$$

De acuerdo con los valores de CE se obtienen de forma preliminar zonas homogéneas según su comportamiento de estabilidad. Esta zonificación preliminar de amenaza se debe comparar con los procesos de remoción en masa presentes en el área de estudio y su respectiva actividad, y se debe calibrar de esta manera la zonificación, obteniéndose como producto final el mapa de zonificación de amenaza relativa (Ramírez, 1988).

2.2.4. Resumen de Modificaciones de la Metodología SES

El modelo inicial de la metodología SES fue desarrollado hacia el final de la década de los 80's, tiempo en el cual no había una noción clara del estudio de las amenazas y riesgos por deslizamientos y los factores intrínsecos y detonantes tampoco se diferenciaban claramente (Gonzalez 2006).

A medida que el método se fue aplicando, se han hecho varias modificaciones, las cuales fueron planteadas en su mayoría por Gonzalez (2006) con el propósito de mejorar y adaptar la metodología a los nuevos desarrollos. A continuación se citan de modo resumido los cambios realizados.

- Preservando los puntajes de cada parámetro y el intervalo de CE, el parámetro F fue eliminado, pues representaba en parte el resultado que se estaba buscando,



pero el inventario se conservó para el patronamiento y calibración del método. En lugar de F se introdujo el parámetro Efectos Antrópicos (A), especialmente para ambientes urbanos (Lozano y Millán, 1995).

- Dentro del parámetro Material (M) se incorporó un nuevo factor f = densidad de fracturamiento regional, para sustituir al factor de fracturación de Müller, el cual es para macizos rocosos a escala local.
- Con el rápido desarrollo de los sistemas computacionales se hizo necesario adaptar la metodología SES para su uso con Sistemas de Información Geográfica (SIG) por medio de sistemas geomorfológicos generales. La Unidad de Terreno original fue sustituida por la Unidad de Condición Única (Carrara et al. 1995) traducida en unidad de pantalla (píxel), que resulta de la superposición de diferentes capas en el SIG y entonces los porcentajes de área fueron eliminados (parámetros V y E).
- Debido a lo anterior, el parámetro de Vegetación (V) fue sustituido por el parámetro de Uso del Suelo (U), en el cual se incluye la evaluación de los rasgos urbanos y rurales de un área dada.
- Con la introducción del concepto de Lluvia Crítica (Castellanos, 1996; Castellanos y González, 1997), el parámetro Clima (C) se evalúa con puntaje proporcional al período de retorno de la Lluvia Crítica.
- Los parámetros de evaluación se agruparon en Intrínsecos (M, R, D, V) y en Detonantes (C, S, E, A) según el criterio de los autores de la metodología. Siguiendo a Ramírez (1988) los parámetros se caracterizan con factores que son agrupados según su naturaleza o relación directa con las condiciones características de cada uno de ellos. La suma de los parámetros intrínsecos se denomina índice de Susceptibilidad (IS). Con el reemplazo del parámetro Vegetación (V) por Uso del suelo (U) los parámetros intrínsecos son M, R, D, U y el índice de Susceptibilidad es la suma de éstos.
- Las categorías iniciales de estabilidad de CE se sustituyeron (Gonzalez 2005), aunque pueden servir en algunos casos, cuando no hay datos suficientes para tratamiento estadístico. Los puntos de cada parámetro se manejan estadísticamente para la zona de estudio e igual tratamiento recibe la Calificación de Estabilidad (CE), el cual realmente se cataloga actualmente como un Índice Relativo de Amenaza por Deslizamientos y se clasifica usualmente en cinco categorías, desde amenaza muy baja hasta amenaza muy alta.
- Los estudios para el parámetro de Evidencias de Procesos Antiguos de Inestabilidad (F) se sustituyeron por el Mapa de Procesos de Inestabilidad Actuales y sirve como calibración para el Mapa Final del SES.

Estas modificaciones permitieron a Gonzalez (2006) presentar las ecuaciones desarrolladas para la aplicación de la metodología SES en un entorno SIG para la Zonificación de Amenazas por Deslizamientos en zona rural de Villavicencio (Ingeominas, 2001-2003) y la forma de generalizar un poco más el método para su aplicación a otras áreas o proyectos.



❑ **Algunas Reflexiones sobre los Métodos Heurísticos**

La metodología SES como se mencionó con anterioridad es en esencia un sistema heurístico de evaluación de estabilidad de taludes. En este sentido Gonzalez (2005) realiza los siguientes comentarios en relación con este tipo de métodos heurísticos, aclarando que ya han sido esbozados.

- Normalmente los métodos heurísticos son desarrollados cada uno para un ambiente físico-geológico y ambiental específico. Por esta razón, su uso, en especial por los puntajes, en ambientes similares puede eventualmente ser efectivo, pero en ambientes diferentes puede llevar a errores al aplicarlos indiscriminadamente.
- En un resumen hecho por Díaz (2004) acerca de la metodología de Mora y Vahrson (1994), Díaz siempre habla de valoraciones y clasificaciones “originales”, dado que dentro del trabajo realizado por este autor, en el cual utiliza la metodología SES para zonificar la amenaza por PRM en zona rural de Villavicencio, hubo necesidad de modificar algunas de estas valoraciones y clasificaciones.
- La necesidad de hacer modificaciones en los métodos heurísticos para que sean ajustados a ambientes y condiciones específicas es una de las razones por las cuales hay tantos métodos de este tipo y es muy difícil unificarlos. Es decir, aparentemente no es posible un método heurístico con aplicación universal.
- De todas maneras, estos métodos no ofrecen probabilidades de ocurrencia de deslizamientos y menos de amenaza propiamente dicha, sino solamente evaluaciones y zonificaciones de posibilidades de deslizamientos. Sin embargo usualmente se les denomina de “amenaza relativa” y ésta se califica cualitativamente.
- Por todo lo comentado, al aplicar éstos métodos siempre es INDISPENSABLE la calibración con los inventarios de deslizamientos.

2.3. Algunos Antecedentes de la Aplicación de la Metodología SES

A continuación se citan algunos antecedentes generales que evidencian la aplicación de la Metodología del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) en estudios de consultoría del ámbito nacional y en trabajos de índole académico que se han desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), enfocados en realizar la evaluación de la amenaza a los procesos de remoción en masa (PRM) en diversos sitios de la geografía colombiana.

2.3.1. Estudio en Útica, Cundinamarca (Gonzalez 1992)

A través de la metodología SES combinada con la metodología de Taludes Naturales (MTN) desarrollada por el Ingeniero colombiano Tomás Shuk Erdos se realizó la "*Evaluación de Amenazas y Riesgos por Avalanchas en Utica - Cundinamarca*" liderada por el Ingeniero Álvaro Jaime Gonzalez García (1992).



❑ **Antecedentes en Útica**

El día 17 de Noviembre de 1998, dentro de un intenso período lluvioso que azotó a gran parte de Colombia, una avalancha de detritos bajó por la Quebrada Negra afectando el área urbana de la población de Útica (Cundinamarca), ocasionando la pérdida de algunas vidas humanas y causando daños materiales en el municipio. El incremento de caudal de la Quebrada se originó en los materiales aportados por sus afluentes, y en la fecha en mención en especial por la Quebrada La Papaya. Estudios de las lluvias de la zona, indican que en esa época y a diferencia de la tendencia normal usual, el núcleo de las precipitaciones más altas incluyó la zona baja de la Quebrada Negra, en el sector de la Quebrada La Papaya y el municipio de Útica. Así, en el período lluvioso comprendido entre Octubre y Noviembre de 1988 cayeron 470 mm en Útica, valor elevado de precipitación que corresponde a la lluvia máxima estimada de una vez en 50 años. De esta forma, el afluente más afectado por la alta precipitación fue la Quebrada La Papaya y su microcuenca, en la cual se hallaron indicios de que se inestabilizaron múltiples depósitos no consolidados, ocasionándose deslizamientos que la represaron temporalmente. Estas presas temporales embalsaron gran cantidad de caudal líquido y sólido, el cual al ocurrir la ruptura del obstáculo temporal se encauzó por la Quebrada Negra y llegó hasta la desembocadura, afectando Útica (Forero-Dueñas 1991).

Adicionalmente, en la misma época, entre el 20 y el 21 de Noviembre de 1988, un gran deslizamiento se presentó en el Km 130 del Ferrocarril, 5 Km arriba de Útica en la margen izquierda del Río Negro. Este movimiento en masa dañó la vía férrea, represó temporalmente el Río Negro, pero no afectó la zona urbana de Útica. Gonzalez (1989) llamó a este movimiento en masa "Deslizamiento de Santa Bárbara", el cual ocurrió en materiales coluviales antiguos, subyacidos por una estructura sinclinal fallada transversalmente y conformada por lutitas, limolitas y areniscas. Este deslizamiento en su momento afectó por lo menos 50 hectáreas de terreno, presentó un espesor medio entre 10 y 15 m y una masa en movimiento o susceptible de hacerlo del orden de 3,5 millones de metros cúbicos. En general este movimiento en masa clasifica como complejo (Varnes 1978) pues en la parte media y alta se generaron deslizamientos retrogresivos (rotacional y traslacional), mientras que en la parte baja se presentaron flujos de detritos estabilizados temporalmente.

❑ **Amenaza por PRM en Útica**

El estudio de Gonzalez (1992) tiene entre sus principales insumos el informe de Consultoría en Geotecnia, Hidrología e Hidráulica para el Estudio de Amenazas y Obras Alternativas de Protección para Útica, a nivel de Prefactibilidad, elaborado por la firma AGC Ltda. (1991) para Ingeominas. Este estudio presenta una evaluación de los eventos detonantes de las avalanchas, zonificación de estabilidad de las cuencas definiendo unidades homogéneas, estimación cualitativa de estabilidad, análisis macrogeotectónico de taludes naturales, análisis cuantitativo probabilístico de estabilidad de laderas, análisis de estabilidad y amenazas en las cuencas de Quebrada Negra y en el deslizamiento de Santa Bárbara, evaluación de vulnerabilidad, eventos límites, evaluación del riesgo nominal por avalancha para el casco urbano de Útica, identificación de obras y medidas en la Quebrada Negra y el Río Negro, recomendaciones de alarmas e instrumentación.

La amenaza por deslizamientos en Útica (González 1992) se evaluó a través de procedimientos cualitativos y mediante el análisis de Taludes Naturales (MTN). En los procedimientos cualitativos se trabajó a una escala de 1:25.000 a nivel de unidades de terreno, se usaron las metodologías de Cortés (1989) y de Ramírez y González (1989) ó



Metodología SES, para calificar categorías de estabilidad que definen las zonas geotécnicamente homogéneas. Así, partiendo de mapas temáticos de topografía, pendientes, densidad de drenaje, geología, morfodinámica, precipitación, temperatura, vegetación, suelos y erosión, se llegaron a visualizar sectores críticos de estabilidad (Ver figura 24).

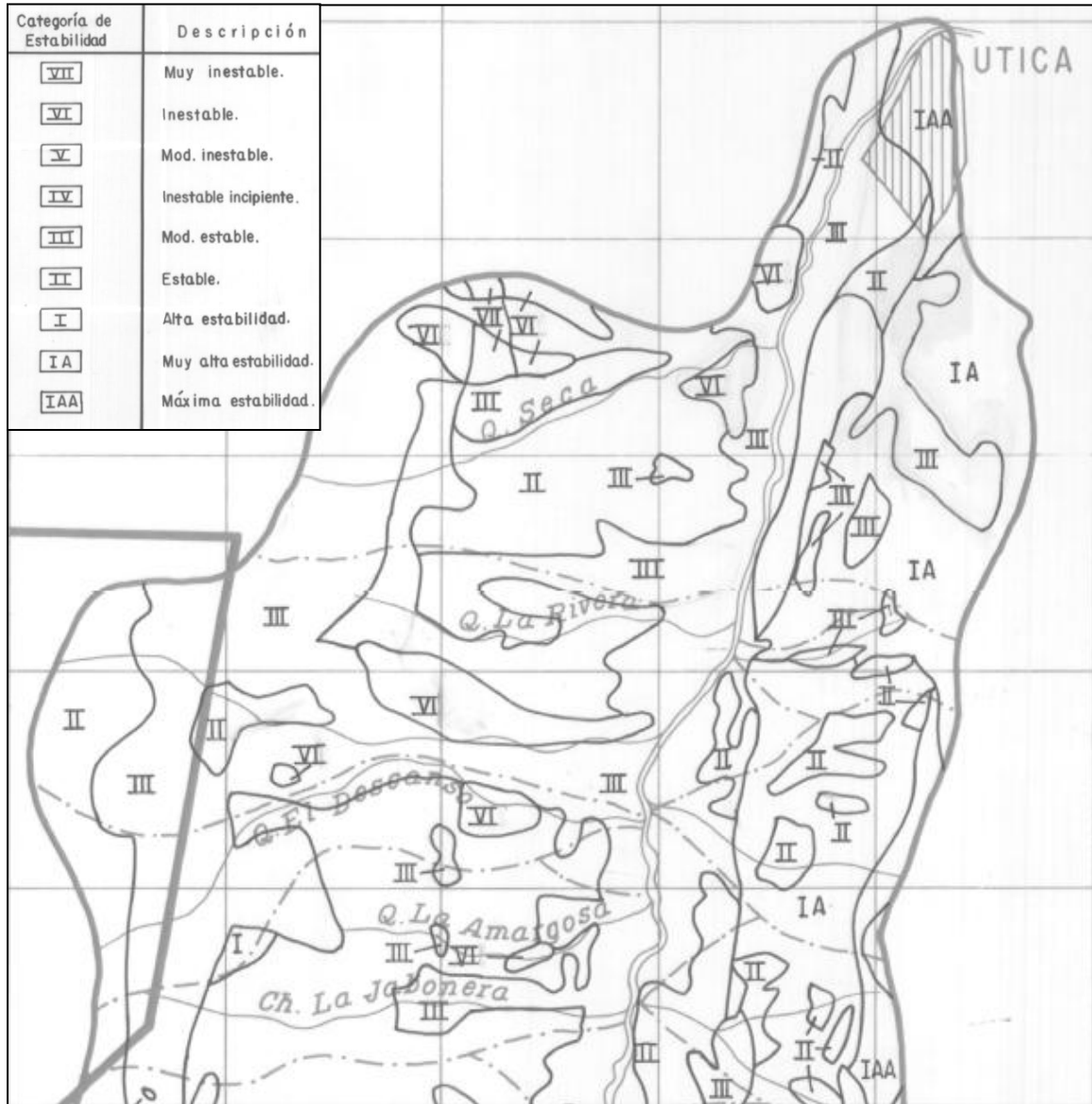


Figura 24. Vista parcial de Mapa de Zonificación Cualitativa de Estabilidad en Útica
Fuente: Tomado de Ingeominas (1991)

Por otra parte, el análisis de Taludes Naturales (MTN) se aplicó por medio de correlaciones complejas entre una serie de envolventes hipotéticas desarrolladas a partir de la envolvente actual. Shuk de manera iterativa dedujo las propiedades geomecánicas y el estado de esfuerzos de los materiales térreos. El método fue calibrado comparándolo con ensayos de laboratorio; en este estudio se confrontó con resultados del deslizamiento de Santa Bárbara, obteniéndose una buena aproximación. Posteriormente se escogieron 126 familias de laderas naturales, aplicando la MTN y dando atención a los



sitios ya definidos cualitativamente como más inestables. Se obtuvieron resultados de condiciones de presurización, parámetros de presión de poros y ángulo de fricción, en los distintos materiales geológicos. Con los datos obtenidos de la MTN se calcularon los factores de seguridad y las probabilidades de falla para las 126 familias de laderas naturales. Se hicieron análisis para períodos de diseño en condición de tiempo geológico (38,936 años), largo plazo (16,164 años) y corto plazo (se adoptó 4,2 años por ser el pico anual de lluvias evaluado). Igualmente se hicieron los análisis incluyendo lluvia y sismo, y el cálculo de la probabilidad total de deslizamientos.

Finalmente, una vez cuantificada la amenaza, se realizó una evaluación aproximada de la vulnerabilidad (nominal) considerándola como el grado de exposición del municipio de Útica a los diferentes eventos catastróficos y se expresó en cada caso como el valor del porcentaje afectado del área del casco urbano de Útica. Al evaluar la vulnerabilidad, se pudo estimar el riesgo nominal material, en pesos, calculado como el producto de la probabilidad de ocurrencia del evento considerado, por la vulnerabilidad en área. No se consideró la pérdida de vidas humanas en razón de los planes de contingencia, ni el costo de la inactividad de los habitantes en caso de un evento catastrófico.

En la actualidad la quebrada Negra (ó La Negra) y sus afluentes se caracterizan por el alto potencial para arrastrar de manera continua rocas y materiales depositados en sus lechos, así como aquellos materiales producto de los movimientos en masa que en ocasiones obstruyen sus cauces. Es así como la quebrada se constituye en la vía principal donde confluyen los caudales líquidos y sólidos provenientes de la vertiente (Ingeominas 2009).



Figura 25. Vista parcial reciente de flujos de detritos en cercanías a Útica

Fuente: Tomado de Ingeominas (2009)

Actualmente, la cuenca está intervenida principalmente con cultivos de caña de azúcar, los cuales contribuyen continuamente a la degradación de la roca parental y al movimiento de los suelos en la superficie, debido a que geológicamente estos suelos son susceptibles al movimiento, dado su elevado fracturamiento y disposición, ya que en muchos casos es paralela a la pendiente de la ladera. Adicionalmente la acción del agua por escurrimiento e infiltración produce el arrastre de materiales en la corriente principal y genera movimientos en masa simples o complejos. Muchos de estos movimientos son



consecuencia de la acción erosiva del agua en la base de las laderas, así como su propagación retrogresiva en la ladera en búsqueda de la condición de equilibrio. Los eventos de creciente hidrológica en la cuenca en combinación con eventuales represamientos de los cauces, generan constantemente flujos que degradan la cuenca y modifican las condiciones del abanico aluvial donde se encuentra Útica (ver figura 25), tal como se ha identificado en los diferentes estudios y en el inventario de procesos actuales (Ingeominas 2009).

2.3.2. Tesis de Maestría de Barboza (1996)

El trabajo de tesis titulado "*Zonificación Geotecnia y Análisis de Susceptibilidad a los Fenómenos Naturales en el Casco Urbano de Cartagena*" presenta la caracterización geotécnica del casco urbano de Cartagena (Área aproximada de 96 km²) a escala 1:10000 y se define el uso más adecuado del terreno con base en sus características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas. Se llevó a cabo un análisis de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa (PRM) utilizando los lineamientos de la metodología SES a partir para estimar semi-cuantitativamente las zonas de susceptibilidad alta, media y baja. Se determinó que el casco urbano de la ciudad de Cartagena está sujeto a problemas de suelos expansivos y por las características de los suelos granulares (condición saturada y estado suelto) pueden ser susceptibles a presentar problemas de licuación, razón por la cual se realizó una evaluación preliminar del potencial de expansión y licuación de los mismos. La totalidad de la información base es tomada de Ingeominas. A continuación se presenta una síntesis del trabajo de tesis de Barboza (1996), extraída en cierta medida de un artículo científico de Barboza y Carvajal (2006).

□ Zonificación geotécnica de Cartagena

Para la elaboración de la caracterización geotécnica de Cartagena se tuvo en cuenta las características geológicas y propiedades índices y geomecánicas de los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo de Cartagena. La información geotécnica fue suministrada por entidades locales especializadas en geotecnia y el resultado de los análisis de laboratorio hechos por Ingeominas. Posteriormente la información geotécnica fue recopilada y organizada y se delimitaron con base en las características geológicas, zonas relativamente homogéneas con propiedades físico-mecánicas similares y la elaboración de perfiles estratigráficos típicos en cada zona. Además se realizó un análisis estadístico de frecuencia de las propiedades índices y geomecánicas.

La profundidad de exploración de los sondeos recopilados fue muy variable, pues en aquellas zonas cercanas al área costera donde se habían construido edificaciones de más de cuatro niveles se obtuvieron sondeos entre 20 y 46 metros de profundidad, mientras en el resto del área de estudio la profundidad de exploración varió entre 5 y 10 m y en los casos cuando el sistema de exploración era por medio de apiques y trincheras entre 1,0 y 2,0 m.

En el casco urbano de Cartagena se identificaron seis (6) zonas con características geotécnicas similares, las cuales se muestran en la figura 26.

Zona I: Geológicamente corresponde a los depósitos cuaternarios de origen marinos de tipo playas y playones que constituyen las barras y espigas donde actualmente se encuentran los barrios Castillogrande, Bocagrande, El laguito, Centro amurallado, El



Cabrero, Marbella, Crespo, La Boquilla, Manga y parte del Píe de la Popa, Bosque y Albornoz. Esta zona se divide en dos subzonas (una de origen antrópico y una natural). Se constituye predominantemente por material granular tipo arena limosa con fragmentos de calizas arrecifales (caracolejos) y gravas, en algunos sectores entre 2 y 3 m de profundidad se encuentra una capa de sustrato de mangle en descomposición muy compresible.

El espesor de este material granular fluctúa entre 8 - 35 m ubicándose los de mayor espesor en el sector del Laguito-Castillogrande y disminuyendo hacia el Cerro de La Popa. Con base en los ensayos de penetración estándar recopilados, en el sector del Laguito las compacidades son de suelta a muy suelta, mientras en los sectores de Crespo y sector amurallado las arenas son compactas a muy compactas; tal situación confiere al subsuelo del Laguito y parte oriental de la isla de Manga, una alta susceptibilidad a la licuación.

Subyaciendo este estrato arenoso se detecta una arcilla gris verdosa de mediana a alta plasticidad, de consistencia media a firme. Las fluctuaciones del nivel freático en esta zona están entre 0,8 y 1,5 m.

Zona II: Geológicamente corresponde a depósitos cuaternarios de origen marino-aluviales constituida por acumulaciones predominantemente arcillosas de colores pardo y negro con lentes arenosos, producto de la interacción de procesos marinos y aluviales antiguos. Constituyen las extensas llanuras costeras presentes al oriente y sureste de la Ciénaga de Tesca y al sureste del cerro de albornoz.

El perfil estratigráfico típico de esta zona, muestra superficialmente rellenos constituidos por restos de escombros, desechos de basuras hasta 0,8 y 1,0 m de profundidad aproximadamente.

Subyaciendo este relleno se encuentra una arcilla limosa gris oscura muy blanda con presencia, en algunos sondeos, de mangle en descomposición. De los 6 a 8 m de profundidad aparece una arcilla limosa habana clara con vetas grises de consistencia dura a muy dura, y se extiende hasta la profundidad máxima de exploración obtenida en los sondeos recopilados (10 m).

Las características geotécnicas de las arcillas limosas blandas encontradas típicamente en esta zona presentan números de golpes por pie de penetración (SPT) entre 2 y 5, pesos unitarios húmedos y secos entre 1,4 y 1,8 T/m³ y 0,9 y 1,1 T/m³ respectivamente, índices de plasticidad entre 5% y 23% y porcentaje de finos 48% y 94%. La humedad natural se incrementa con la profundidad, entre el 10% y el 40%.

La fluctuación del nivel freático en la zona II, está entre el 0,8 y 1,2 m y se encuentra regulada por el ascenso de la marea de la Ciénaga de Tesca o la Virgen

Zona III: Corresponde geológicamente a las arcillas productos de la meteorización de la Unidad Detrítica de la Popa, como de los depósitos aluviales y marinos derivados de este mismo conjunto rocoso. Las primeras son de consistencia muy firme a dura, pero con evidencias de poseer características expansivas de moderada alta, y las segundas son de consistencias de firme a muy firme con potencial expansivo alto, debido a la alta concentración de vermiculita en la composición de las mismas.

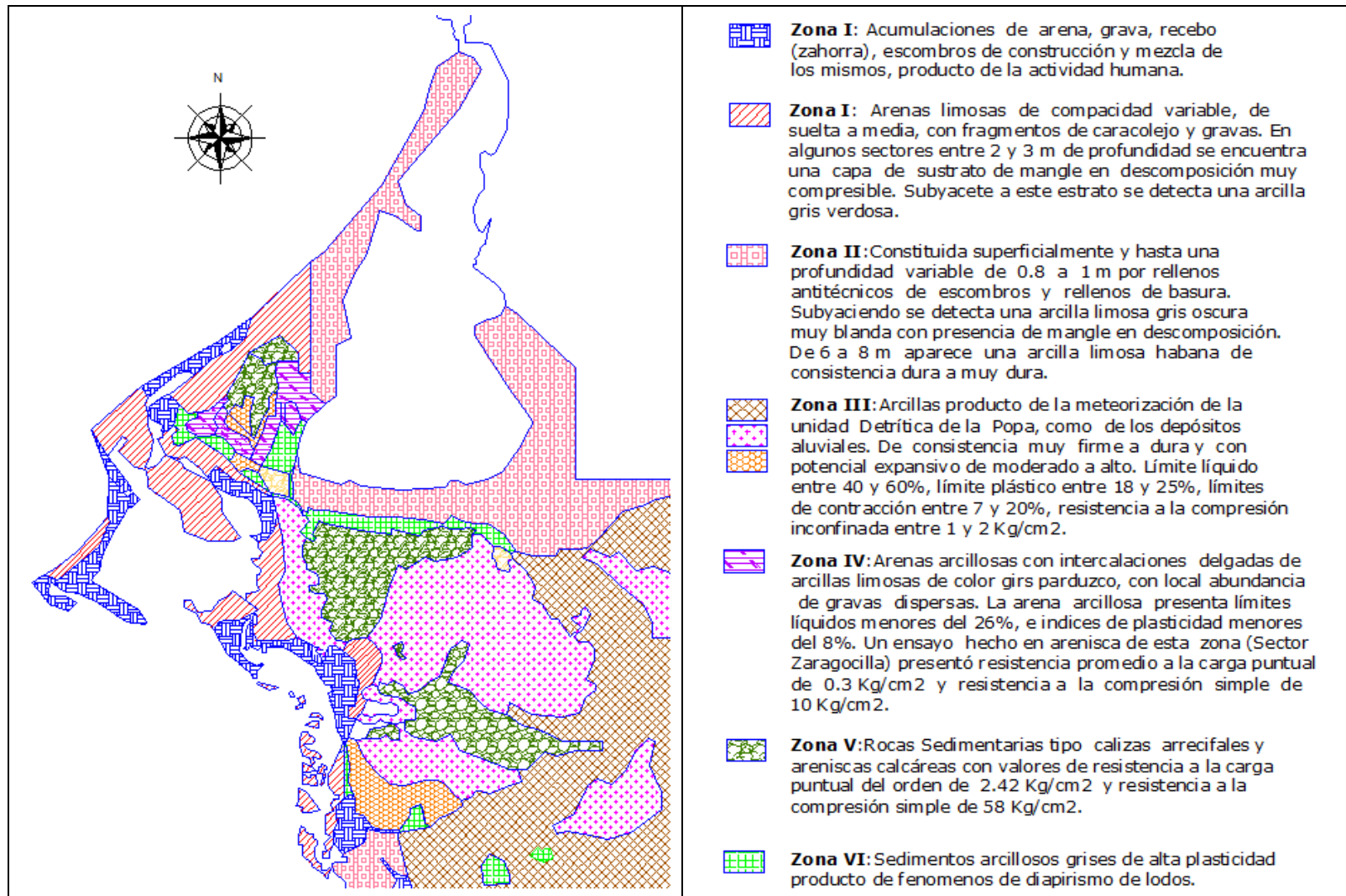


Figura 26. Mapa de Zonificación Geotécnica de Cartagena
Fuente: Tomado de Barboza (1996) y editado por Aguilar-Collazo (2014)



Las propiedades índices y geomecánicas varían de la siguiente manera: Límite líquido entre el 40% y 60%, límite plástico entre el 18% y 25%, límite de contracción entre el 7% y 20%, resistencia a la compresión inconfiada entre 1 y 2 kg/cm². En general esta zona se divide en tres subzonas, que son detalladas en estudios más recientes.

Zona IV: Geológicamente corresponde al conjunto intermedio de la Unidad Detrítica de la formación Popa cuya constitución es predominantemente areno-arcillosa con intercalaciones delgadas (5 y 20 cm), de arcilla limosa de colores grises parduzcos, con local abundancia de gravas dispersas en el conjunto, especialmente en los sectores de los Calamares, Camaguey y los Almendros.

La arena arcillosa presenta límites líquidos menores del 26%, e índices de plasticidad menores del 8%. Un ensayo hecho en arenisca de esta zona (Sector Zaragocilla) presentó resistencia promedio a la carga puntual de 0,3 Kg/cm² y resistencia a la compresión simple de 10 Kg/cm². Según la clasificación de Deere and Miller corresponde a una roca muy blanda, lo cual puede deberse al carácter deleznable de la roca.

Zona V: Geológicamente corresponde a los conjuntos superior e inferior de la Unidad Calcárea de la formación La Popa, donde prevalecen las calizas arrecifales y las areniscas calcáreas. Se presentan en las zonas elevadas de Cartagena conformando las colinas con escarpes verticales de 20 a 25 m de altura.

El conocimiento de las propiedades geomecánicas de esta unidad es mínimo; sin embargo estas rocas son blandas a duras dependiendo del grado de meteorización y porosidad primaria o secundaria de las mismas. Un análisis de carga puntual en una muestra de calizas del cerro La Popa dio un valor de 2,42 kg/cm², mientras la resistencia a la compresión simple dio un valor de 58.1 kg/km².

Zona VI: Esta zona corresponde a sedimentos arcillosos grises de alta plasticidad producto de fenómenos de diapirismo de lodos. Estos fenómenos se manifiestan en la conformación cómica de los cerros que circundan la ciudad de Cartagena, al igual que las manifestaciones actuales de “volcanes de lodo” en el sector suroriental del casco urbano de la ciudad.

❑ Susceptibilidad a los fenómenos naturales de Cartagena

Las amenazas geológicas en Cartagena son inherentes tanto a las características del medio físico natural donde la ciudad se encuentra ubicada, como a la acción antrópica de los pobladores por adaptar el terreno para la vivienda y la industria. El factor más influyente en la morfología actual de Cartagena lo constituye el diapirismo de lodos, fenómeno de carácter regional generado por la existencia de material arcilloso de características plásticas enterrado en profundidad y que tiende a subir a superficie por efecto, entre otros factores, de su contenido de gas metano.

Al mencionado fenómeno se debe la conformación de las lomas y colinas de la ciudad, y localmente la presencia de volcanes de lodo en el sudeste de la ciudad. Igualmente las amenazas naturales de la ciudad se relacionan con las características friables (sueltas) de las rocas, que son fácilmente erodables y la ubicación de gran parte de la ciudad en zonas bajas, relacionadas con terrenos de origen marino que fácilmente pueden ser erodados o inundados por la acción del oleaje actual.



El territorio de la ciudad de Cartagena es susceptible a la inundación, procesos de remoción en masa (PRM) y erosión costera (figura 27). Así mismo, localmente el terreno es susceptible al fenómeno de los “Volcanes de lodo”, al igual que a la presencia de suelos con características expansivas y de licuación que es importante conocer para planificar el desarrollo de la ciudad.

Susceptibilidad a los PRM: La ciudad de Cartagena, se encuentra localizada sobre rocas y suelos muy susceptibles a los procesos erosivos relacionados con la escorrentía superficial, el mar y el viento. Tal situación se hace evidente especialmente en el Cerro de la Popa, donde el fuerte carcavamiento de las laderas ha generado la formación de cañones profundos de paredes localmente verticales, particularmente en el flanco sur, occidental y oriental del mismo.

Adicionalmente la colonización de las laderas, colinas y lomas ha agudizado el problema por la alteración del drenaje natural y la deforestación. Este último factor es notorio en la época de verano, cuando las laderas especialmente en el Cerro de la Popa quedan desprovistas de la vegetación herbácea que vuelve a reverdecer en el invierno. Las condiciones planteadas han determinado un incremento significativo en las amenazas potenciales por PRM, asociados a las colinas que se erigen en el sector de la Popa, Loma del Marión y Cerro de Albornoz principalmente.

Para la evaluación de la susceptibilidad a los PRM, se tuvieron en cuenta factores topográficos y morfométricos, geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, antrópicos y uso del suelo, cuya ponderación lineal a través de un proceso iterativo, tiene en cuenta tanto la importancia intrínseca del factor considerado en la estabilidad, así como la capacidad para reflejar la inestabilidad observada en campo. Con base en el análisis de la información obtenida siguiendo la metodología SES se determinaron tres rangos de susceptibilidad al deslizamiento: Alta, Moderada y Baja.

La susceptibilidad alta a los PRM en Cartagena está asociada a las laderas con pendientes mayores de 20° afectadas por movimientos en masa recientes, o antiguos con susceptibilidad de ser reactivados. Predominan las rocas de constitución arcillosa, localmente cubiertos por depósitos de coluvión, con discontinuidades en favor de la pendiente. Adicionalmente la erosión en estos sectores es intensa con carcavamiento intenso, y la actividad antrópica es acentuada y no favorable para la estabilidad de la ladera. Los sectores más afectados corresponden al costado suroriental, suroccidental y sur del Cerro de la Popa, Loma del Marión (sector Manzanares) y el Cerro Albornoz, sector sur. El sitio más representativo se presenta en el barrio Nuevo Bosque sector Manzanares, donde se ha presentado un deslizamiento tipo rotacional que inició su movimiento en noviembre de 1993 y se reactivó en diciembre de 1994 y agosto de 1995.

La susceptibilidad moderada a los PRM en Cartagena se presenta en las laderas con pendientes entre 10° y 20° afectadas o no movimientos en masa, en general caídas de bloques o detritos. En las laderas predominan las rocas arcillosas con discontinuidades estructurales en contra o en favor de la pendiente pero en bajo ángulo. La erosión es intensa en surcos y cárcavas y la actividad antrópica es alta a moderada. En esta categoría se encuentran el sector nororiental, oeste y suroeste del cerro de la Popa en los barrios San Francisco, La Esperanza, La Paz, Nariño, Kennedy y localmente el barrio Papayal. En la Loma del Marión se encuentran los barrios Andalucía, Nueve de Abril y Las Brisas. Igualmente se encuentran en este rango el sector norte y noroeste del basurero de Henequén y el sector occidental del cerro Albornoz.



La susceptibilidad baja al deslizamiento está relacionada con las laderas con pendientes entre 7-10° cuyas discontinuidades se encuentran en contra de la pendiente de terreno o en favor en bajo ángulo. Se presentan en calizas y localmente en arcillolitas donde se pueden evidenciar fenómenos de reptación de los suelos.

Susceptibilidad al fenómeno de Volcanismo de lodos: Este fenómeno definido en general como la intrusión de material sedimentario localizado en profundidad, en rocas o sedimentos más jóvenes, se manifiesta en la ciudad con la formación de domos o abobamientos representados en los actuales cerros de la Popa, Loma del Marión y Cerro de Albornoz, éste último considerado un paleoatolón por Ángel et al. (1985). Del mismo modo se evidencia con la presencia de “volcanes de lodo”, particularmente en el sector suroriental del área de estudio, cerca a la sede de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La amenaza de los “volcanes de lodo” está asociada principalmente con la generación de flujos de lodo que se presentan de manera súbita y violenta. Se pueden generar incendios por la emanación brusca de gas metano, además del fracturamiento del terreno 500 a 700 m a la redonda de la boca que hace explosión. De hecho en el sector de la sede de la Universidad Tecnológica de Bolívar se han localizado zonas quemadas que evidencian actividad del fenómeno (Franco 1996).

Susceptibilidad a la licuación: La zona I definida en la caracterización geotécnica (arenas limosas) presenta evidencia de ser susceptible a los procesos de licuación. Los terrenos granulares asociados a depósitos de playón e intermareales, son los suelos más susceptibles a fenómenos de licuación. Aplicando la metodología propuesta en Seed et al. (1985) en SNPA (1993) y Fernández (1992) y teniendo en cuenta la sismicidad catalogada como baja en el área de estudio, con una aceleración sísmica de 0.10g, preliminarmente se definieron tres rangos de susceptibilidad a licuación: Alta, Moderada y Baja.

Se determinaron como zonas con susceptibilidad alta a la licuación de suelos, los terrenos arenosos con porcentaje de finos menor del 5%, número de golpes por pie de penetración (N_{SPT}) es menor de 5, coeficiente de uniformidad (C_u) entre 2 -5 y el nivel freático a profundidades menores de 1 m. Los suelos con estas características se presentan en el Laguito, Pie de la Popa y la parte centro-norte de la Isla de Manga. La susceptibilidad moderada a la licuación de suelos se presenta en lugares donde los suelos granulares presentan porcentajes de finos de 5-10%, N_{SPT} está entre 5 y 10 y nivel freático se encuentra entre 1 y 2 m de profundidad. Preliminarmente se clasificaron en este rango los sectores de Bocagrande, Marbella, El Cabrero, La Boquilla y la parte noroccidental de la Isla de Manga.

La susceptibilidad baja a la licuación se definió para subsuelos con porcentajes de finos mayores del 10%, densidades relativas mayores del 80%, N_{SPT} mayor de 10 y nivel freático a profundidades mayores de 2 m. Estos terrenos se presentan en Crespo, Centro, Isla de Manzanillo y parte suroriental de la Isla de Manga.

Potencial de Expansión de Suelos: El hecho de encontrarse Cartagena de Indias en un terreno donde predominan las arcillas vermiculitas y montmorillonita (aproximadamente el 70% del territorio), determina que el terreno sea susceptible a fenómenos de expansividad. Aplicando la metodología de Seed et al. (1962), Charlie et al. (1984) y Lambe (1960) en Beltrán et al. (1992), se definieron tres rangos de susceptibilidad: Alto, Moderado y Bajo.



Como potencial de expansión alto se categorizaron los suelos arcillosos con límites líquidos mayores del 50%, límites de contracción superiores al 12%, índices de plasticidad mayor del 30%, potencial de expansión (S), método de Seed 1962, mayor de 5 y valores del “Cambio Potencial Volumétrico” (PVC) superiores a 4, donde se han presentado presiones de expansión mayores de 20 T/m². Terrenos con estas características se presentan en los sectores oriental y suroriental de la ciénaga de Tesca y al sur del área de estudio en barrios como Simón Bolívar, Policarpa, San José de los Cámpanos, El Rodeo y en las inmediaciones de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

El potencial de expansión moderado está definido en terrenos donde los límites líquidos varían entre el 30% y el 50%, límites de contracción entre el 7% y el 12%, los índices de plasticidad oscilan entre 15% y 30% y potencial de expansión (S) entre 1,5 y 5. Igualmente las presiones de expansión de estas arcillas oscilan entre 5 y 25 T/m². Terrenos con estas características se presentan al sur de la ciénaga de Tesca, en los barrios Nuevo Bosque, Buenos Aires y República de Venezuela.

El potencial de expansión bajo se define para terrenos arcillosos con índices de plasticidad menor del 18%, límites líquidos menor del 30%, límites de contracción menor del 7%, índices de plasticidad menor del 15%, potenciales de expansión menores de 1.5 y presiones de expansión menores de 5 T/m². Terrenos con estas características se evidenciaron en el sector suroriental de la ciudad en los barrios Caracoles, El Socorro y San Fernando, entre otros.

Susceptibilidad a la Erosión costera: La ubicación de Cartagena en zonas bajas asociadas a playones, barras-espigas y llanuras intermareales, y la constitución suelta de los sedimentos que las conforman, hacen que gran parte de la ciudad sea vulnerable a la erosión costera intensa, especialmente durante los mares de leva, que se constituyen en los fenómenos más nocivos para las playas de Cartagena. Con base en el monitoreo de las playas se definieron tres rangos de susceptibilidad al fenómeno; alta, moderada y baja, las cuales se evidencian como un anillo bordeando el litoral.

La susceptibilidad alta a la erosión costera corresponde a aquellos sectores donde el litoral está expuesto a la acción directa del oleaje del mar. Durante los mares de leva se han presentado retrocesos de la línea de costa mayores de 15 m, con la formación de escarpes de playa mayores de 1 m de altura. Adicionalmente, el grado de saturación del sedimento es alto y las playas no se encuentran protegidas por obras de ingeniería. El sector de playas comprendidas entre La Boquilla y el Centro Recreacional de COMFENALCO presenta susceptibilidad alta.

La susceptibilidad moderada a la erosión costera se presenta entre el Centro Recreacional de COMFENALCO y Castillogrande, incluyendo la parte central de la Isla de Manzanillo. En estos sectores que constituyen el 60% del litoral con playas de Cartagena, aunque las playas se encuentran expuestas directamente al oleaje marino, estas se encuentran protegidas por rompeolas, espolones y malecones.

La susceptibilidad baja a la erosión costera se presenta en la parte interna de la bahía de Cartagena. En este sector el litoral se encuentra protegido del oleaje de mar abierto y este no incide directamente sobre la costa por encontrarse protegido por franjas arrecifales localmente colonizadas por manglar.

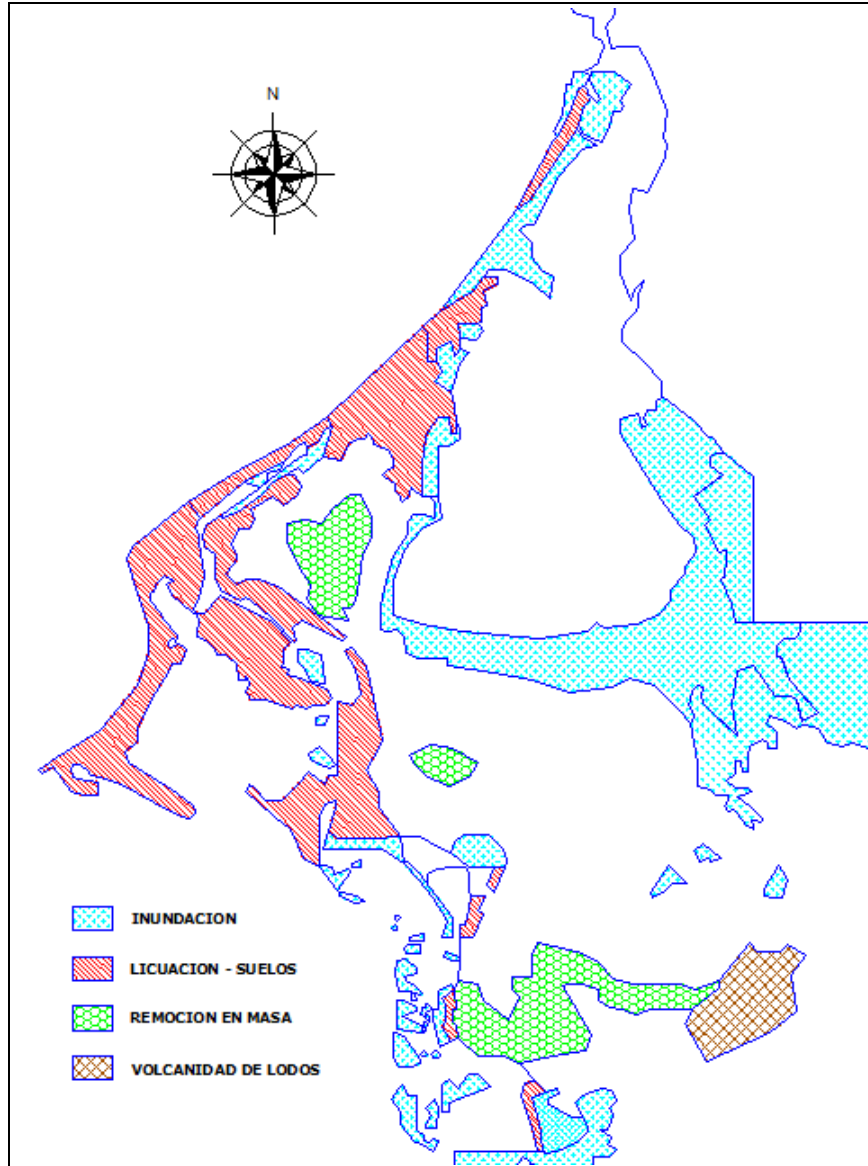


Figura 27. Mapa de Susceptibilidad a los fenómenos naturales de Cartagena
Fuente: Tomado de Barboza (1996) y editado por Aguilar-Collazo (2014)

2.3.3. Tesis de Maestría de Lozano (1996)

El trabajo de tesis titulado "*Evaluación de Susceptibilidad y Amenaza Preliminar en las Localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe, Usme y San Cristóbal, Santafé de Bogotá, D.C.*" fue desarrollado por el Ing. Jairo A. Lozano Guarnizo (1996). Este trabajo tiene como base un estudio de nombre similar liderado por el Departamento Administrativo de Planeación Distrital (DAPD) de Bogotá (1995) en convenio con la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá e Ingeominas, el cual se enmarcó dentro del Plan de Mejoramiento Integral de Ciudad Bolívar y fue ejecutado en dos fases.

En la tesis se presenta un resumen de las características ambientales y los principales problemas geotécnicos encontrados en el área de estudio comprendida por localidades de San Cristóbal, Tunjuelito, Rafael Uribe, Usme y Ciudad Bolívar. La mayoría de los



barrios evaluados se encuentran ubicados en la cuenca media del río Tunjuelito. La tesis se enmarca principalmente dentro de la primera fase del estudio base, comprendido por la Zonificación Geológica y Geotécnica a fenómenos de remoción en masa y evaluación preliminar de amenaza de las áreas preestablecidas.

En el área de estudio se encuentran rocas sedimentarias, cubiertas discordantemente por depósitos de ladera, terrazas aluviales y complejos de conos, presenta diversidad morfológica entre escarpada y plana, disectada por quebradas, caños y zanjones que perfilan valles estrechos con ángulos de confluencia moderados.

El Río Tunjuelito y sus afluentes las quebradas Yomasa, Chiguaza, Zuque, Varejones, De Limas, Bolonia y otros cuerpos menores de agua, principales drenajes en la zona, para esa fecha presentaban alto grado de intervención, erosión, contaminación, deforestación e inestabilidad en sus márgenes. Los fenómenos de remoción en masa en los cuerpos de agua, se ven favorecidos en ese momento por la disposición de botaderos en las márgenes. Aunque los cauces estaban bien definidos, en épocas de lluvias, aumentaban su poder de arrastre activando procesos de inestabilidad y desbordamientos. Las consecuencias de los procesos denudativos tienen mayor repercusión al considerar que las riberas ya se encontraban para esa fecha casi en su totalidad urbanizadas.

La actividad minera (explotación de canteras), para la fecha se realizaba sin tener en cuenta consideraciones ambientales. Los residuos de explotación se disponían en zonas aledañas dando lugar a problemas de inestabilidad y erosión. Los frentes de explotación, abandonados y no recuperados adecuadamente se encontraban ocupados por barrios con infraestructura deficiente, o sin ella, se convertían en franjas de permanente amenaza, donde eran frecuentes los fenómenos de erosión y remoción en masa, como caídas de bloques, fallas en cuña y deslizamientos traslacionales.

La evaluación macrogeotécnica de estabilidad y el análisis de susceptibilidad inicial en un amplio sector del sur de la ciudad de Santafé de Bogotá se llevó a cabo a través de una aplicación continuada de los trabajos de evaluación de estabilidad y zonificación semicuantitativa a escala intermedia presentados por Ramírez (1988), Cortés (1989), Ramírez y González (1989), González (1990a y b), complementados con la Metodología de Taludes Naturales (MTN), propuesta por el Ingeniero Tomas Shuk y el uso de los sistemas de información geográfica (ARC/AD).

De acuerdo con González (1990a), la conceptualización de susceptibilidad en el caso de deslizamientos está controlada por factores intrínsecos (materiales, topografía, estado de esfuerzos, condiciones de drenaje, cobertura vegetal), mientras los eventos detonantes pueden considerarse externos (lluvias, sismos, excavación por erosión, socavación, obras, etc). Se evaluaron nueve (9) parámetros a saber: Geología, Geomorfología (relieve), Drenaje (densidad de drenaje y pendiente media de cauces), Cobertura y Uso del suelo, Erosión, Clima (precipitación), Sismicidad, Evidencias de Inestabilidad y Factor Antrópico. Con base en la información básica de los cuatro primeros tópicos se delimitaron semicuantitativamente Zonas Homogéneas de Susceptibilidad, empleando la metodología de Ramírez (1988), para obtener como resultado intermedio mapas de Susceptibilidad Preliminar. Finalmente, los agentes detonantes (Erosión, Clima, Sismicidad y Factor Antrópico) y la evaluación morfológica de estabilidad, mediciones de poblaciones de taludes naturales (H, L), superpuestos a la evaluación de susceptibilidad permitieron establecer una zonificación preliminar de amenaza (ver figura 28).

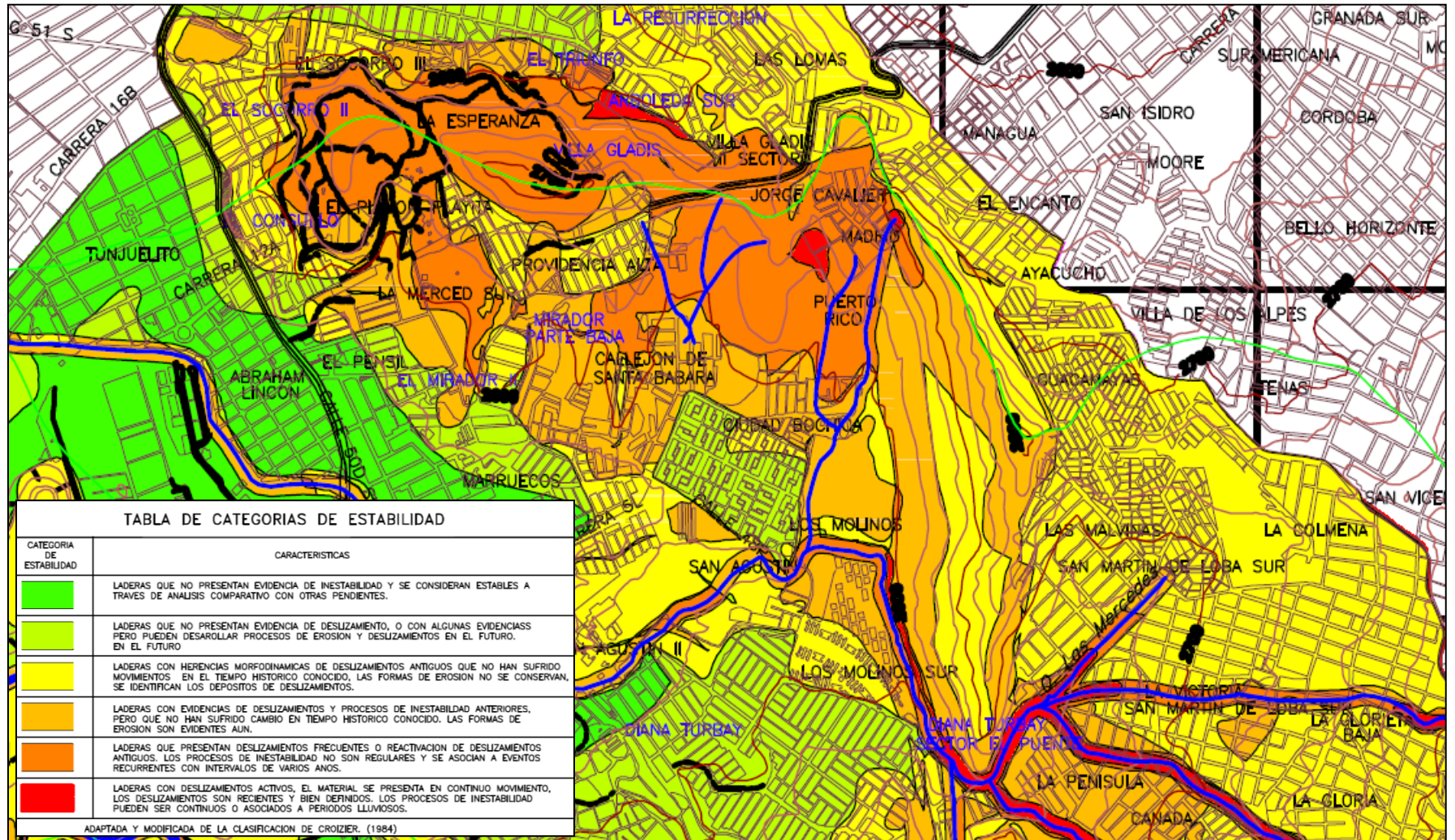


Figura 28. Vista parcial de Mapa preliminar de Amenaza de Sector sur de Bogotá

Fuente: Ingeominas - DAPD (1995)



2.3.4. Estudio en Bogotá D.C. (Gonzalez y Millan 1999)

A finales de la década de los 90's, la ciudad de Santafé de Bogotá, se propuso elaborar mapas de zonificación en términos de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa, con el fin de fortalecer y mejorar las medidas y acciones tendientes a elevar la calidad de la vida de la comunidad. En este contexto la oficina de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, UPES, encomendó a la firma colombiana de ingeniería INGEOCIM Ltda. el estudio de zonificación de riesgos por inestabilidad del terreno de las laderas de la ciudad, a escala 1:10.000. Posteriormente González y Millán (1999a y b) presentaron algunos resultados de este estudio en el XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CPMSIF) realizado en Foz de Iguazú, Brasil.

De acuerdo con los propósitos del estudio (INGEOCIM-UPES 1998), la disponibilidad de información básica y temática y especialmente la de recursos financieros y de tiempo, se establecieron los alcances del proyecto y se definieron como modelos de evaluación de la amenaza: (a) la metodología SES propuesta por Ramírez y González (1989) (cruce semicuantitativo de mapas), la cual expresa la amenaza en términos de posibilidad semicuantitativa de ocurrencia de movimientos en masa y (b) la Metodología de Taludes Naturales, MTN, de Shuk (1968, 1990) con la cual se pueden obtener probabilidades de falla de las laderas naturales, a corto, mediano y largo plazo y además parámetros geomecánicos deducidos.

Es importante mencionar que en la metodología SES, la adecuación del modelo de evaluación para su aplicación en un área urbana se refiere a la inclusión del factor antrópico como factor que contribuye en la inestabilidad de una ladera. Al respecto se tomó como lineamiento el trabajo de Amenaza Preliminar de un Sector Sur de Santafé de Bogotá, realizado por Ingeominas y DAPD (1995) y presentado por Lozano (1996) en su trabajo de tesis.

La evaluación de la precisión de los mapas que se generaron se realizó mediante la comparación de las zonas de amenaza con el inventario de fenómenos de remoción en masa cartografiados y la contrastación de los mapas obtenidos mediante la MTN y el SES. La del inventario se basa en la hipótesis de que los deslizamientos tengan lugar en laderas que han sufrido fenómenos de remoción en masa.

El desarrollo del estudio de amenaza y riesgo se basó en la propuesta metodológica de González (1990a y b), pero por las usuales restricciones de tiempo y presupuesto no fue posible desarrollar todos los aspectos de la evaluación con la máxima profundidad. Por lo tanto se hizo énfasis en aquellos aspectos que se consideraron indispensables para la evaluación de la amenaza. Las etapas seguidas se pueden resumir en:

Identificación: Recopilación y análisis de información disponible (técnica y cartográfica), Identificación preliminar general del riesgo actual e identificación de medidas urgentes preventivas y correctivas.

Implementación del modelo de evaluación: Delimitación del área de estudio, Cartografía (cartografía base y fotografías aéreas) y Diseño de la aplicación de los modelos de evaluación (Definición de las variables por evaluar, adecuación de la evaluación al área urbana, implementación de las variables para ser manejadas por medio del SIG, modelación, calibración de los modelos y elaboración mapa final de amenaza)



Evaluación de factores internos: Geología, Geomorfología, Cobertura y uso actual del suelo y Caracterización geotécnica de los materiales (Recopilación de información secundaria, investigación del subsuelo, ensayos de laboratorio y obtención de propiedades de materiales con Evaluación Morfológica de Taludes, MTN).

Evaluación de agentes detonantes: Climatología e Hidrología (localización y fisiografía, Isoyetas anuales y lluvias críticas), Amenaza sísmica, Erosión natural y Efectos antrópicos (Deforestación, construcción de rellenos, excavación por explotaciones u obras y descarga de efluentes).

Evaluación de amenaza por movimientos en masa: (a) Obtención del Mapa de Amenaza Relativa por Fenómenos de Remoción en Masa con la metodología SES de Ramírez y González (1989), (b) Obtención del Mapa de Amenaza Relativa por Fenómenos de Remoción en Masa con la Metodología de Taludes Naturales (MTN), (c) Obtención del Mapa de Procesos Actuales (proceso intermedio del estudio), (d) Contrastación de los mapas de amenaza de SES y MTN, (e) Contrastación de los mapas de amenaza de SES y MTN, ya contrastados entre sí, con el Mapa de Procesos Actuales y (f) Obtención del Mapa final de Amenaza.

Una vez obtenidos los Mapas de Amenaza Relativa por los métodos SES y MTN, cada uno con cinco (5) categorías de amenaza y el Mapa de Procesos, se realizaron las siguientes actividades:

- Contrastación visual entre cada uno de los mapas de amenaza (SES vs Procesos, MTN vs Procesos, SES vs MTN).
- Elaboración de varios modelos de superposición y contrastación, con diferentes niveles de conservatismo y/o preponderancia de los métodos y escogencia de uno de ellos.
- Asignación de probabilidades de falla y tipo de solicitaciones.

A través de la metodología SES, como resultado de la valoración de la Calificación de Estabilidad (CE) y del estudio de su variación en la zona del proyecto, se obtuvieron cinco categorías de amenaza (ver cuadro 22), con las cuales se elaboró el Mapa de Amenaza Relativa según el método SES.

Categoría de Amenaza	Calificación de Estabilidad (CE)
Muy alta	$CE < 126$
Alta	$126.5 < CE < 151$
Media	$152.5 < CE < 177$
Baja	$177.5 < CE < 202$
Muy baja	$202.5 < CE$

Cuadro 22. Categoría de Amenaza de la metodología SES - Estudio Bogotá (1999)

Fuente: Tomado de González y Millán (1999b)

Mediante la MTN se definieron de modo semialeatorio las familias de taludes naturales, se obtuvieron los factores de seguridad y probabilidades de falla y se tuvieron los intervalos de las categorías de amenaza relativa, como se aprecia en el cuadro 23.



Categoría de Amenaza	Factor de Seguridad Relativo (FS)
Muy alta	$FS < 0.6$
Alta	$0.6 < FS < 1.1$
Media	$1.1 < FS < 1.9$
Baja	$1.9 < FS < 3.4$
Muy baja	$FS > 3.4$

Cuadro 23. Categoría de Amenaza según MTN - Estudio Bogotá (1999)

Fuente: Tomado de González y Millán (1999b)

Con los valores de Factor de Seguridad Relativos para un período de 10 años y mediante interpolación con el SIG se elaboró el Mapa de Amenaza Relativa según la MTN. La figura 29 muestra una vista parcial del Mapa de Amenaza Generado para diferentes localidades de Santafé de Bogotá.

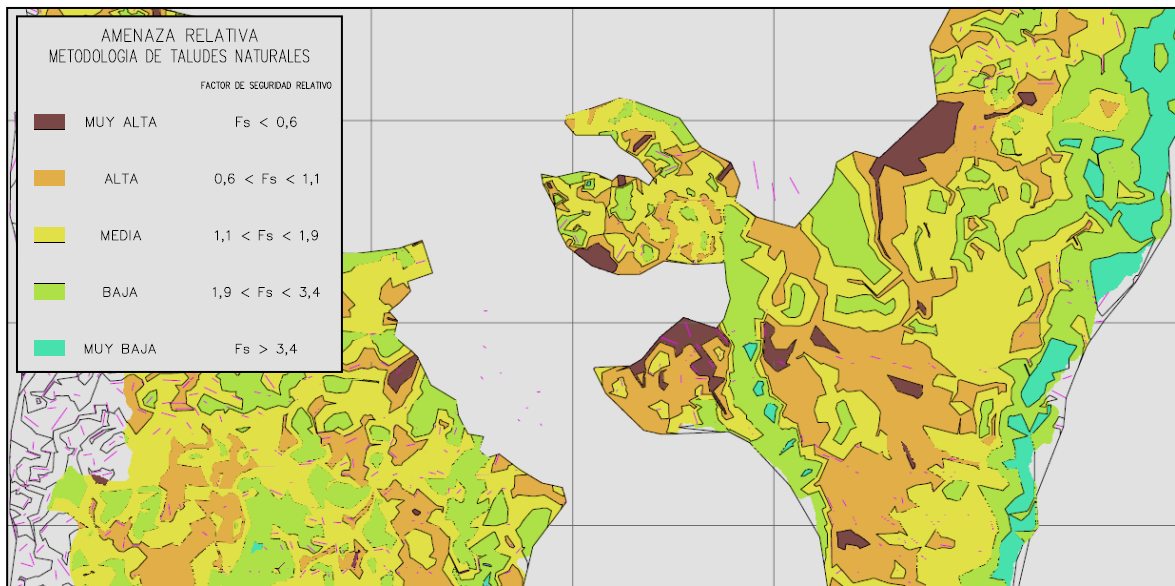


Figura 29. Vista parcial Mapa de Amenaza según MTN para distintas localidades de Bogotá

Fuente: Tomado de INGEOCIM-UPES (1998)

Como producto final se obtuvo la cartografía de la amenaza por inestabilidad del terreno para el área de estudio a escala 1:10.000. En promedio el 61% del área de estudio se categorizó en el nivel de amenaza media, el 11% como amenaza alta y muy alta y el restante 28% como amenaza baja o muy baja. Lo anterior permite concluir que la condición general de estabilidad del área de estudio se encuentra en relativo equilibrio con relación a su entorno, dando lugar a la posibilidad de que un área determinada cambie de categoría de estabilidad, en forma positiva o negativa, dependiendo principalmente de la acción antrópica sobre el medio físico.

Con niveles de amenaza alta y muy alta, la localidad de Ciudad Bolívar presenta la mayor incidencia (15.4% de su área), le siguen las localidades de Usaquén (10.3%), Santa Fe-Chapinero (10.2%) y Rafael Uribe-San Cristóbal (8.8%), mientras la localidad de Suba presenta un 4.3% de su área. En contraste, en categoría de amenaza baja y muy baja, la localidad de Usaquén presenta un 43.5% de su área, mientras Rafael Uribe-San Cristóbal tiene el 29.6%, Santa Fe-Chapinero el 27.1%, Suba el 19.8% y Ciudad Bolívar el 18%. En consecuencia la amenaza media ocupa el 75.8% de la localidad de Suba, el



66.9% de Ciudad Bolívar, 62.6% de Santa Fe- Chapinero, 61.7% de Rafael Uribe-San Cristóbal y sólo 46.2% de Usaquén.

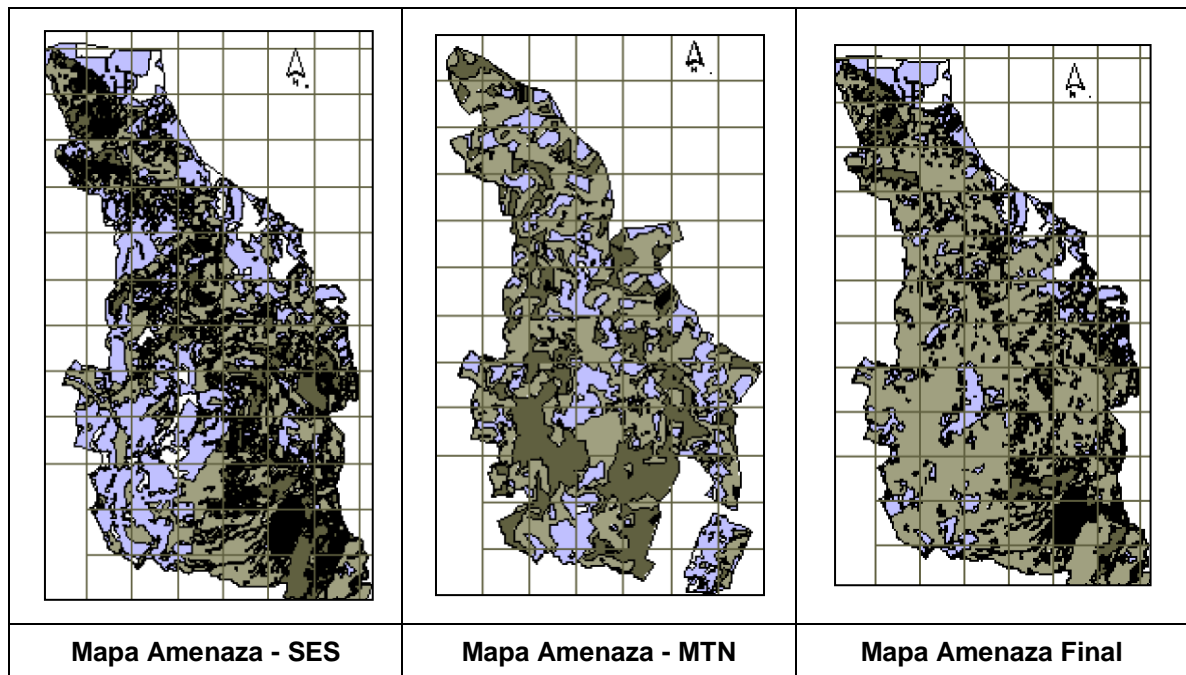


Figura 30. Mapas de Amenaza generados para la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá

Fuente: Tomado de González y Millán (1999b)

2.3.5. Estudio de Ingeominas (2001a) en Cartagena D.T. y C.

En el año 2001 Ingeominas culminó el estudio de "*Zonificación Geotécnica, Aptitud y Uso del Suelo en el Casco Urbano de Cartagena*" que se llevó a cabo mediante convenio interadministrativo N° 005 de 2000 suscrito con la Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. El alcance general del estudio estuvo enfocado a la definición de las características geológicas, geomorfológicas y estructurales de las rocas y suelos aflorantes en la ciudad, realizar la caracterización geotécnica del subsuelo del área de estudio, elaborar la zonificación de las áreas por sus condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas y por la susceptibilidad de las mismas a los fenómenos de remoción en masa, a la inundación, al diapiatismo de lodos, a los suelos expansivos y licuables y finalmente a definir el uso más adecuado del suelo con base en las restricciones detectadas.

La metodología y los resultados de la zonificación geotécnica llevada a cabo en este estudio se presentan de modo preliminar en el trabajo de tesis de Barboza (1996). Se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y la clasificación de Deere and Miller (1966) para el material rocoso el cual se basa en la resistencia a la carga puntual.

La evaluación del grado de susceptibilidad a los fenómenos naturales (mencionados con anterioridad) se realizó a través de la información cartográfica obtenida. Es importante mencionar que gran parte de la información base utilizada en este estudio de zonificación (2001) había sido generada antes por el mismo Ingeominas (1995, 1996) y se presenta de modo parcial en el trabajo de Barboza (1996).



La estimación del grado de susceptibilidad a los PRM se realizó con base en los lineamientos de la metodología SES (1989), valorando ocho parámetros de evaluación (tipo de material, relieve, drenaje, vegetación, erosión, clima, sismo y factor antrópico). Una estimación preliminar de la susceptibilidad a los PRM se muestra en el trabajo de Barboza (1996).

Se realizó la determinación del grado de susceptibilidad a inundaciones en el área de estudio diferenciaron dos (2) sectores, el correspondiente a las partes planas y aun en las bajas pendientes, donde la inundación se relacionó con la deficiente capacidad de conducción de los canales construidos para evacuar los caudales asociados con la ocurrencia de aguaceros de intensidad considerable, con la insuficiencia de estructuras de paso de las calles, es decir, alcantarilla, de cualquier tipo, para conducir los caudales generados, o con la conjunción de estos aspectos. Y en las zonas de pendientes moderadas a altas, más que los fenómenos de inundación, es probable la ocurrencia de avenidas torrenciales de caudales con magnitud considerable, que ponen en peligro los núcleos humanos asentados actualmente en el cauce mayor de las corrientes naturales que la drenan. En consecuencia, con lo anteriormente planteado, los análisis realizados se centraron en la determinación de los caudales generados por lluvias intensas de diferente probabilidad de ocurrencia o período de retorno y su comparación con la capacidad de las estructuras de paso y de los canales existentes.

Con referencia a la erosión costera, se cuantificaron los factores que inciden en este fenómeno, tales como longitud y pendiente de la plataforma continental cercana, grado de exposición de la costa a la energía marina, la forma de aproximación del oleaje a la costa y el grado de saturación de las playas. Igualmente, se tuvo en cuenta las obras de protección de la línea costera y en especial los resultados del monitoreo realizado por Ingeominas entre los años 1986 y 2000. Los resultados preliminares de esta evaluación se muestran en el trabajo de Barboza (1996).

Adicionalmente, se realizó un análisis preliminar de potencial de expansión de los suelos arcillosos presentes en Cartagena, al igual que la susceptibilidad de licuación de los suelos granulares saturados. Este análisis de potencial de expansión es similar al que se presenta en el trabajo de Barboza (1996); se obtuvo una categorización del potencial expansivo del material arcilloso detectado en el casco urbano de Cartagena.

Del mismo modo para el análisis de licuación de suelos, se contó con la información de granulometría, coeficiente de uniformidad, resultados de los ensayos de penetración estándar (SPT) y la profundidad del nivel freático, obtenida de las perforaciones disponibles y se aplicaron las metodologías de Seed et al. (1985) en SNPAD (1993) y Fernández (1992). Este análisis de licuación es similar al que se presenta en el trabajo de Barboza (1996).

Para la zonificación de susceptibilidad a fenómenos relacionados con volcanes de lodo, se tuvo en cuenta la distribución espacial de antiguos flujos de lodo evidenciados en las fases de cartografía geológica y geomorfológica. Igualmente se utilizó la información obtenida de volcanes de lodo que han tenido erupción (Carvajal 1996a, 1999) y, fundamentalmente, los datos de exploración sísmica, gravimétrica y magnetométrica que permitieron conocer las características del fenómeno con profundidad (Franco, 1996, Impactos Ambientales, 1998). Este análisis se presenta de modo parcial en el trabajo de Barboza (1996).



En este estudio se realizó un mapa de Susceptibilidad a los fenómenos geológicos evaluados, en el cual se definieron aquellas zonas susceptibles a los procesos de remoción en masa, inundaciones de tipo fluvial y marino, diapirismo de lodos, suelos expansivos y suelos potencialmente licuables. En el trabajo de Barboza (1996) se generó un mapa similar. Al obtener este mapa, se realizó un análisis de las diferentes geo-restricciones detectadas en el medio físico del área de estudio y las características urbanísticas de esa fecha (año 2001) y formuladas en el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito de Cartagena, para definir cuál sería el uso más adecuado del suelo en el área de estudio. A continuación en las figuras 31, 32 y 33 se muestran en vista parcial algunos mapas generados en el desarrollo del estudio.

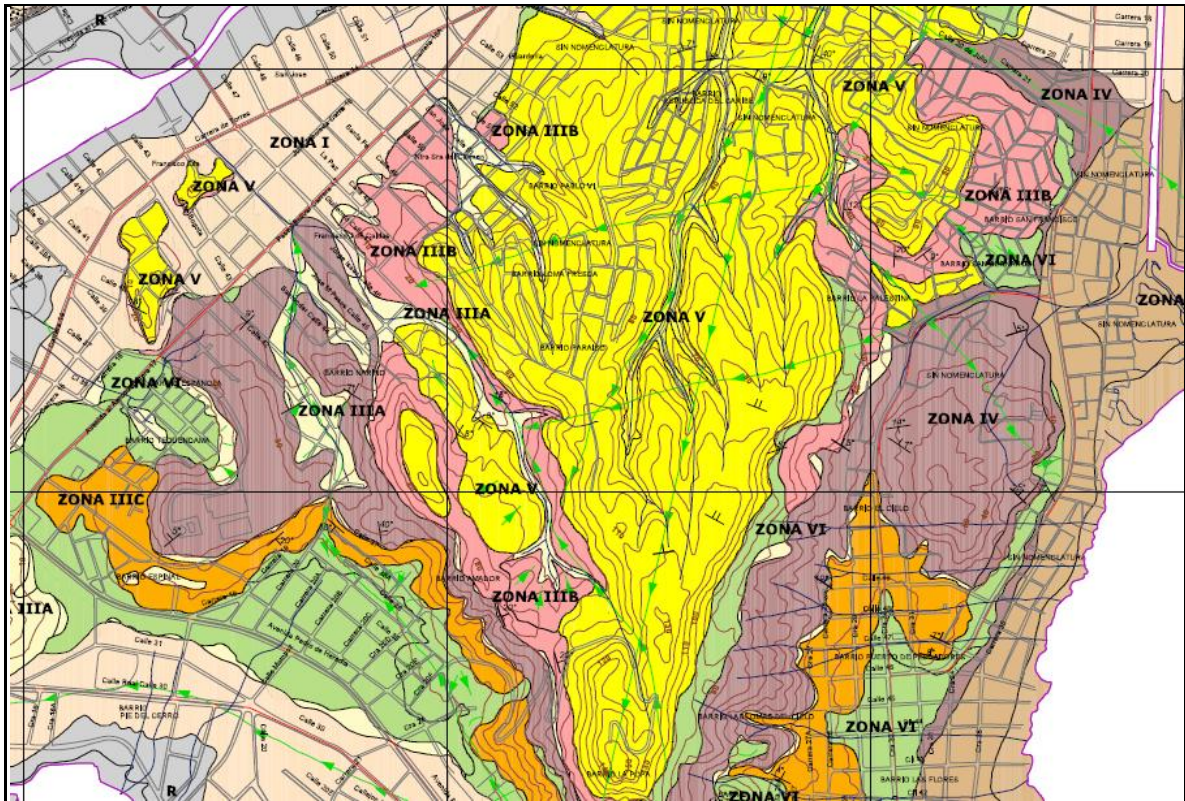


Figura 31. Vista parcial de Mapa de Caracterización Geotécnica de Cartagena (Plancha I)

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)

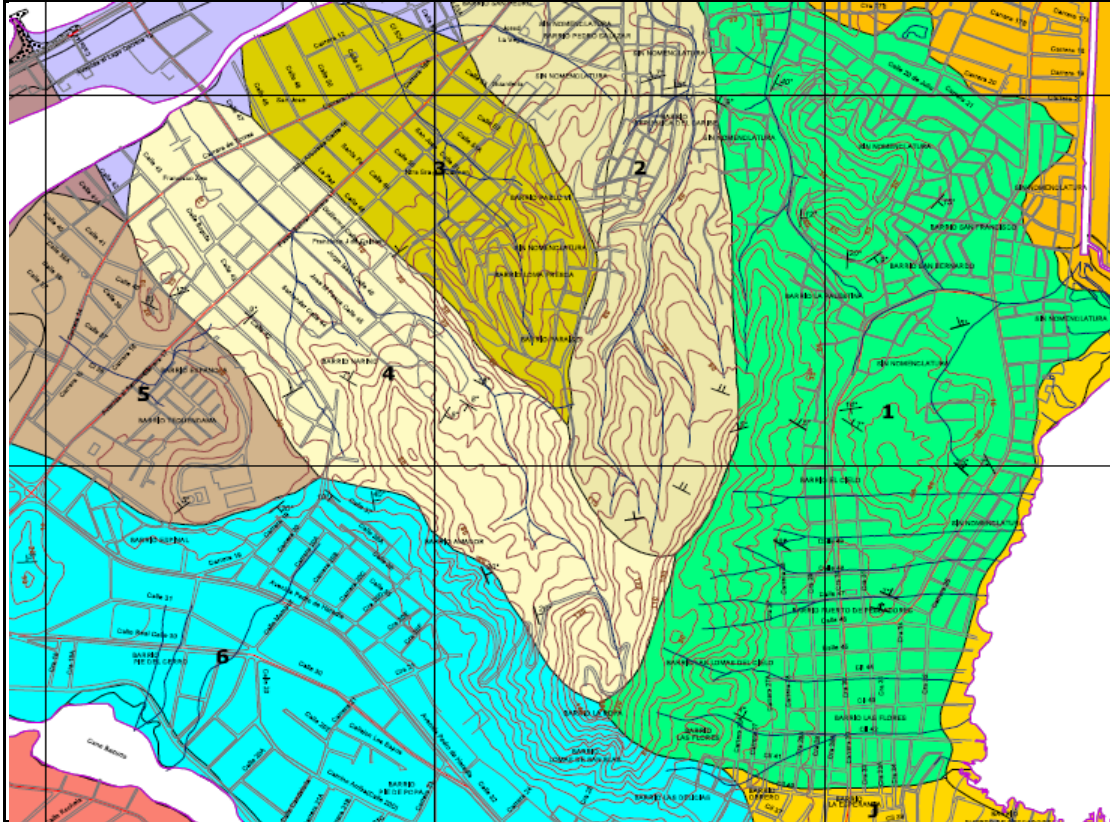


Figura 32. Vista parcial de Mapa de cuencas hidrográficas (Plancha I)
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)

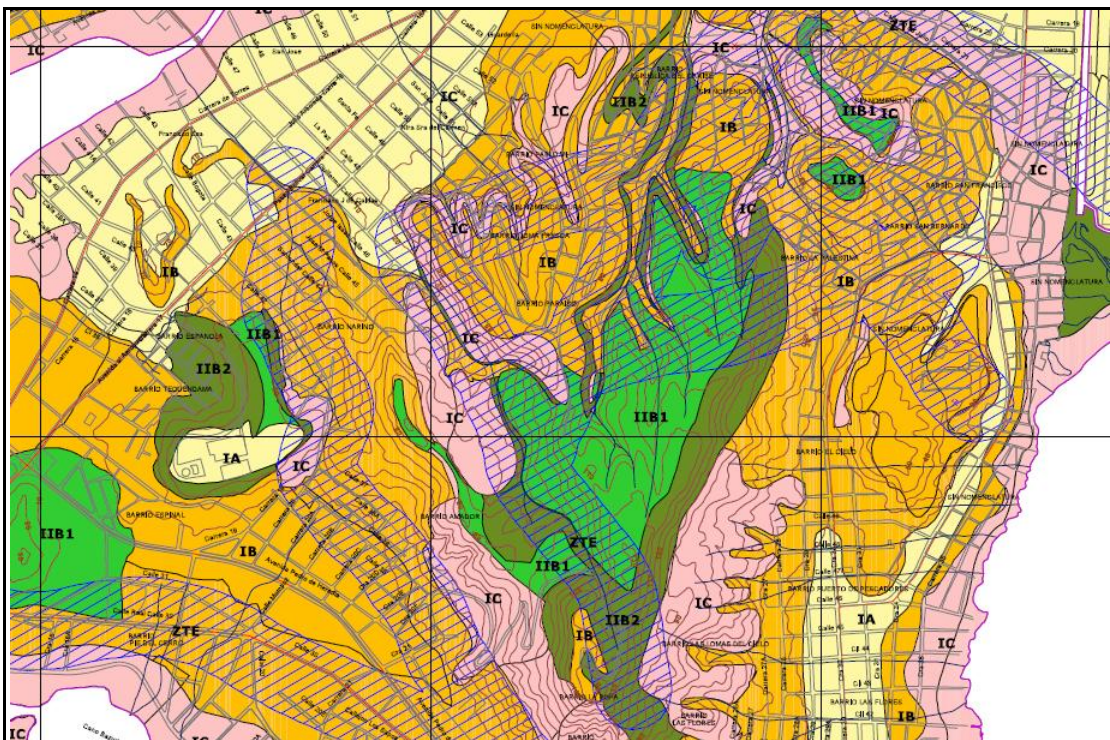


Figura 33. Vista parcial de Mapa de Aptitud y uso del suelo de Cartagena (Plancha I)
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



2.3.6. Estudio de Ingeominas (2001-2003) en Villavicencio

Entre los años 2001 y 2003 Ingeominas llevó a cabo la "*Zonificación Integral de Amenazas Naturales para Villavicencio*" en dos fases de ejecución según presupuesto disponible, que incluyó las zonificaciones de amenaza por movimientos en masa, de inundaciones por desbordamiento natural de los ríos Guatiquía y Ocoa y de amenaza sísmica (zonificación sismo-geotécnica indicativa).

Este estudio fue contratado a través de dos convenios interinstitucionales (firmados en los años 2000 y 2002) con la Alcaldía de Villavicencio y el área de estudio escogida fue la zona del piedemonte de las cuencas de los ríos Guatiquía y Ocoa en el municipio de Villavicencio. Las condiciones de estabilidad de las laderas son particularmente frágiles en las zonas de piedemonte de la vertiente oriental de la Cordillera Oriental donde, además de las características intrínsecas de las laderas, se presenta una alta complejidad estructural geológica que determina la actividad sísmica de esta región, y es en este contexto donde se ubica el área rural del Municipio de Villavicencio.

La evaluación y zonificación de la amenaza relativa por movimientos en masa en el área de laderas de las cuencas de los ríos Guatiquía y Ocoa en el municipio de Villavicencio a una escala 1:25000 se realizó empleando el planteamiento de la metodología SES desarrollada por Ramírez y González (1989) y sus ocho parámetros de evaluación. Este trabajo fue dividido en tres partes, realizando primero la evaluación de los parámetros intrínsecos que intervienen en un estudio de amenaza por movimientos en masa (según la metodología SES), segundo evaluando los parámetros detonantes y finalmente mediante la evaluación de la amenaza relativa por movimientos en masa.

De las conclusiones y recomendaciones de la evaluación de la amenaza relativa por movimientos en masa se obtiene que el municipio de Villavicencio se encuentra ubicado en un área geológica muy compleja y de amenaza sísmica alta, atravesado por varios sistemas de fallas como Servitá, Restrepo, Mirador – Bavaria, Buenavista y Colepato – Villavicencio, algunas de ellas con evidencia de actividad. En cuanto a los valores de precipitación media anual, se puede decir que la zona noroccidental en la región montañosa es la más lluviosa con una variación entre 5300 a 6200 mm, en la franja con alturas entre 1000 y 1200 msnm. Del total de la zona evaluada, aproximadamente el 62% del área montañosa presenta características morfológicas y morfométricas que favorecen el desarrollo de sectores inestables. Con base en el resultado final del estudio, es decir el mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa se concluye que la zona presenta en gran porcentaje de su extensión sectores de categoría de amenaza alta a muy alta, donde predominan los procesos de tipo carcavamiento extenso, profundo, flujos de tierras y/o detritos y reptación.

De otra parte se evidencia la relación existente en zonas muy inestables entre las condiciones intrínsecas como zonas morfométricas de alta pendiente, tipo de material y afectación por estructuras geológicas como fallas, y factores detonantes como la intervención negativa del hombre, que favorecen la presencia de diversos tipos de procesos denudativos. La zona de montaña del pie de monte llanero se encuentra muy afectada por procesos denudativos, los cuales aportan gran cantidad de sedimentos a los ríos y quebradas, favoreciendo aguas abajo y propiamente en el llano mismo la generación de inundaciones y avenidas torrenciales en ríos como el Guatiquía y el Ocoa en particular.



De la evaluación del parámetro relieve se concluye que el área montañosa de Villavicencio presenta un relieve muy heterogéneo, y en general presenta condiciones favorables para la generación de movimientos en masa. La correlación entre la lluvia anual vs elevación y vs período de retorno de todas las estaciones seleccionadas para poder asignar lluvia crítica, se determinó que el tiempo de retorno para la lluvia crítica está comprendido entre los 14 y 32 años.

A través del tiempo, la zona de estudio ha estado sometida a un uso inadecuado de suelos: la deforestación, las prácticas agronómicas inadecuadas, las sobrecargas provenientes del sobre pastoreo en las laderas, los drenajes naturales imperfectos (aumento del escurrimiento de aguas superficiales) y el alto régimen pluviométrico son algunas de las causas antrópicas y naturales que han llevado al deterioro de los ecosistemas naturales del área de estudio. Esta alteración repercute en el incremento de los procesos erosivos, de los deslizamientos (rotacionales o traslacionales y complejos), reptamientos, aumento en los sedimentos de los ríos y cambios en los cauces naturales (avenidas torrenciales). Se recomendó realizar prácticas de manejo y conservación de suelos (sistemas agrosilvopastoril, prácticas agronómicas adecuadas), manejo integrado de cuencas hidrográficas y campañas de educación y concientización en la conservación de suelos, ya que de este recurso depende la conservación de la vegetación, cantidad y calidad del agua, disminución en el transporte de sedimentos en las fuentes de agua, fauna y cultivos entre otros.

Otro aspecto que está ligado a la susceptibilidad o a la degradación de las propiedades físicas de los suelos, es el uso y manejo de los mismos, los cuales son factores que influyen en la conservación de los suelos. Por lo tanto, cada tipo de suelo tiene un comportamiento diferente y requiere un uso racional y un manejo adecuado para su conservación. El uso y el manejo de los suelos juegan un papel importante en la erosión, ya que si se hacen técnicamente constituyen factores temperantes de la misma, amortiguando el efecto de los factores activos. En términos generales las recomendaciones a partir de este estudio sugirieron para los sectores críticos, la implementación de técnicas de control de erosión empleando estructuras de fijación de sedimentos y corrección torrencial, complementadas con obras para el manejo de aguas.

También se sugirió para los sectores adyacentes a cárcavas, efectuar un plan integral de recuperación, implementando prácticas agro-forestales y un adecuado programa de reforestación promoviendo la siembra de especies nativas. Para sectores afectados por procesos de carcavamiento extenso y deslizamientos activos que amenacen principalmente edificaciones y vías se sugirió efectuar un exhaustivo plan de manejo del agua superficial, así como la repoblación forestal nativa de las zonas de menor pendiente, a partir de estudios geotécnicos, geológicos e hidráulicos de detalle que así mismo permitieran disminuir la pendiente del cauce y prevenir futuros deslizamientos. Se recomendó respetar las rondas de las cañadas y ríos, pues ellas son muy susceptibles a la erosión y a movimientos en masa, especialmente en zonas de altas pendientes donde el material rocoso está muy alterado y fracturado.

A continuación en la figura 34 se muestra la vista parcial del mapa de Zonificación de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa para el municipio de Villavicencio a escala 1:25.000, el cual es el producto final de la evaluación planteada.

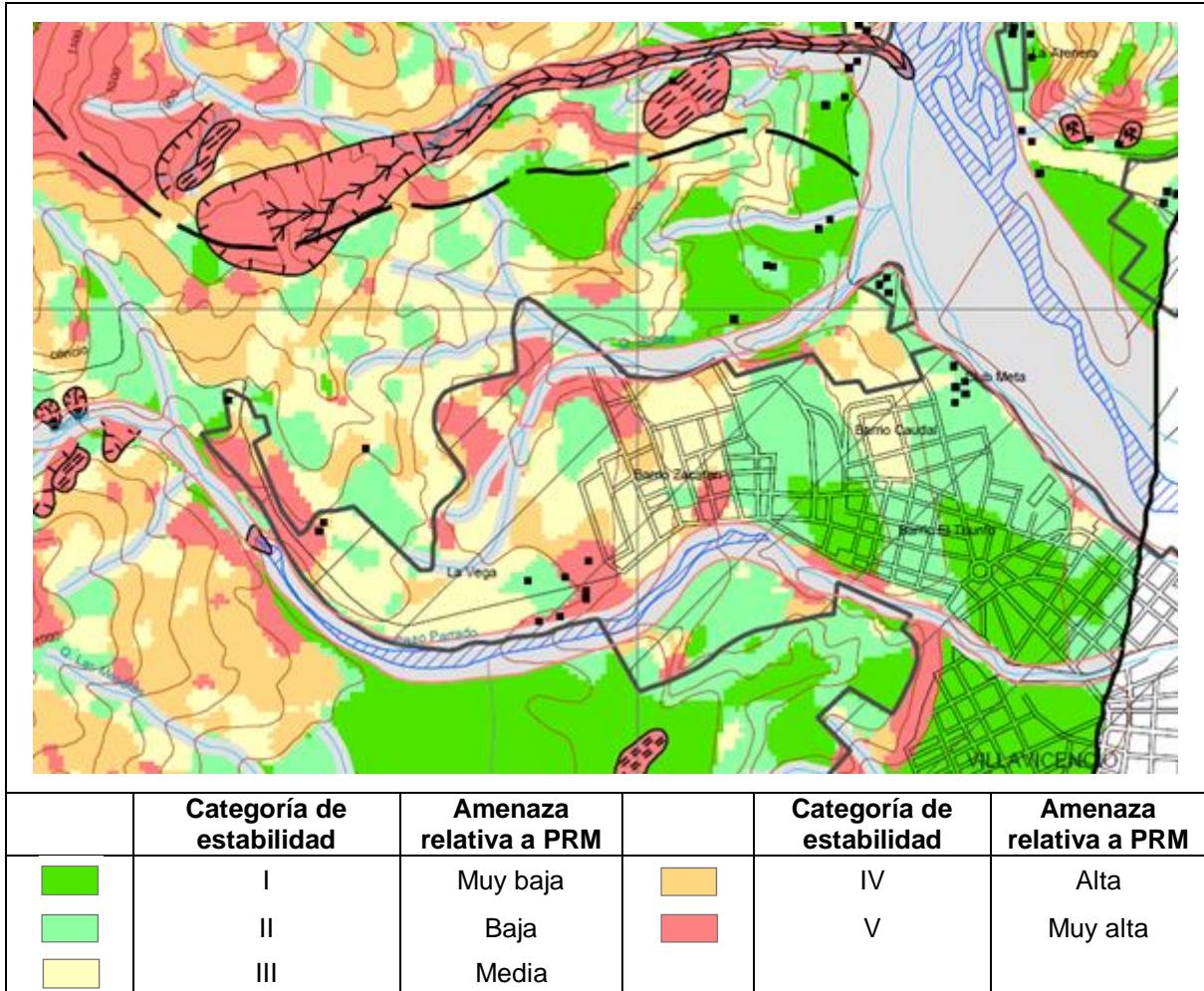


Figura 34. Vista parcial de Mapa de Amenaza Relativa a PRM de Villavicencio

Fuente: Tomado de Ingeominas (2003)

2.3.7. Tesis de Pregrado de Díaz (2004)

El trabajo de tesis de Fredy A. Díaz Durán (2004) se titula "*Estudio Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Aplicado al Sector Rural de Villavicencio*". Este trabajo utiliza información base del estudio en Villavicencio del Ingeominas (2003), en especial de la zonificación de amenaza por movimientos en masa para esta área utilizando la metodología SES. Es importante mencionar que parte de la información de esta tesis, resumida en este documento se ha tomado de un artículo científico de Díaz et al. (2004).

Específicamente en la tesis de Díaz (2004) se modela por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la zonificación de amenaza por movimientos en masa en las cuencas de los ríos Guatiquía y Ocoa dentro del municipio de Villavicencio, empleando cuatro metodologías reconocidas, para zonificar este tipo de eventos, donde la metodología SES fue implementada previamente por Ingeominas (2003). Cada metodología se implementa en SIG desarrollando una guía para mostrar su forma de utilización en el caso específico de Villavicencio. A partir de dichas zonificaciones, se



realiza un análisis comparativo de las mismas, tanto desde el punto de vista paramétrico, como desde el tratamiento dado a las variables bajo estudio en cada caso.

□ Planteamientos de las Metodologías

A continuación se exponen de modo resumido los planteamientos de las tres metodologías adicionales de zonificación de amenaza por movimientos en masa implementadas (Díaz et al. 2004).

Metodología de Macrozonificación para la Determinación de Amenaza por Deslizamiento: Mora & Vahrson (1994) presentan un modelo para el análisis de la amenaza relativa de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos, teniendo como finalidad la definición y jerarquización de áreas críticas. El planteamiento en la definición de la Amenaza es el siguiente:

$$A_d = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S + LL) \quad [2.7]$$

Donde, (A_d) es el índice de amenaza relativa por deslizamiento, (R_r) es el índice de relieve relativo, (L) es el índice de influencia de la litología, (H) es el índice relacionado con la humedad del suelo, (S) es el índice de influencia de la actividad sísmica y (LL) es el índice de influencia de las lluvias intensas. Aunque la metodología no involucra el uso del suelo ni la intervención antrópica, su aplicación es útil para conocer las áreas que, aún sin intervención del hombre, representan una amenaza natural.

Metodología de Valoración de la Amenaza por Deslizamiento en Laderas Naturales Inducidos por Terremotos: La metodología se basa en la propuesta de analizar las condiciones para tres mecanismos de falla de manera independiente: deslizamientos coherentes, deslizamientos con alto grado de desorganización interna y propagaciones laterales y flujos.

El modelo desarrollado por Rodríguez-Pineda (2001) determina la amenaza como la convolución de una función detonante y una de susceptibilidad, tal como se presenta a continuación.

$$H = T \cdot S \quad [2.8]$$

Donde (H) es la valoración de la amenaza, (T) es la evaluación de la función detonante y (S) es la evaluación de la función de susceptibilidad. Definidas así:

$$T = \frac{(SP - SP_{\min})}{(SP_{\max} - SP_{\min})} \quad [2.9] \qquad S = \frac{1}{2}(G + C) \quad [2.10]$$

Se tiene que (SP) es el parámetro detonante, que en este caso corresponde con el valor de aceleración máxima horizontal del terreno a nivel de superficie, con periodo de retorno de 475 años y los valores máximo y mínimo corresponden con los de la zona de estudio. En este contexto (G) corresponde con el valor de la función de geometría de ladera y C con el de la función climática.



$$G = \frac{(GP - GP_{\min})}{(GP_{\max} - GP_{\min})} \quad [2.11]$$

$$C = \frac{1}{4}(LTR + STR + LTE + STE) \quad [2.12]$$

(GP) es el parámetro de susceptibilidad por geometría de la ladera, en este caso se empleó la pendiente dada en grados, (LTR) es la lluvia promedio anual, (STR) la lluvia promedio mensual, (LTE) los excesos de lluvia anuales y (STE) los excesos de lluvia mensuales, definidos estos últimos como la diferencia entre la lluvia promedio y una lluvia con recurrencia de 100 años. La forma de calificar cada uno de los parámetros en la función de susceptibilidad, es por medio de su normalización, para lo que Rodríguez-Pineda (2001) propone valores máximos y mínimos, obtenidos como resultado del análisis de una amplia base de datos donde se reportan tanto los sismos que han inducido deslizamientos, como los deslizamientos que han sido inducidos por sismos. Empleando dichos valores límite y el valor del parámetro en el sitio a evaluar, se utiliza la siguiente ecuación para la normalización:

$$RP = \frac{(RP_{act.} - RP_{\min})}{(RP_{\max} - RP_{\min})} \quad [2.13]$$

Donde (RP) es cualquiera de los parámetros utilizados en la función climática y los valores máximos y mínimos corresponden con los presentados por Rodríguez-Pineda (2001) de acuerdo con el mecanismo de falla.

Metodología de Predicción de la Ocurrencia de Fenómenos de Inestabilidad de Laderas:

En el planteamiento estadístico, Van Westen (1993) propone dos formas básicas de lograr una zonificación de amenaza, dependiendo de si el análisis estadístico es univariado o multivariado. En este caso se llevó a cabo un análisis univariado, empleando como parámetros de susceptibilidad los materiales, la pendiente, la densidad de drenaje y la densidad de fallamiento, al tiempo que los parámetros detonantes se definieron por la aceleración máxima superficial del terreno con periodo de retorno de 475 años, la lluvia máxima diaria anual con periodo de retorno de 100 años, determinada por ajuste a la distribución Gumbel y la lluvia promedio anual con periodo de retorno de 100 años, determinada por ajuste a la distribución de probabilidad Gamma.

El proceso de análisis consta de tres pasos: (1) un análisis de distribución de deslizamientos sobre los parámetros de susceptibilidad, con base en el cual se definen las clases relevantes de cada parámetro. (2) Se hace un análisis de densidad de procesos morfodinámicos sobre cada clase relevante y (3) se ponderan y califican dichas clases, por medio de una normalización simple que divide los valores del parámetro en el máximo valor presente del mismo en la zona de estudio. La definición de las clases relevantes, se logra por medio de un análisis de la distribución acumulada de frecuencias de cada parámetro, haciendo que cada clase tenga igual área de afectación por procesos morfodinámicos.

Tomando como base de trabajo el mapa morfodinámico obtenido en campo por Ingeominas (2001, 2003), se procede a clasificarlo por tipos, distinguiendo entre procesos erosivos y movimientos en masa, y desplegarlo sobre los mapas paramétricos a analizar. Sobre cada clase relevante de parámetro, se determina el porcentaje de área afectada, y se normalizan los resultados haciéndolos tomar valores entre 0 y 1, para finalmente calificar cada clase relevante entre 1 y 5. En cuanto a los parámetros



detonantes, se analiza la distribución de frecuencias para cada uno de ellos y siguiendo los planteamientos de Raveneau (1989) se establece la mejor forma de definir clases en cada parámetro. El histograma de frecuencias del parámetro sísmico presentó un sesgo a la izquierda, mientras que el de la máxima lluvia diaria anual con recurrencia de 100 años, presentó un sesgo a la derecha, en estos dos casos se utilizó una progresión aritmética que establece que cada clase tiene una amplitud mayor que la anterior en la dirección del sesgo, en una medida dada por el rango de la progresión, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{(M - m)}{(1 + 2 + 3 + \dots + n)} \quad [2.14]$$

Donde (M) es el máximo valor del parámetro, (m) es el mínimo valor y (n) es el número de clases adoptado, 5 en este caso. En cuanto a la lluvia anual con recurrencia de 100 años, se encontró que su distribución era uniforme, razón por la que se adoptan clases de igual amplitud. Una vez realizado el análisis de distribución y densidad de deslizamientos, se procedió al cálculo de valores de peso para cada parámetro involucrado, basado en el análisis de una tabla de datos donde se almacenan los resultados de los análisis de densidad de deslizamientos, para lo cual es posible establecer una relación entre el porcentaje de afectación por un determinado tipo de proceso y la susceptibilidad de la clase relevante de parámetro en la que ocurre.

La ponderación adoptada, en cuanto a la susceptibilidad, considera que el parámetro más importante es el material, con un peso relativo de 45%, seguido de la pendiente con 30%, de la densidad de fallamiento con 15% y finalmente de la densidad de drenaje con 10%. En cuanto al detonante, considera que lo más importante es la lluvia promedio anual con recurrencia de 100 años, con un peso relativo de 40%, seguido de la máxima lluvia diaria anual con periodo de retorno de 100 años y el parámetro sísmico, ambos calificados con 30% de peso relativo. La condición final de amenaza se determina estimando que susceptibilidad y detonante son igualmente importantes.

❑ Resultados del Análisis comparativo

La aplicación de las metodologías generó como resultado un mapa preliminar de evaluación de la amenaza, el cual fue calibrado mediante el análisis de la presencia o ausencia de procesos morfodinámicos en la zona. Se evaluó el porcentaje de acierto del mapa preliminar de amenaza generado mediante la implementación de cada metodología, comparando las áreas con nivel de amenaza media, alta y muy alta que coinciden con las áreas de afectación por movimientos en masa de acuerdo con el mapa de procesos morfodinámicos levantado en campo, considerando que en las áreas con niveles de amenaza media a muy alta existe la mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. Los resultados de la evaluación de acierto de cada una de las metodologías mostraron que las metodologías SES, Rodríguez-Pineda y Van Westen, ofrecen resultados satisfactorios, mientras que la metodología de Mora & Vahrson presenta resultados poco confiables, con un porcentaje de acierto inferior al 50%.

La metodología de Van Westen (1993) se considera de mayor aplicabilidad que las otras en esta área en la medida que permite desarrollar un análisis separado para procesos erosivos y para movimientos en masa. Para la evaluación de amenaza por movimientos en masa, presenta un porcentaje de acierto de 90.81% según el escenario de procesos morfodinámicos que se evaluó en ese momento, mientras que en la evaluación de



amenaza por procesos erosivos, presenta un porcentaje de acierto de 85.34%, lo que se consideran muy buenos resultados en este tipo de aplicaciones.

En segundo lugar de aplicabilidad en la zona puede ubicarse la metodología de Rodríguez-Pineda, teniendo presente que la normalización de variables no se hizo con base en los valores que él presenta, por cuanto no son adecuados, sino con los valores extremos encontrados en el área de estudio para cada parámetro; aunque de acuerdo con el criterio de coincidencia, con un porcentaje de acierto de 81.15% se considera que la aplicación ofrece buenos resultados, es altamente cuestionable el no tener presente el tipo ni la condición del material, ya que al normalizar con respecto a valores referidos a la zona de estudio es imposible diferenciar los mecanismos de falla propuestos y que se supone son la forma de tener en cuenta los materiales.

En tercer lugar está la metodología SES, empleada por Ingeominas para llevar a cabo la zonificación de amenaza en Villavicencio en el año 2003, con un porcentaje de acierto de 73.41%. Con respecto a esta metodología se concluye que desarrolla un amplio trabajo en caracterización de los parámetros involucrados, lo cual es muy adecuado, pero es quizá la forma de combinar los parámetros la que está perjudicando el resultado final, por lo tanto se recomienda probar nuevas formas de combinar parámetros e incluso de relacionar la función de susceptibilidad y la función detonante.

Finalmente, el peor resultado lo presenta la metodología de Macrozonificación de amenaza, presentada por Mora & Vahrson, con un porcentaje de acierto de apenas 47.76%, lo que se considera muy bajo y poco confiable, aún tratándose de un método aproximado de Macrozonificación. En la figura 35 se aprecian los mapas de valoración.

❑ **Análisis comparativo de González-Morantes (2010)**

En el año 2010 fue presentada la tesis de maestría titulada "*Análisis comparativo de metodologías de zonificación de amenaza por deslizamiento a escala local, aplicada en un sector de la zona de cerros de la ciudad de Bogotá D.C.*" por parte del ingeniero Luis A. González-Morantes.

Este trabajo sigue la línea de la tesis de Díaz (2004) al realizar la aplicación y comparación de cuatro (4) metodologías de zonificación de amenaza por deslizamientos a nivel local (escala > 1:10.000), utilizando como zona de estudio un sector de los cerros orientales de la ciudad de Bogotá D.C. Entre las metodologías implementadas por González-Morantes (2010) está la de Ramírez y Gonzalez (1989) o Metodología SES y sus ocho parámetros de evaluación y la de Redes Neuronales Artificiales (ANN).

En principio el trabajo presenta una investigación acerca del estado del arte de algunas metodologías usadas para la evaluación de la amenaza por deslizamiento a nivel local y hace énfasis en las metodologías que se van a implementar. Posteriormente las metodologías propuestas son implementadas en el área de estudio escogida, utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Finalmente se evaluaron y definieron parámetros de validación, para comparar los diferentes mapas de zonificación y de esta forma definir las diferencias, ventajas y desventajas de las metodologías utilizadas.

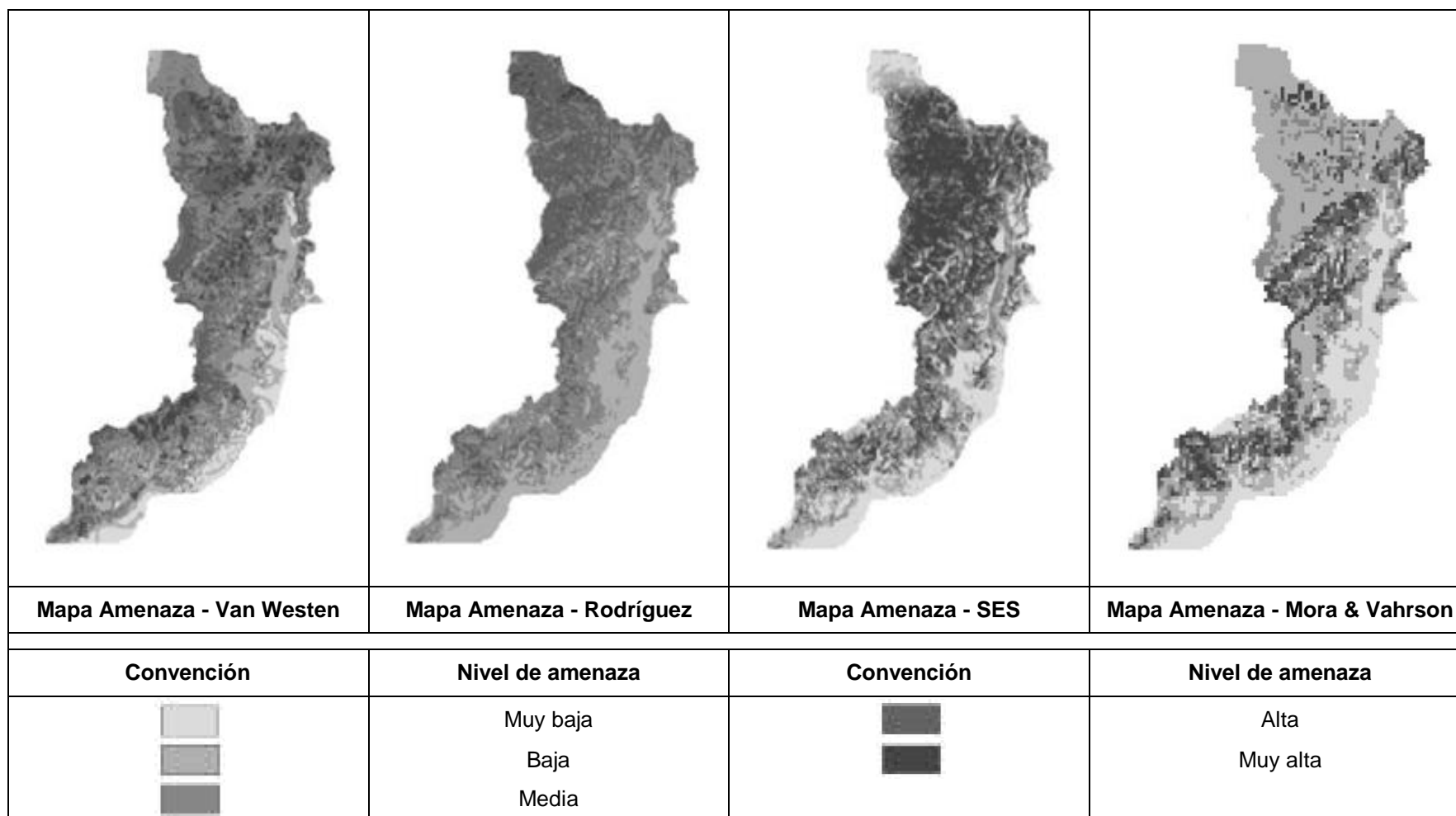


Figura 35. Mapas de Valoración de Amenaza a PRM de Villavieja por las distintas metodologías implementadas

Fuente: Tomado de Díaz et al. (2004)



Capítulo 3. Geología Regional y Local

El capítulo 3 describe en primer lugar, las generalidades de la ciudad de Cartagena, teniendo en cuenta su localización geográfica, limitantes físicas, su condición de distrito cultural y turístico, su división en 3 localidades y éstas a su vez en unidades comuneras de gobierno urbanas y rurales, conformadas por agrupaciones de barrios, y de corregimientos y zonas insulares respectivamente. Posteriormente se hace énfasis en las variables que intervienen en la meteorología de la ciudad como son temperatura, precipitaciones, humedad relativa, brillo solar, evaporación, vientos y marea, y se establece un resumen de las amenazas asociadas a fenómenos naturales a partir de una cronología de desastres y emergencias reportadas.

El objetivo principal de este capítulo va enfocado primordialmente en destacar las características geológicas de la ciudad de Cartagena, a nivel regional y local, teniendo en cuenta la edad de las rocas sedimentarias que afloran en la zona, su origen marino, las fallas que intervienen en ellas y la descripción de las rocas terciarias que han sido agrupadas en la Formación Calcárea de La Popa y la Formación Detrítica Bayunca, así como de aquellos depósitos de denudación del Cuaternario. A nivel regional, se destacan las características litológicas y los rasgos estructurales de la provincia geomorfológica del Sinú y la incidencia del fenómeno de Diapirismo de lodo en la región por efecto de sus manifestaciones en el terreno, a través de la formación de domos y la generación de los "Volcanes de lodo", y su relación con la formación de los cerros de la Popa y de Albornoz y la loma del Marión. En cuanto a la litoestratigrafía regional, se evidencia la influencia geológica del Cinturón del Sinú, en su Bloque Tectónico de Turbaco y el predominio de las formaciones Bayunca y La Popa, así como de aquellos depósitos de playa del Cuaternario.

De la litoestratigrafía local, se destacan a nivel litológico los afloramientos rocosos de la Formación Calcárea de La Popa, en la que subyace la Formación Detrítica Bayunca, sus conjuntos respectivos y los depósitos del período Cuaternario divididos en aquellos de origen marino, marino-aluvial, fluvial, coluvio-aluvial, coluvial, por volcanismo de lodo y acción antrópica. Desde el punto de vista estructural, Cartagena exhibe distintas estructuras geológicas a nivel local, entre ellas los pliegues anticlinales en Zaragocilla, Albornoz y el cerro de La Popa y los sinclinales en los barrios Socorro y Policarpa, las fallas y lineamientos de dirección predominante hacia el noreste y noroeste, y las diaclasas en sectores del cerro de La Popa, del anticlinal de Zaragocilla y del anticlinal de las antiguas canteras de Colclinker.

Finalmente el capítulo termina haciendo una descripción detallada de la geomorfología local de la ciudad, según el ambiente geomorfológico predominante, por lo tanto las geoformas identificadas por Ingeominas (2001a), se subdividen en aquellas de ambiente morfodinámico estructural denudacional (incluye morfodinámico denudacional), marino costero (incluye eólico), fluvial y de manera implícita la acción antrópica.



3.1. Generalidades de Cartagena

La ciudad de Cartagena se ubica en el centro del litoral del Caribe colombiano, al norte de Bolívar, departamento del cual es la capital, en latitud $10^{\circ} 25' 30''$ norte y longitud $75^{\circ} 32' 25''$ oeste respecto al meridiano de Greenwich. Cartagena limita al norte y oeste con el Mar Caribe, al sur con el municipio de San Onofre en el departamento de Sucre y al este con los municipios de Santa Catalina, Santa Rosa, Turbaco y Turbaná. Se encuentra a una distancia aérea de 600 Km y por carretera de 1204 Km de Bogotá, Capital de Colombia; a 89 Km de Barranquilla, 233 Km de Santa Marta; y 705 Km de Medellín.

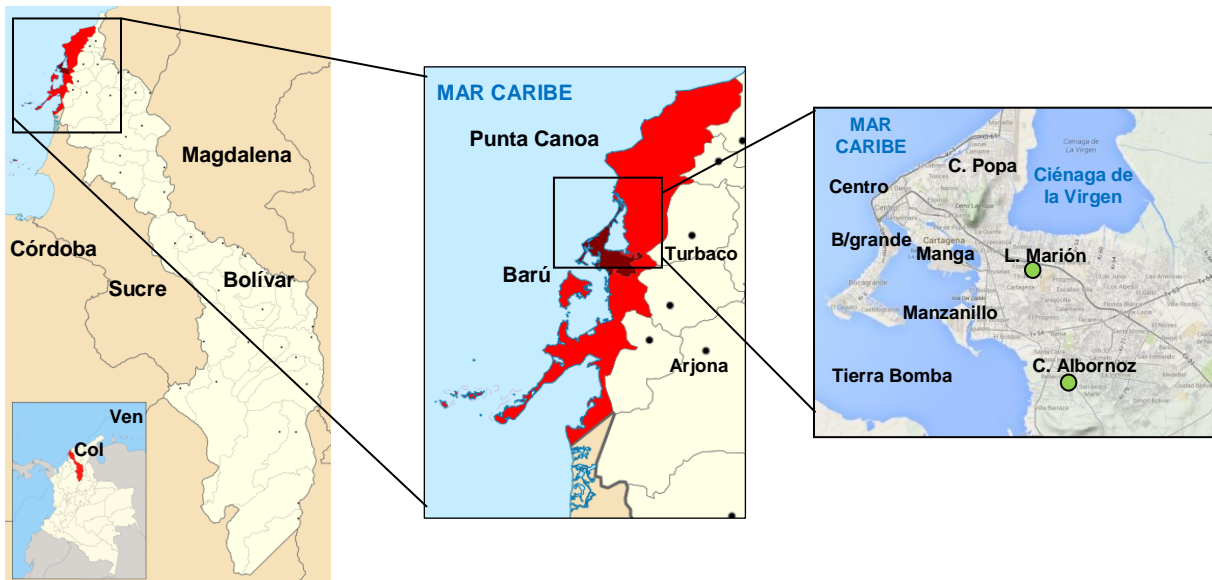


Figura 36. Localización geográfica de Cartagena

Fuente: Tomado de Wikipedia y Google Maps y modificado por el autor (2015)

Cartagena se encuentra en una zona costera típica, accidentada e irregular, conformada por procesos geológicos activos relacionados con el mar (Cabeza-Durango 2009). De acuerdo con POT (2001), el territorio Distrital está compuesto por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua, que conforman el área insular y un área continental. Estas condiciones y la presencia de los cuerpos de agua, hacen de Cartagena una ciudad con características morfológicas especiales y un hermoso paisaje natural pero al mismo tiempo lo constituyen en un sistema de gran fragilidad ambiental.

Según Cabeza-Durango (2009), la zona es además un área de confluencia marina y fluvial debido a la presencia de las desembocaduras del Canal del Dique que generan formaciones del tipo delta en la Bahía de Cartagena y Barbacoas. En la ciudad sobresale la Formación del cerro de la Popa con una antigüedad comprendida entre el Plioceno superior y el Pleistoceno inferior, la cual está compuesta por rocas y corales, se presenta en forma de colina alargada, pendientes fuertes e intermedias donde se encuentran abanicos aluviales, cárcavas, escarpes y acantilados. Las zonas planas y bajas cerca al litoral costero están constituidas por depósitos de origen cuaternario que constituyen espigones, cordones litorales y deltas regidos por la deriva litoral.



3.1.1. División Administrativa

El municipio de Cartagena se convirtió en Distrito Cultural y Turístico en el año de 1987 mediante un acto legislativo. De acuerdo con POT (2001), el Distrito de Cartagena tiene una extensión de 622 Km², de los cuales actualmente el 87.5% del territorio corresponden al área rural y los restantes 12.5% conforman el área urbana. Contrariamente, de su población, estimada en más de 1.000.000 habitantes al año 2014, solo se encuentra el 8% en el área rural, mientras que 92% se localizan en el área urbana. El territorio del Distrito se encuentra dividido en tres localidades (ver figura 37):

Localidad	Extensión (Km ²)	Porcentaje (%)
Localidad De la Virgen y Turística	371	60
Localidad Industrial de la Bahía	89	14
Localidad Histórica y del Caribe Norte	162	26

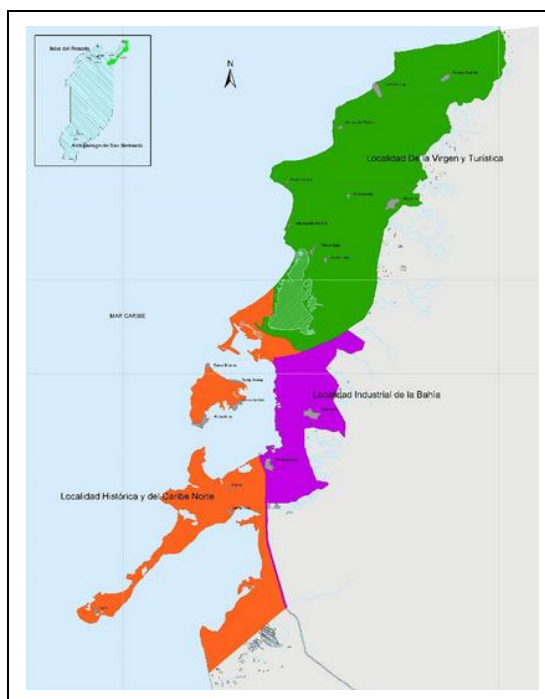


Figura 37. Mapa de Localidades de Cartagena

Fuente: Tomado de Alcaldía Mayor de Cartagena, Oficina de Planeación Distrital (2003).

Según Pérez y Mejía (2007), de acuerdo con la organización territorial del distrito de Cartagena, las localidades están conformadas por otros entes territoriales llamados "Unidades Comuneras de Gobierno" (UCG), tanto urbanas como rurales, a su vez conformadas por agrupaciones de barrios y corregimientos (veredas) respectivamente. Las UCG urbanas son 15 en total y agrupan en la actualidad aproximadamente 180 barrios o sectores, mientras que las UCG rurales también son 15 en total y representan igual número de corregimientos localizados en la periferia de los barrios y en zonas insulares tales como Tierra Bomba, Bocachica, Caño del Oro, Santa Ana, Isla Fuerte, Islas del Rosario, Islas San Bernardo, Barú, Arroyo Grande, Arroyo de Piedra, Pontezuela, Bayunca, Punta Canoa, La Boquilla y Pasacaballos (ver figura 38).

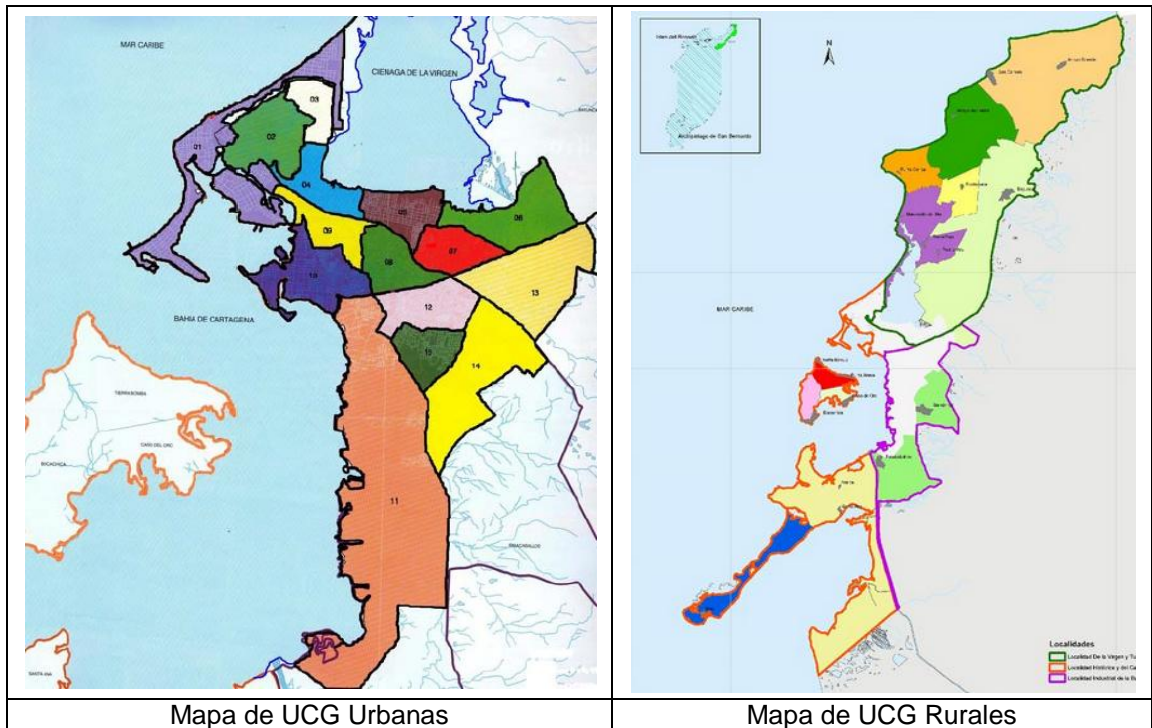


Figura 38. Mapas de Unidades Comuneradas de Gobierno (UCG) de Cartagena

Fuente: Tomado de Alcaldía Mayor de Cartagena, Oficina de Planeación Distrital (2003).

3.1.2. Clima

De acuerdo con Cabeza-Durango (2009) del CIOH, Cartagena posee un clima característico tropical semiárido. El promedio de humedad está en el orden de 90%, con períodos típicos de lluvia de Abril a Mayo y de Septiembre a Noviembre. Por la ubicación geográfica de Cartagena en el área suroeste del Caribe, el régimen climático de la región está bajo la influencia de los desplazamientos norte - sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual es un cinturón semicontinuo de bajas presiones localizado entre las regiones subtropicales de los hemisferios norte y sur, y es conocido igualmente como Cresta Ecuatorial, Frente Intertropical y Frente Ecuatorial.

El movimiento de la ZCIT, en dirección norte o sur es una resultante de los fenómenos físicos subtropicales, además, el sector está influenciado por las circulaciones atmosféricas de los vientos Alisios de dirección N y NE, procedentes de los Centros de Alta Presión del Atlántico Nororiental. La incidencia de los vientos de este - sureste, también es notable en determinada época del año.

Según Cabeza-Durango (2009), en el área se identifican dos períodos climáticos principales, llamados época seca (verano) y época húmeda (invierno) y una época de transición (Veranillo de San Juan). Es de resaltar, que aunque el clima tiende a ser caluroso todo el año, siempre hay buen viento. Los meses de Noviembre a Febrero son los más ventosos del año, favoreciendo la disminución de la temperatura ambiente.

Aunque Cartagena es una ciudad caribeña marítima, jamás es tocada por huracanes que si afectan a otras capitales del Caribe como La Habana, Santo Domingo, Kingston o San Juan. La razón de ello es que la ciudad está en una parte muy al sur del Caribe, y aislada



de las feroces corrientes huracanadas. El último huracán que pasó cerca de la ciudad fue Joanne en 1988, el cual vino debilitado luego de tomar tierra en Nicaragua.

Temperatura (°C)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Mínima promedio	22.9	23.1	23.6	24.6	24.9	25.0	24.7	24.9	24.7	24.4	24.4	23.5
Promedio	26.8	26.8	27.1	27.7	28.3	28.4	28.3	28.3	28.2	27.8	27.8	27.3
Máxima promedio	31.1	31.0	31.1	31.5	31.7	31.9	32.0	31.9	31.7	31.2	31.4	31.3
Precipitación, Brillo Solar y Humedad Relativa												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	8	1	1	29	92	115	94	124	143	244	132	37
Días lluvia	1	0	1	3	10	13	10	13	14	17	12	3
Humedad relativa (%)	79	78	78	79	81	81	80	81	81	82	82	81
Brillo Solar (horas/mes)	279	242	244	210	196	190	216	206	176	175	202	245
Evaporación (mm)	170	172	194	187	163	150	163	154	144	140	132	148
Datos promedios anuales medidos en: Aeropuerto Internacional Rafael Núñez	Evaporación	Temperatura			Precipitación			Brillo Solar				
		mm	Min °C	Med °C	Max °C	Total mm	Lluvia Días		Humedad %			
	1.917	24.2	27.7	31.5	1.021	95	80	245				

Cuadro 24. Climatología de Cartagena

Fuente: Tomado de CIOH (2009)

3.1.3. Temperatura y Precipitaciones

Las máximas temperaturas en la ciudad de Cartagena registran un promedio multianual de 31.5 °C según lo planteado por Cabeza-Durango (2009), presentando sus valores más altos en los meses de Junio, Julio y Agosto con promedios entre 31.9 °C y 32 °C, y sus valores más bajos entre los meses de Enero a Marzo con promedios entre 31 °C y 31.1 °C. En general, la temperatura promedio de la ciudad presenta sus valores más altos entre los meses de Mayo a Junio, con promedios entre 28.3 °C y 28.4 °C, de igual manera los valores más bajos se presentan durante los meses de Enero, Febrero y Marzo, oscilando entre 26.8 °C y 27.1 °C (ver figura 39).

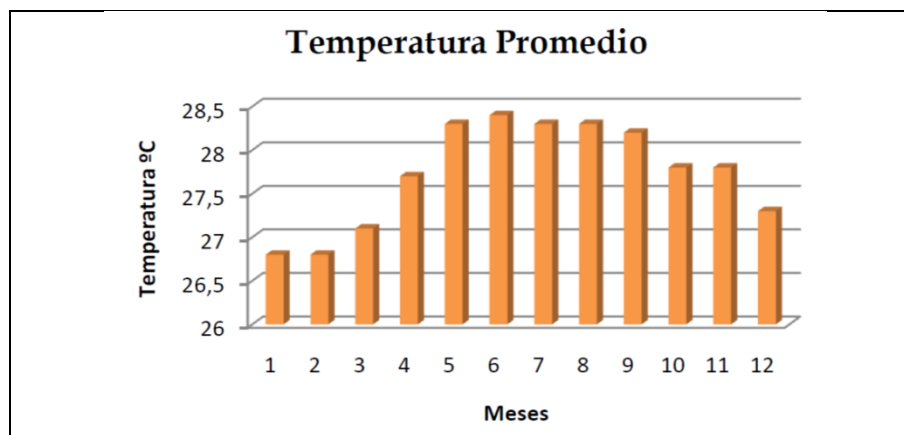


Figura 39. Temperatura Promedio Multianual

Fuente: Tomado de CIOH (2009)



En la ciudad de Cartagena, la época de humedad va desde el mes de Abril a Noviembre, incluso en ocasiones se extiende hasta la segunda semana del mes de Diciembre. La precipitación promedio oscila entre 29 y 244 mm/mes. El mes de Octubre se destaca como el período de más altos índices de pluviosidad con precipitaciones del orden de 244 mm/mes. El período seco usualmente transcurre entre los meses de Diciembre hasta Marzo, con promedios entre 1.0 y 37 mm/mes, según lo planteado por Cabeza-Durango (2009). Así mismo, el número de días con precipitación en un mes oscila entre 0 y 17 días, destacándose Septiembre y Octubre como los meses que tienen más días con precipitación con 13 y 17 días (ver figuras 40 y 41).

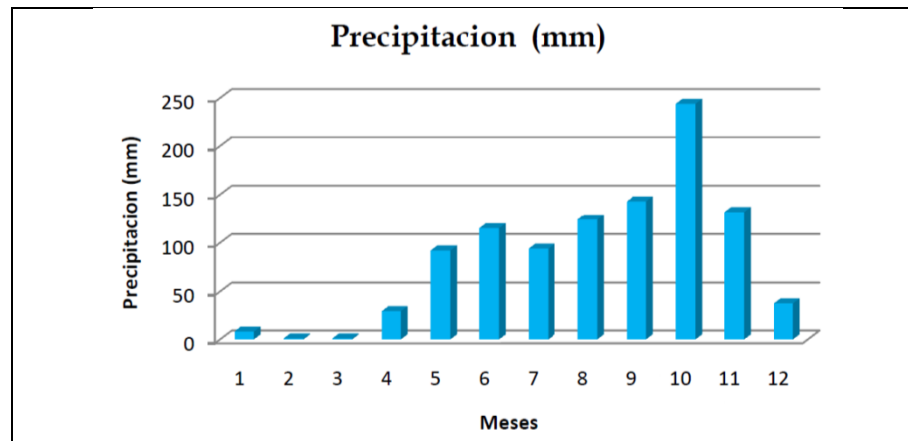


Figura 40. Promedio Multianual de Precipitación en mm
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

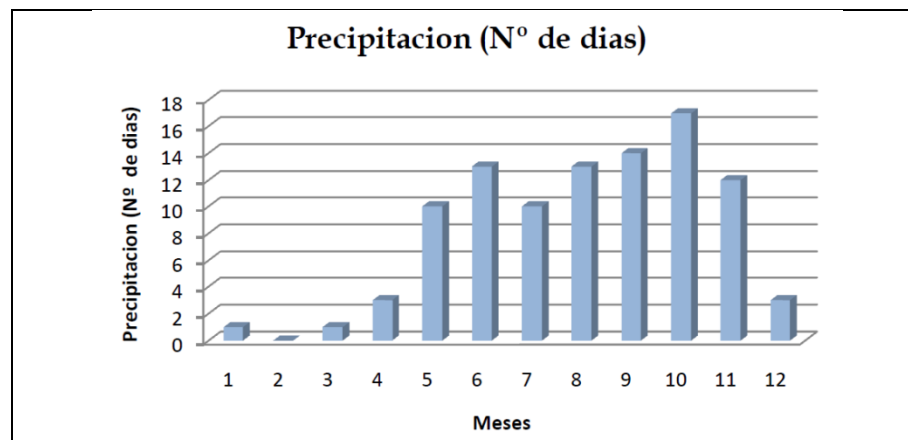


Figura 41. Promedio Multianual de número de días de precipitación
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

3.1.4. Humedad relativa, Brillo solar y Evaporación

Los mayores niveles de humedad se registran en los meses de Octubre y Noviembre con un 82% siendo los más lluviosos, le siguen Mayo, Junio, Agosto, Septiembre y Diciembre con 81%, y los de menor humedad son Febrero y Marzo con 78%, así mismo la media anual de humedad es de 80% (ver figura 42).

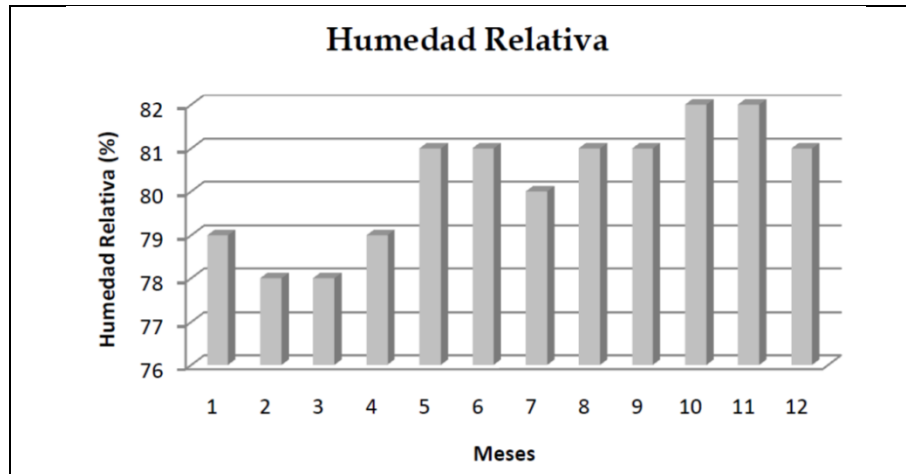


Figura 42. Promedio Multianual de Humedad Relativa
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

Los mayores valores promedios de brillo solar se presentan en los meses de Enero y Diciembre con 279 y 245 horas/mes respectivamente. Los meses con menos brillo solar son Septiembre y Octubre con 176 y 175 horas/mes respectivamente, lo cual se relaciona con el efecto de la nubosidad en época húmeda. El resto del año oscila entre 175 y 244 horas/mes (ver figura 43).

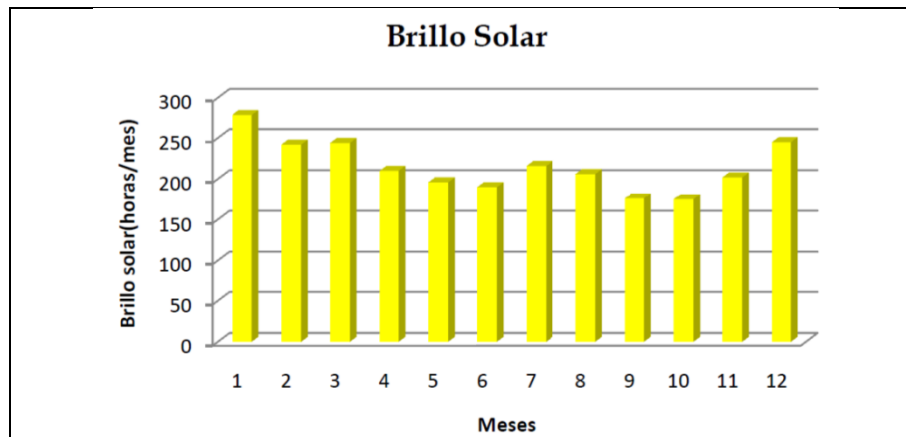


Figura 43. Promedio Multianual de Brillo Solar
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

El mes de mayor evaporación es Marzo con un promedio de unos 194 mm/mes y los meses con más baja evaporación son Septiembre, Octubre y Noviembre con un valor inferior a 150 mm/mes, siendo Noviembre el de menor evaporación con 132 mm/mes (Cabeza-Durango 2009), tal como se aprecia en la figura 44.

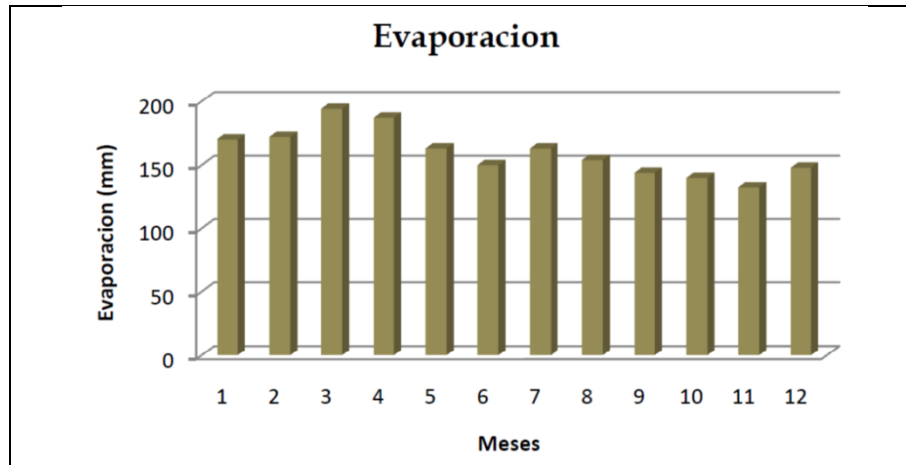


Figura 44. Promedio Multianual de Evaporación
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

3.1.5. Vientos y Marea

Durante la época seca que inicia desde el mes de Diciembre hasta Marzo, predomina un flujo de vientos alisios del noreste que se produce por el descenso del sistema de altas presiones de las Azores, las cuales interactúan con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En esta época los vientos oscilan entre 5 y 10 nudos de intensidad (ver figura 45) y en ocasiones sobrepasan estos valores alcanzando hasta los 30 nudos de intensidad (Cabeza-Durango 2009).

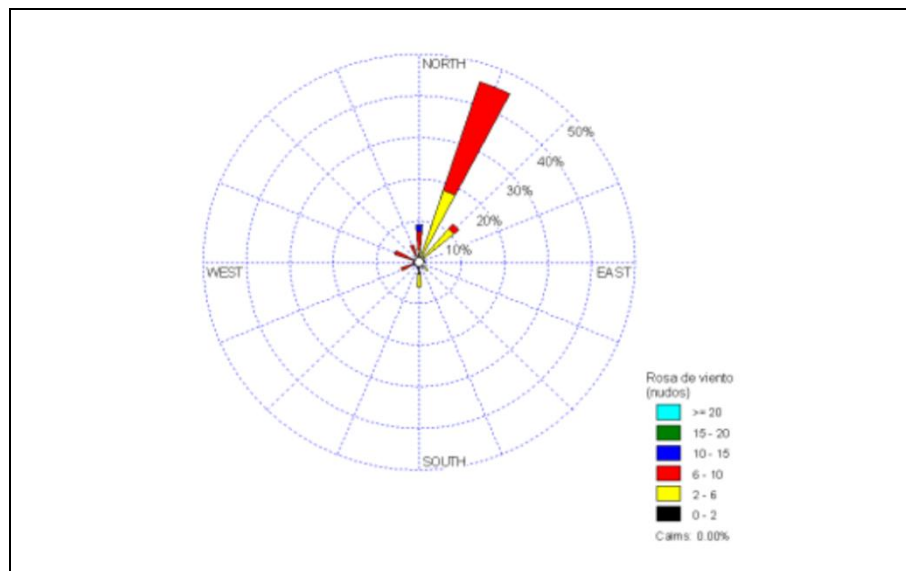


Figura 45. Rosa de Viento de la Época Seca
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

La época húmeda inicia cada año desde el mes de Agosto extendiéndose hasta Noviembre y primeros días del mes de Diciembre. Durante este lapso las condiciones atmosféricas se ven influenciadas por la disminución de los vientos de manera



considerable oscilando entre 2 y 5 nudos de intensidad y en raras ocasiones sobrepasando los 10 nudos (ver figura 46).

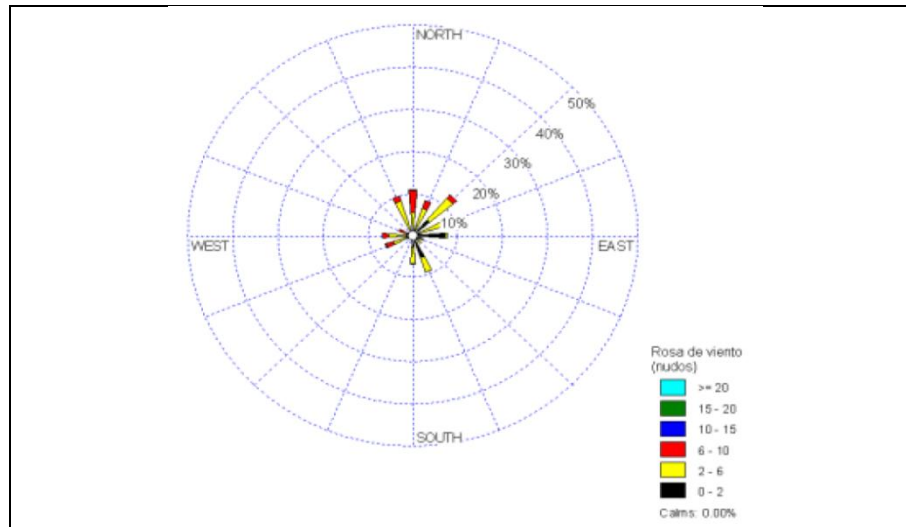


Figura 46. Rosa de Viento de la Época Húmeda
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

Durante la época de transición que inicia a finales del mes de Abril hasta el mes de Julio, se presenta una variabilidad en la dirección del viento que comienza siendo de dirección norte y luego a finales de esta época mantiene un predominio del sur con intensidades que oscilan entre 6 y 10 nudos (Cabeza-Durango 2009), como se aprecia en la figura 47. Esta época también la llaman Veranillo de San Juan.

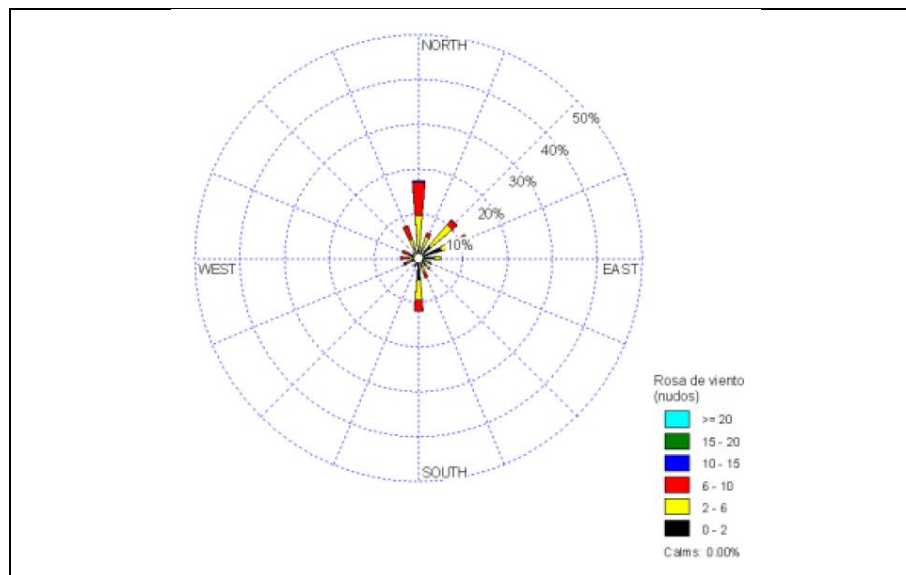


Figura 47. Rosa de Viento de la Época Húmeda
Fuente: Tomado de CIOH (2009)

Según POT (2001), los niveles de marea de Cartagena se caracterizan por un nivel medio de 0.012 m y presentan mediciones de pleamar media de 0.095 m y de bajamar media de 0.118 m. La pleamar más alta observada es del orden de 0.457 m, mientras que la bajamar más baja observada es de 0.396 m.



3.1.6. Recuento de Eventos de Amenazas Naturales

El análisis de las amenazas asociadas a fenómenos naturales en Cartagena se ha establecido a partir de una cronología de los desastres y emergencias que se recuerdan en tiempo reciente. Estos eventos se citan a continuación según lo consignado en el POT (2001) e información tomada de Carvajal (1996a y b) y Aguilar-Collazo y Jiménez, (2005).

Mar de leva y erosión:

- 1930: Retroceso notable en las playas de Marbella
- 1940: Afectación de las playas de Bocagrande entre calles 8 a 11.
- 1943: Afectación del malecón de la Andian
- 1966: Afectación del malecón de la Andian, comunicación directa del mar y la bahía en Bocagrande cerca al edificio Seguros Bolívar, comunicación directa del mar y la laguna del cabrero.
- 1987: Afectación del acueducto de la Boquilla, retroceso de playas en la Boquilla y afectación de malecón de la Andian (2 eventos).
- 1988: Ruptura de la barra - barrera de La Boquilla. Comunicación del mar y la bahía de Cartagena (Carvajal 1996b).
- 1992: Erosión intensa en algunos sectores de Crespo
- 1993: Erosión intensa en Crespo, afectación de terraplén del anillo vial (2 eventos).
- 1996: Erosión generalizada de las playas de La Boquilla y Bocagrande en 4 eventos (Carvajal 1996a).
- 2004: Erosión moderada desde Crespo hasta la Playa Sur de la Bocana (Aguilar-Collazo y Jiménez, 2005).
- 2010: Retroceso notable de la línea de costa de 50 metros en Bocagrande.

Huracanes y vendavales:

- 1989: El huracán Joanne se registra como la última tempestad en pasar más cerca de la ciudad hace casi 25 años, ocasionando fuertes lluvias e inundaciones en la ciudad y generando niveles de 1.0 a 1.1 metros de altura en la Ciénaga de la Virgen, llamada antes Ciénaga de Tesca.
- 1999: El huracán Lenny, se generó a 120 millas náuticas al noroeste de Cartagena desplazándose en dirección oeste-este, afectando a más de 400.000 personas en la costa Caribe.
- 2012: El último vendaval de importancia se presentó en Septiembre de 2012, generando daños materiales en 337 viviendas parcial o totalmente destechadas, fallas del fluido eléctrico y 70 árboles caídos.

Movimientos en Masa:

- Diciembre de 1993 y Noviembre de 1994: Deslizamientos en la loma del Marión, sector Nuevo Bosque Las Colinas y Manzanares con 41 casas destruidas y desestabilización de la ladera por excavaciones hechas sin control.
- 2009: Deslizamientos en el barrio Lo Amador, loma del Diamante y cerro de La Popa, sector sur del Salto del Cabrón y loma del Peyé, sector suroriental.
- 2010: Deslizamientos en la loma del Marión sector Nueva Granada y Manzanares.
- 2011: Movimiento en Masa notable en el barrio San Francisco con la destrucción de más de 1500 viviendas y 1200 familias afectadas.



- 2012: Deslizamientos en una estribación del cerro de La Popa, en el sector Rincón Guapo y en la loma del Marión, sector Piedra de Bolívar.
- Deslizamientos periódicos en la época de invierno, especialmente en la zona de cerros (de Mayo a Octubre).
- Inestabilidad periódica de Taludes de los cerros de La Popa y Albornoz por la explotación de materiales para la construcción.

Inundaciones:

- 1987: Inundación sector Villa Rosita
- Inundaciones periódicas en barrios bajos como la Boquilla, Villa Gloria, Mar Linda y Policarpa con niveles hasta de 2,5 metros.
- Inundaciones periódicas por lluvias especialmente en los barrios del sector suroriental de la Ciénaga de la Virgen, en El Pozón, Isla de León, San Pedro, Socorro, Blas de Lezo, Policarpa, Mamonal, Villas de la Victoria, Las Palmeras, Villa Hermosa, Villa Rosita, San José de los Campanos.
- Inundaciones por ascenso del nivel del mar en el Centro Histórico de la ciudad, Bocagrande, Laguito y Castillogrande.

Volcanes de lodo:

- Mayo de 1996: Erupción de un "volcán de lodo" cerca del corregimiento de Bayunca, en la finca Bajo Grande, cuyo nombre fue dado al volcán. Según Carvajal (1996a) se presentó emanación de gas metano y grietas en el terreno formando una especie de meseta de lodo, en un diámetro de 200 m y una altura de 2.5 m. Cerca habitaban unas 50 familias y 150 personas quienes afirmaban que desde hacía por lo menos 50 años este volcán estaba inactivo. Este volcán se relaciona litológicamente con la Formación Bayunca en una zona donde las estructuras radiales antiguas son frecuentes.
- Diciembre de 1997: Erupción del "volcán de lodo" Bajo Grande en forma de meseta de lodo en 60 m a la redonda y una altura de 0.5 m.
- Mayo de 2012: Erupción del "volcán de lodo" Bajo Grande también llamado "El Reposo" en el corregimiento de Bayunca, cubrió 2 hectáreas de terreno. Según los moradores del área es la cuarta vez en los últimos 12 años que el volcán hace erupción.
- Diciembre de 2012: Erupción local del "volcán de lodo" de El Rodeo ocasionó averías menores en algunas viviendas de la Urbanización El Rodeo e infraestructura relacionada.

3.2. Geología de Cartagena

En la ciudad de Cartagena afloran rocas consolidadas de origen sedimentario marino de la era Terciaria o Cenozoica. De acuerdo con el Mapa Geológico de Colombia (ver figura 48) definido por Ingeominas (2007), estas rocas del Cenozoico pertenecen al Período Neógeno y época Mioceno medio (N1-Sm) entre el Serravaliano y Langhiano, lo cual indica que tienen una edad aproximada de 5 a 65 millones de años. Hacia el oriente de Cartagena pasando la falla inversa del Sinú también afloran rocas sedimentarias marinas del Cenozoico relacionadas con la Formación Arjona, de mayor edad, provenientes del Período Paleógeno y época Eoceno (E-Sm) durante el lutetiano.



Las rocas terciarias del área han sido agrupadas en las denominadas Formación La Popa y Formación Bayunca (Ingeominas 2001b), las cuales serán descritas más adelante y adicionalmente hacia el oriente de la zona como se mencionó antes se encuentra la Formación Arjona que corresponde principalmente a lodolitas silíceas, cherts, areniscas y arcillolitas.

En la franja litoral de la ciudad se han formado extensas acumulaciones de sedimentos semiconsolidados y no consolidados asignados al período Cuaternario, las cuales tienen una edad inferior a 5 millones de años. Algunos sedimentos variados fueron depositados durante el periodo Holoceno en la franja litoral, por lo tanto tienen una edad inferior a 10.000 años.

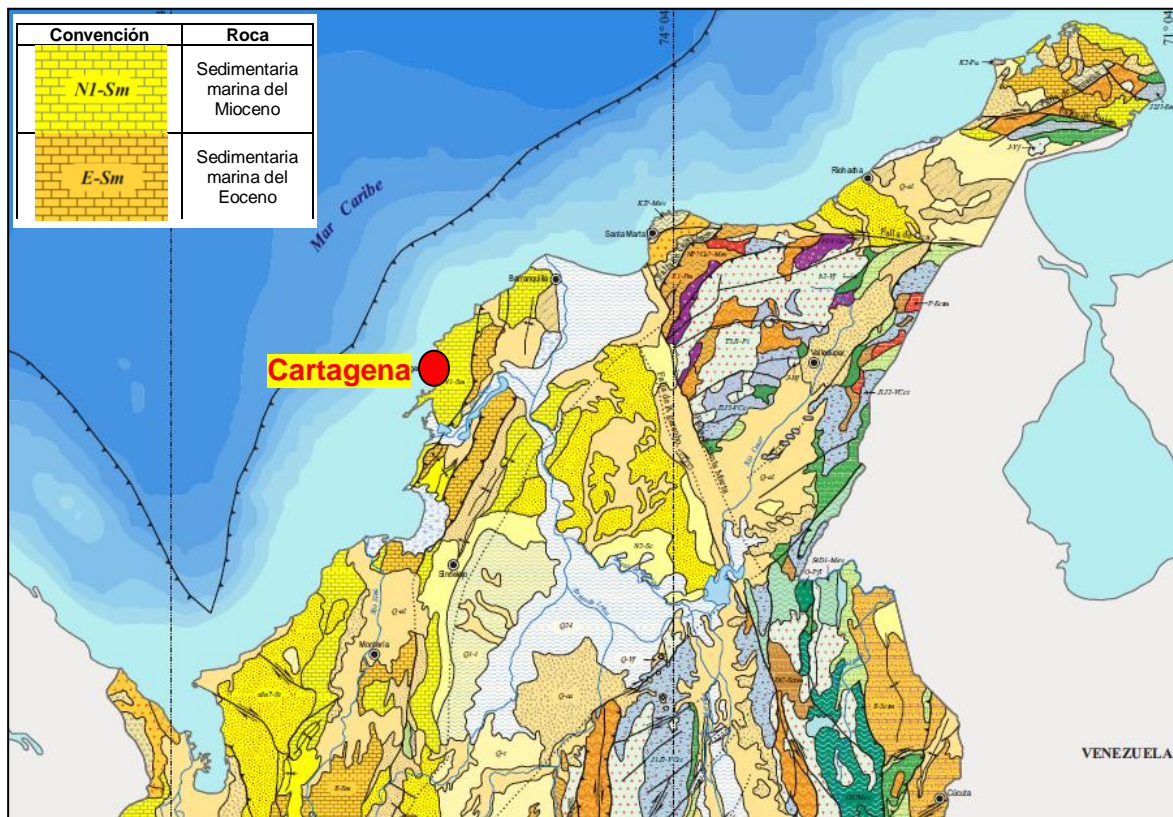


Figura 48. Mapa Geológico de Colombia - Región Caribe

Fuente: Tomado de Ingeominas (2007)

Estos depósitos del Cuaternario según el POT (2001) están representados por depósitos de denudación del relieve costero, y por un amplio espectro de rocas y sedimentos de ambientes marinos y transicionales que incluyen arenas, arcillas calcáreas y calizas de ambientes arrecifales y arenas, lodos y arcillas de ambientes de plataforma somera, playas y ambientes lagunares, del mismo modo comprenden depósitos marinos, de playa, intermareales, aluviales y coluviales que se localizan intercalados en las diferentes formaciones o conformando geofomas características de la zona costera.



3.2.1. Marco Geológico Regional

La ciudad de Cartagena a nivel regional se ubica en un terreno con características litológicas y estructurales muy particulares, llamado Cinturón del Sinú (Ingeominas 2001a). El Cinturón del Sinú es una provincia geomorfológica y geológica que se extiende en su totalidad desde el golfo de Urabá hasta Barranquilla, cubriendo tanto zonas continentales como de plataforma y talud continental (SGC 2010), se halla limitado hacia el oriente por el lineamiento Falla del Sinú que lo separa del Cinturón de San Jacinto (Duque-Caro 1979), al occidente está definido por el límite de plataforma y talud continental llamado lineamiento Colombia o Cinturón deformado del Caribe Meridional (Duque-Caro 1979, Ingeominas 1993) y al suroccidente por la falla de Uramita.

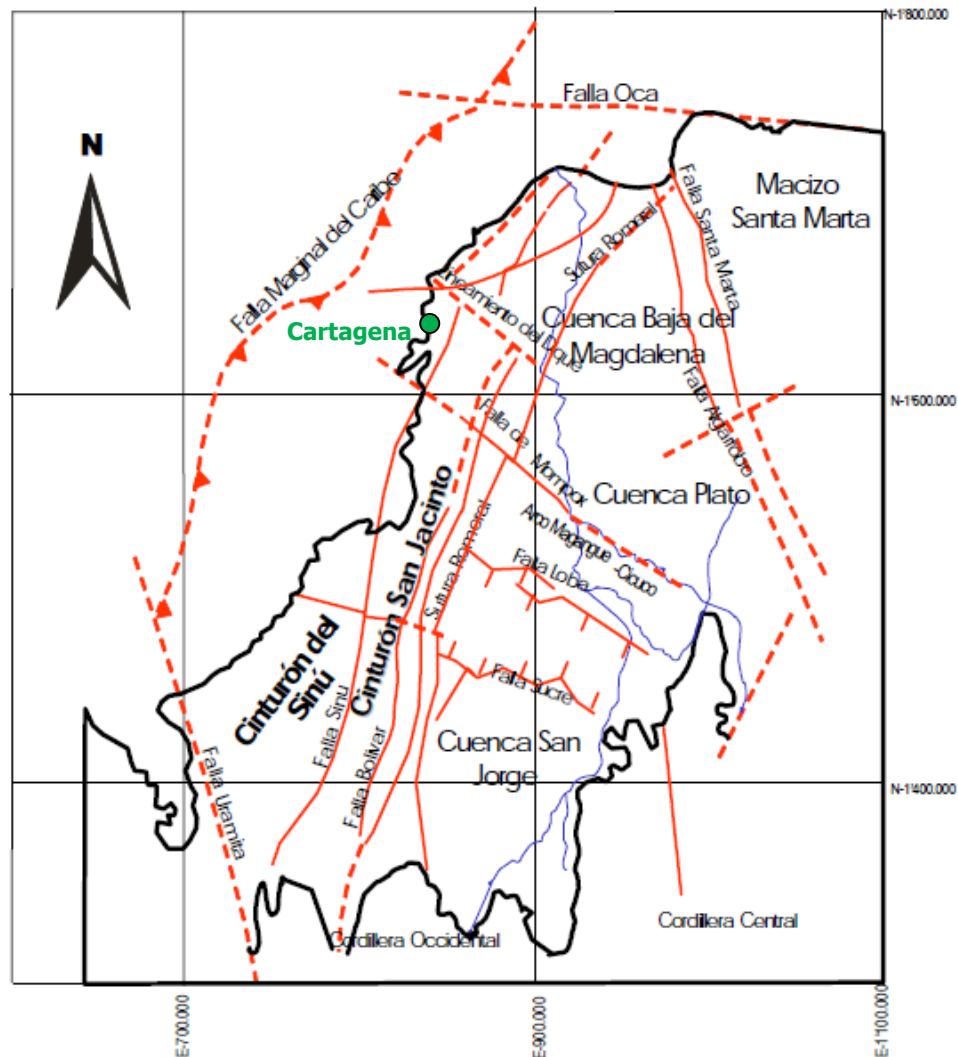


Figura 49. Rasgos Estructurales de la Región Caribe Colombiana
Fuente: Tomado de Ingeominas (2004) y modificado de Duque-Caro (1979)

La zona de influencia del Cinturón del Sinú muestra una disposición elongada en dirección noreste por efecto de probables fallas transcurrentes o de rumbo de dirección NW-SE (SGC 2010) y está constituido por una secuencia de rocas de origen marino profundo, turbidítico, de más de 5000 m de espesor y de edad entre el Mioceno superior



y el Plioceno inferior. Suprayaciendo, se encuentra un conjunto de rocas de origen marino somero y carbonatadas hasta de 1000 m de espesor y de edad del Plioceno superior - Holoceno (Duque-Caro 1979).

Posteriormente Duque-Caro (1980) especifica que las rocas que conforman el Cinturón del Sinú en sus primeros 5000 m de espesor corresponden a facies pelagitas y hemipelagitas, lodolitas calcáreas y silíceas, chert y turbiditas muy finas de edad Mioceno Superior - Plioceno, cubiertas por calizas arrecifales, arcillolitas, areniscas y conglomerados que pueden localmente alcanzar los 4000 m de espesor. Duque-Caro (1984) considera que la secuencia sedimentaria del Cinturón del Sinú es de casi 8 Km de espesor total.

Para Duque-Caro (1984) el Cinturón del Sinú está compuesto por dos tipos de geoformas: Colinas grandes y cónicas de estratos deformados y Masas cónicas de lodo. La primera geoforma aumenta de altura hacia el sur, caracterizan los anticlinorios de Turbaco y de Abibe-Las Palomas, cuya zona axial exhibe la máxima deformación del Cinturón del Sinú. En el estilo estructural característico del Cinturón del Sinú se destacan formas radiales compuestas de estructuras anticlinales estrechas, pendientes y alargadas siempre coincidentes con las formas topográficas más altas, separados por sinclinales amplios y arqueados. Las Masas cónicas de lodo emergen aisladas, principalmente a lo largo de las zonas mayores de falla, siguiendo el rumbo general del Cinturón. Un ejemplo de estas geoformas son los volcanes de lodo que se manifiestan en El Rodeo, Cañaveral, El Totumo, entre otros sitios.

□ **Volcanismo de lodo**

Las rocas localizadas en el Cinturón del Sinú con frecuencia se asocian con fenómenos de "volcanismo de lodo", como es el caso de la ciudad de Cartagena, que incluye áreas terrestres y marinas, tanto en la plataforma, como en la zona emergida, donde es bastante común la presencia de estructuras diapíricas. Es característico en las rocas del Cinturón del Sinú, la conformación de sinclinales amplios limitados por anticlinales estrechos, asociados localmente a fallamientos inversos, donde se presentan los "volcanes de lodo" y las estructuras dómicas producto del efecto del llamado Diapirismo de lodo (SGC 2010).

El "volcanismo de lodo" se puede considerar geológicamente como una manifestación de diapirismo (SGC 2010), fenómeno que se define como un proceso sedimentario en el cual un material de baja densidad y alto contenido de gases (lodos de origen marino), sometido a grandes presiones por el efecto del peso de la cobertura de materiales de mayor densidad (arenas, gravas y limos), tiende a salir al exterior generando levantamientos e intrusiones en el terreno suprayacente. Esta situación según LEHUN-CM-I (2005) se manifiesta en la superficie del terreno con la formación de domos y con la generación de los "volcanes de lodo" cuando este material proveniente de profundidad encuentra salidas por zonas de fracturas o debilidad.

En el caso de la ciudad de Cartagena se destaca la incidencia del proceso diapírico en la formación de los cerros de la Popa y de Albornoz y de la loma del Marión, así como de los "volcanes de lodo" localizados en el barrio El Rodeo, en los corregimientos de Bayunca y Arroyo de Piedra, Isla de Barú, Vereda de Membrillal e Isla Tesoro. Vernette y otros (1990) establecen la relación estructural del frente de deformación sur del Caribe y la plataforma continental frente a Cartagena, evidenciando la conformación de bloques definidos por movimientos transcurrentes. SGC (2010) destaca particularmente el bloque



de Cartagena limitado por las fallas de las Canoas y Rosario al norte y al sur respectivamente, indicando igualmente la influencia del fenómeno del diapirismo de lodo en la génesis de las islas de carácter arrecifal presentes en la zona (ver figura 50).

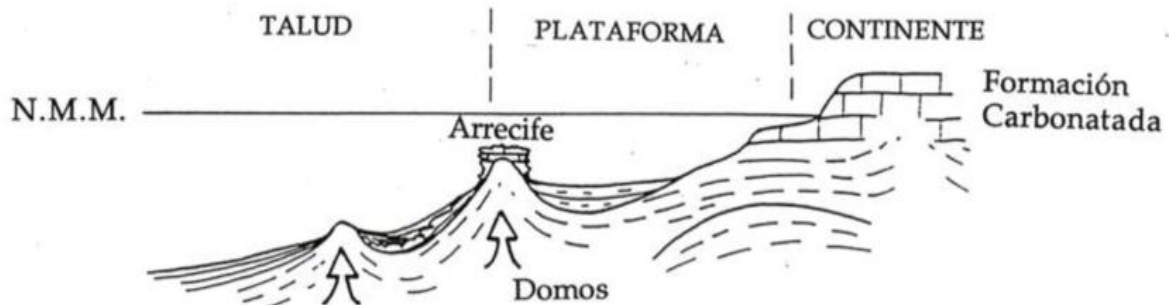


Figura 50. Fenómenos diapíricos en el sector del Cinturón del Sinú

Fuente: Tomado de Vernet (2003)

Vernet (2003) explica el impacto del diapirismo de lodo sobre los procesos de sedimentación y afirma que el cerro de La Popa, principal geoforma de la ciudad de Cartagena, presenta una formación carbonatada en su tope (lugar donde se localiza el Convento Colonial de la Orden de Agustinos Recoletos), producto de los fenómenos diapíricos.

3.2.2. Litoestratigrafía Regional

La ciudad de Cartagena está influenciada geológicamente por la estratigrafía del Cinturón del Sinú, el cual ha sido denominado Bloque Tectónico de Turbaco hacia el sector norte (Reyes y Clavijo 1996) y se localiza en el costado oriental de Cartagena. En la figura 51 se muestra una columna estratigráfica generalizada de 1 Km de espesor del Cinturón del Sinú que identifica las formaciones Arjona, Bayunca, Arroyo Grande y La Popa, las cuales afloran de la más antigua a la más joven según lo planteado por Ingeominas (2001b). En el caso del casco urbano de Cartagena las formaciones Bayunca y La Popa afloran de modo predominante (ver figura 52) por ello se describen a continuación.

□ Formación Bayunca (Ngb)

La Formación Bayunca data del período Neógeno en una época comprendida entre el Mioceno medio y el Plioceno, tiene una morfología suave, de ondulada a plana, y aunque Ingeominas (2001b) hace su descripción con base en afloramientos aislados ubicados entre el corregimiento de Pasacaballos y el barrio de Albornoz, se presentan a nivel regional afloramientos importantes a manera de parches en la loma del colegio de La Salle (barrio Torices), al suroriente de la ciudad hacia los barrios Los Calamares, Country, Tacarigua, Los Ejecutivos, Los Caracoles, Las Gaviotas, La Castellana y Los Alpes y al oriente hacia el sector de Villa Rosita.

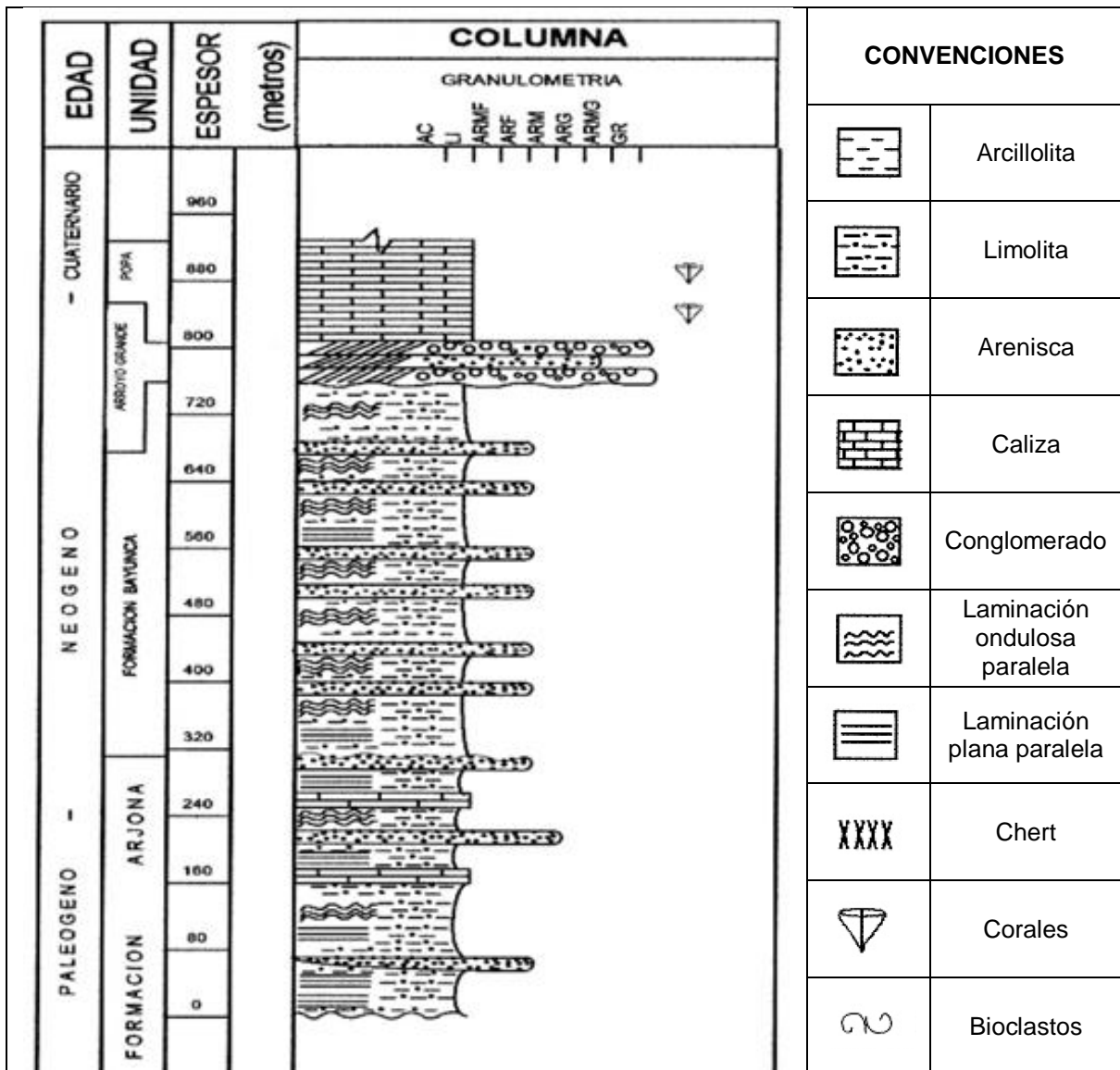


Figura 51. Columna Estratigráfica Generalizada del Cinturón de Sinú

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001b)

En general, según Ingeominas (2001b) esta unidad se encuentra constituida por una secuencia de lodolitas de color gris oscuro, con tonalidades claras y negras, con niveles de oxidación de color amarillo, en capas delgadas y medianas, y laminación interna ondulosa discontinua. De acuerdo con SGC (2010) hacia la base aparecen areniscas de color gris, de grano muy fino, dispuestas en capas delgadas a medianas, interestratificadas con capas delgadas de limolitas y lodolitas de color gris a pardo, manchadas y con huellas de bioturbación (bivalvos y turrítelas), y capas nodulares interpuestas de areniscas calcáreas de grano fino. Son frecuentes las lodolitas moteadas bioturbadas; según Ingeominas (2001b) la secuencia presenta intercalaciones de limolitas grises pasando a pardas, en capas delgadas, principalmente hacia el techo de la unidad donde se observan intercalaciones de areniscas de cuarzo, de grano grueso a conglomerática, de color gris claro y amarillo claro. Las areniscas conglomeráticas son líticas, en capas delgadas y gruesas, estratificación inclinada, flaser, plana paralela y maciza.



En la Formación Bayunca son frecuentes las capas de areniscas con cemento calcáreo y contenido alto de conchas de moluscos y restos de plantas (Ingeominas 2001b). En toda la secuencia es común encontrar yeso en láminas que rellenan fracturas con disposición estratiforme. El espesor de esta formación no se conoce, pero se puede estimar en por lo menos 500 m, aunque por estar plegada y fallada, éste podría variar. Según Guzmán et al. (2004) en SGC (2010) el espesor promedio medido es de 135 m. Aunque el límite inferior de la Formación Bayunca es desconocido, de acuerdo con lo planteado por SGC (2010), se sabe que su límite superior es discordante con la Formación La Popa y con la Formación Arroyo Grande.

□ **Formación La Popa (Qpp)**

La determinación de la edad de la Formación La Popa ha sufrido muchos cambios desde sus primeros intentos de datación a principios del siglo XX hasta hoy, a través de varios autores según lo planteado por Ingeominas (2001b), entre ellos Link (1927), Anderson (1929) en De porta et al. (1974), Royo y González (1950), Solé De Porta (1960), Duque-Caro (1967) y Guzmán (2003), sin embargo es el mismo Ingeominas (2001b) que considera que esta formación pertenece al período Cuaternario en la época del Pleistoceno inferior. Inicialmente la Formación La Popa es descrita por Anderson (1929) en Ingeominas (2001b) como un conjunto de shales arenosos, areniscas con corales y arrecifes coralinos (*La Popa Group*) expuestos en los alrededores de Cartagena, pero con el tiempo es redefinida por Bürgl (1957) en Ingeominas (2001b) como un conjunto de arcillas micáceas, arenosas y areniscas y calizas coralinas con un espesor de 150 m.

La Formación La Popa fue dividida según Ángel et al. (1985) en dos miembros, el inferior de origen detrítico y el superior de origen calcáreo. Este autor utiliza el nombre de Unidad Detrítica de La Popa para llamar al miembro inferior, mientras que el miembro superior lo llama Calizas Arrecifales del Popa. Siguiendo lo planteado por Ángel et al. (1985), Ingeominas (2001a) denomina al miembro inferior de esta formación, Unidad Detrítica de La Popa, mientras que el miembro superior es denominado Unidad Calcárea de La Popa. Posteriormente Ingeominas (2001b) utiliza los términos Formación Arroyo Grande para referirse al miembro inferior.

Para Carvajal (2012), la Unidad Detrítica de La Popa (o miembro inferior) es llamada Formación Bayunca y como tal se considera que ya no pertenece a la Formación La Popa, ni se relaciona con la Formación Arroyo Grande.

Aunque los miembros de la Formación La Popa definidos en un principio han sido llamados de diversas formas según se ha avanzado en su estudio, en este documento se prefiere utilizar los términos Formación Detrítica Bayunca para referirse al miembro inferior y Formación Calcárea de La Popa para referirse al miembro superior.

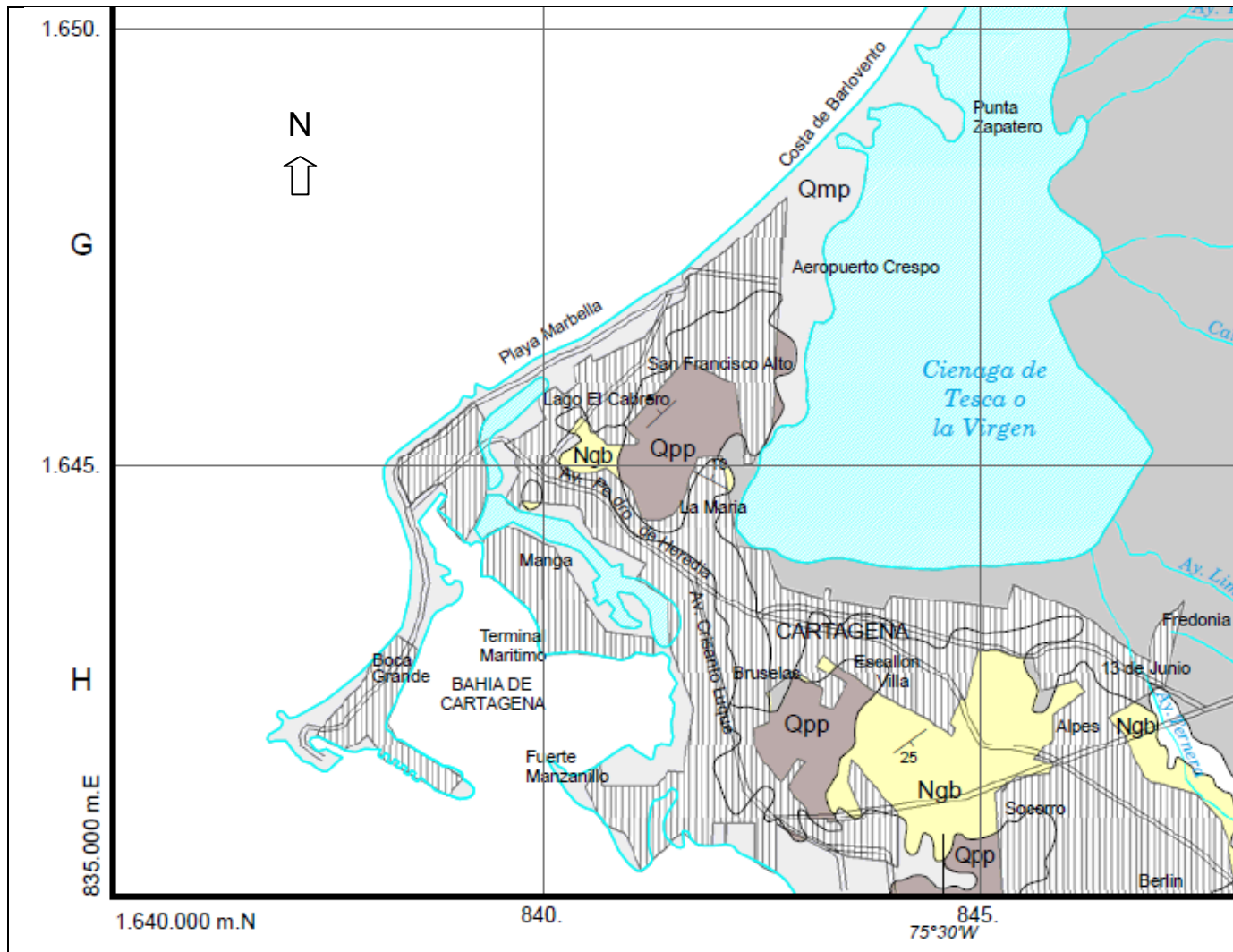


Figura 52. Mapa de Geología regional de Cartagena
Fuente: Tomado de Ingeominas (2003)



Las rocas de la Formación Calcárea de La Popa afloran principalmente en los cerros de la ciudad (La Popa, Marión y Albornoz) y en sus alrededores, así como en las Islas de Tierra Bomba y Barú. Se destaca la cercanía de esta formación con la Ciénaga de la Virgen en las estribaciones del cerro de La Popa (loma del Guerrero y loma del Peyé) hacia el barrio San Francisco y La María.

Hacia la línea de costa de las zonas de Bocagrande, Laguito, Islas de Manzanillo y Manga, Las Tenazas, El Cabrero, Marbella, Crespo, Boquilla y Zona Norte (Costa de Barlovento) se evidencian superficialmente **depósitos de playa (Qmp)**, que se han formado por efecto de la acumulación de material de predominio arenoso por la sedimentación causada por la acción dinámica del mar. También se detectan este tipo de depósitos en sectores de la Isla de Manga y el Fuerte de Manzanillo.

3.2.3. Litoestratigrafía Local

En el casco urbano de Cartagena se destacan a nivel litológico los afloramientos rocosos del Cenozoico correspondientes según Ingeominas (2001a) a la Formación Calcárea de La Popa, en la que subyace la Formación Detrítica Bayunca. Discordante sobre estas rocas se encuentran depósitos del período Cuaternario de origen marino y continental como son los depósitos de playa y de playón, depósitos intermareales, sustratos de manglar, dunas temporales, así como depósitos de tipo aluvial, coluvio-aluvial y de coluvión.

La información de litología que es consignada a continuación, fue extraída del estudio elaborado por Ingeominas (2001a) en la ciudad de Cartagena y ha sido complementada en algunos apartes usando información generada por Ángel et al. (1985), Carvajal y Pérez (1993), Middleton y McKee (2001), Mancera (2003), Aguilar-Collazo y Jiménez (2005), Travieso (2005), Aristizabal et al. (2009), Carvajal (1999, 2012), Servicio Geológico Colombiano, SGC (2010) y Barboza (2013).

□ Formación Detrítica Bayunca

La unidad rocosa de mayor cobertura en el área urbana de Cartagena con aproximadamente 22 Km² de extensión es la Unidad Detrítica de La Popa (Ingeominas 2001a), la cual también es llamada Formación Bayunca (Carvajal 2012) y se denominará en adelante Formación Detrítica Bayunca. Según Ingeominas (2001a) esta formación se caracteriza por su morfología de lomas de suave pendiente a ondulada, donde prevalece un drenaje radial dendrítico muy espaciado.

De acuerdo con las características litológicas de esta formación, se puede subdividir desde la base hasta el tope en tres conjuntos siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001a) en:

- Conjunto Inferior de la Formación Detrítica Bayunca (T2-3)
- Conjunto Intermedio de la Formación Detrítica Bayunca (T2-2)
- Conjunto Superior de la Formación Detrítica Bayunca (T2-1)

Conjunto Inferior (T2-3): Este conjunto aflora especialmente hacia el sur de la ciénaga de la Virgen, en algunas zonas de los barrios Zaragocilla, Olaya Herrera, Los Calamares (sector occidental), Escallón Villa, La Campiña, Nuevo Bosque, Barlovento, Chiquinquirá,



Armenia, España, terrenos del SENA (4 vientos), República de Venezuela, en el Sector Unidad Deportiva Fidel Mendoza Carrasquilla.

Igualmente se presenta hacia la base del cerro de La Popa, especialmente en algunos sectores de los barrios Torices (sector Paseo de Bolívar), Espinal, Lo Amador, Las Delicias, lomas de San Blas y hacia el flanco oriental del mismo (sector El Cielo, Puerto de Pescadores, Lomas del Cielo, Obrero y en un sector del barrio La Esperanza). Finalmente se presenta al suroriente de la ciudad, en cercanías a la Universidad Tecnológica de Bolívar y en terrenos de la Empresa Tenaris Tubocaribe.

El conjunto (T2-3) cubre según Ingeominas (2001a) un área total de 4,5 Km² y corresponde a una alternancia de arcillolitas y limolitas de color gris oscuro en capas de 1 a 2 cm con intercalaciones de arenisca arcillosa de color gris pardo y grano fino. Es común la presencia de yeso en venas diagonales y capas hasta de 20 cm de espesor y lentes limolíticos de color rojizo de espesor entre 1 y 2 cm; del mismo modo se encuentran concreciones areníticas ovaladas de color pardo amarillento con un diámetro mayor que varía de 10 a 70 cm.

Al sur de la ciénaga de la Virgen, hacia los barrios La Campiña y Escallón Villa, este conjunto se presenta más arenoso, observándose capas de arenisca de grano fino, color pardo grisáceo claro y de composición cuarzofeldespática con abundancia de biotita, donde es común la estratificación ondulada y paralela. Hacia el barrio República de Venezuela y Nuevo Bosque, por el contrario, este conjunto se caracteriza por ser predominantemente arcilloso y de color gris oscuro, donde es muy común la presencia de yeso tanto diseminado como en fracturas y venas, con concentraciones locales de azufre en vetas amarillas. En el área suroriental de la ciudad (sector de la Universidad Tecnológica de Bolívar), también se encuentran intercalaciones de arenisca calcárea de color amarillo rojizo, muy fosilíferas en capas de 5 a 10 cm. En el sector Norte del antiguo basurero de Henequén (hoy invadido) se encuentran arcillolitas plásticas de color gris con abundancia de yeso que localmente intruyen rocas de la Formación Calcárea de La Popa, sin embargo debido a la poca extensión de esta litología no aparece cartografiada a escala (Ingeominas 2001a).

Con base en un análisis composicional realizado por Ingeominas (2001a) sobre algunas arcillas pertenecientes a este conjunto, se encontró que estas arcillas se constituyen predominantemente de vermiculita con altos porcentajes locales de caolinita y bajos porcentajes de montmorillonita; tal composición le confiere al terreno una expansividad localmente muy alta.

Debido a la escasez de afloramientos del Conjunto Inferior (T2-3), Ingeominas (2001a) no pudo medir su espesor, sin embargo, con base en cortes geológicos realizados, este conjunto puede sobrepasar los 300 m. Ángel et al. (1985) en Ingeominas (2001a) llaman la atención sobre las variaciones notables en el espesor de este segmento litológico, el cual sobrepasa los 100 m en la Isla Barú, mientras hacia el oriente en cercanías al municipio vecino de Santa Rosa de Lima probablemente no alcanza los 200 m.

Conjunto Intermedio (T2-2): Este conjunto aflora principalmente hacia la parte intermedia del cerro de La Popa, en algunos sectores de los barrios Nariño (sector lomas del Rosario), Lo Amador, Las Delicias y El Cielo, así como en dos estribaciones importantes del cerro de La Popa como la loma del Colegio de La Salle que limita con la Urbanización La Española y alberga parte del Sector Paseo de Bolívar y la loma del Peyé, en el sitio



donde se localizan los barrios San Bernardo y La María, sector Los Corales. Igualmente se presenta en parte de La Esperanza y en algunos sectores de los barrios Bruselas y Amberes, así como en una franja de dirección Noroeste en los barrios Los Calamares, Los Ejecutivos, Las Gaviotas y Camaguey. Por último este conjunto se presenta hacia el sur de la ciudad en zona de influencia del cerro de Albornoz, en algunos sectores de desarrollo subnormal del barrio Nelson Mandela y en áreas del antiguo relleno sanitario de Cartagena donde se levantaron hace por lo menos 6 años los asentamientos de Henequén y 3 de Junio.

El conjunto (T2-2) según Ingeominas (2001a) tiene una extensión aproximada de 4,5 Km² y se encuentra constituido hacia la base por areniscas arcillosas de grano muy fino, color pardo grisáceo, con niveles de concreciones arenosas calcáreas hasta de 40 cm de diámetro, especialmente en el barrio La María, sector Los Corales.

En los barrios La Sierrita y Zaragocilla (sector Sur de la Ciénaga de la Virgen) según Ingeominas (2001a) se presentan intercalaciones de limolitas grises y arcillolitas rojizas en capas de 1 a 3 cm que conforman bancos hasta de 1 m, mientras en el sector del antiguo basurero de Henequén cerca de Albornoz y el barrio Nelson Mandela, estos bancos pueden alcanzar los 10 m de espesor. Así mismo, se encuentran esporádicamente niveles delgados de arenisca calcárea de 5 a 20 cm de espesor, de grano fino, de color gris claro y con estratificación ondulosa.

Hacia la parte media superior del Conjunto (T2-2), a nivel local se encuentran bancos de arenisca, de grano fino a conglomerático, de color amarillo pardo, de aproximadamente 12 m de espesor, cuya característica principal es el desarrollo de estratificación cruzada a gran escala. Estos bancos que corresponden a paleocanales, aparecen en el barrio La Esperanza al oriente del cerro de La Popa, en el barrio Los Calamares y en el sector del antiguo basurero de Henequén. Hacia la parte superior del conjunto (T2-2), es común la presencia de areniscas arcillosas de grano fino y arcillolitas limosas de color gris pardo y gris en capa de 20 cm de espesor, en donde es común la abundancia de gravas subredondeadas de tamaño entre 1 y 3 cm, especialmente en los barrios Los Calamares, Los Almendros y Camaguey, donde se constituyen en una franja antiguamente explotada de manera artesanal para extraer materiales de construcción (Ingeominas 2001a).

A nivel composicional las areniscas encontradas por Ingeominas (2001a) son cuarzofeldespáticas con abundancia de micas diseminadas (moscovita), la composición de las gravas (chinas) corresponde a chert pardo y negro, y cuarzo lechoso. Es típica del Conjunto (T2-2) la alta friabilidad local (deleznablez) de las rocas que permite su fácil excavación. El espesor de este conjunto rocoso alcanza los 65 m. De acuerdo a sus características litológicas, la compacidad relativa de las areniscas varía entre suelta y media.

Conjunto Superior (T2-1): El Conjunto (T2-1) aflora especialmente al sureste de la ciudad, en los barrios Los Corales, Los Caracoles, Almirante Colón, La Troncal, Buenos Aires, Los Almendros, Tacarigua, El Carmen, Villa Sandra I y II, El Rubí, Los Ángeles, La Floresta, Las Gaviotas, San Antonio, Chipre, La Caracola, Contadora, Chapacué, Nuevo Porvenir, El Gallo, Socorro, Plan 400, algunos sectores de Los Alpes, Blas de Lezo, San Fernando y La Consolata, Santa Mónica, La Plazuela, Sector Alameda La Victoria, Simón Bolívar, 11 de Noviembre, Santa Lucía, Sector El Amparo, La Concepción, Ternera, La Princesa, Beirut, El Recreo, Ciudad Sevilla y Villa del Sol.



Igualmente, aflora al suroeste del cerro de La Popa hacia los barrios Lo Amador y Nariño, aproximadamente entre las cotas 80 y 100; hacia la base de la loma del Diamante en el barrio Torices; en un sector del barrio San Bernardo al oeste de la loma del Peyé y hacia la base del cerro de Albornoz, especialmente en el sector de Arroz Barato. Finalmente este conjunto se presenta hacia la Terminal de Transporte de Cartagena, en zona de influencia de la Vía Campaña entre la Vía La Cordialidad y la Variante de Cartagena; se destaca que hacia la Variante donde aflora esta formación han sido construidas algunas etapas del proyecto de viviendas llamado Urbanización Horizonte.

Según Ingeominas (2001a) el conjunto (T2-1) cubre en total una extensión aproximada de 8 Km² y es de constitución predominantemente arcillosa; presenta hacia la base una secuencia de areniscas arcillosas conglomeráticas con niveles delgados de 5 a 10 cm de arcillolitas y limolitas grises y pardas, especialmente en el sector de Los Almendros - La Floresta. En la parte media se encuentra una sucesión monótona de arcillolitas plásticas de color gris y limolitas pardas en capas de 1 a 5 cm, con intercalaciones de areniscas arcillosas color pardo amarillento y grano muy fino de un espesor entre 1 y 5 cm. En el sector de la Vía Campaña entre la Vía La Cordialidad y la Variante de Cartagena en cercanías a la Terminal de Transportes, las arcillolitas y limolitas se encuentran intercaladas con niveles de areniscas friables de color gris claro y grano fino, de un espesor de 10 a 70 cm. Es común en esta parte del conjunto la estratificación paralela plana y la laminación fina localmente lenticular.

Según Ingeominas (2001a) en la parte superior del conjunto, especialmente en el barrio Almirante Colón, se encuentran arcillolitas color gris pardo en capas de 20 a 60 cm, con intercalaciones de areniscas friables color gris y grano fino, de un espesor de 1 a 2 cm, que hacia el tope aumentan de espesor hasta 3 y 4 cm; son más arcillosas y con intercalaciones de limolitas calcáreas y localmente calizas arrecifales hasta de 0,5 m de espesor. A la altura del barrio La Troncal se encuentran capas de 0,5 a 1 m de espesor de areniscas duras color gris pardo, de grano fino a medio, de composición cuarzosa y ligeramente calcáreas, intercaladas con areniscas friables color pardo amarillento y grano medio.

El espesor del conjunto (T2-1) según Ángel et al. (1985) varía de 30 a 50 m según perforaciones hechas en los municipios vecinos de Santa Rosa de Lima y Turbaco. Sin embargo, con base en los cortes geológicos realizados por Ingeominas (2001a) en el sector Los Almendros -Almirante Colón, este paquete puede sobrepasar los 250 m de espesor; de hecho Ángel et al. (1985) llaman la atención sobre la variación de los espesores de este conjunto, evidenciando superficies de erosión antes del crecimiento arrecifal suprayacente.

Ingeominas (2001a) destaca el alto nivel de expansividad de las arcillas de este conjunto y por ende el fuerte carcavamiento que exhiben en campo. Estas arcillas se alternan ocasionalmente con niveles delgados y permeables de arena. Las grietas formadas en tiempo seco por la desecación de los materiales del conjunto se convierten en canales propicios por donde se pueden concentrar las aguas superficiales en invierno.

La Formación Detrítica Bayunca presenta una zona de meteorización de 0.5 a 1.25 m, antes de encontrar la roca fresca, se encuentra compuesta de una mezcla de arcilla arenosa con grava compacta de color gris pardo y un suelo vegetal arcillo-arenoso de 10 a 15 cm de espesor.



□ Formación Calcárea de La Popa

La Unidad Calcárea de La Popa llamada en adelante Formación Calcárea de La Popa yace discordante y localmente fallada sobre la Formación Detrítica Bayunca descrita con anterioridad y posee una extensión aproximada de 12 Km². Esta formación alcanza espesores de 100 a 125 m y por sus características litológicas predominantes ha sido subdividida de la base al tope en tres conjuntos o unidades calcáreas, siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001a), así:

- Conjunto Inferior de la Formación Calcárea de La Popa (T1-3)
- Conjunto Intermedio de la Formación Calcárea de La Popa (T1-2)
- Conjunto Superior de la Formación Calcárea de La Popa (T1-1)

Conjunto Inferior (T1-3): Las rocas de este conjunto afloran principalmente en la parte suroccidental del cerro de Albornoz, en el barrio Albornoz hacia la base del cerro y en terrenos de las antiguas canteras de Colclinker, que hoy han sido invadidos por asentamientos subnormales, aunque el sitio está registrado como propiedad de la Empresa de cementos ARGOS. Este conjunto también se presenta en forma de parche en un sector del barrio Bellavista sobre la vía a Mamonal (Carrera 56).

Igualmente, aflora en varias zonas de las faldas del cerro de La Popa como los sectores de Kennedy, Rincón Guapo (Calle Guillermo Posada), barrio San Bernardo en el sector Palestina y hacia la parte intermedia y alta de la loma del Diamante en el barrio Torices. Finalmente este conjunto se presenta en un sector al suroriente de la ciudad que integra parte de los barrios Chapacúa, José Obrero, Las Palmeras y Jardines de 13 de Junio.

Según Ingeominas (2001a), el conjunto (T1-3) se constituye de una secuencia de calizas arrecifales de color amarillo crema en capas y bancos de 0.5 a 1 m de espesor, presenta intercalaciones de arcillolitas calcáreas de color verde oliva en capas de 0.3 a 0.5 m de espesor, que en conjunto muestran una estratificación paralela suave. Las calizas arrecifales se presentan macizas y constituidas de fragmentos de 1 a 3 cm de coral Porites tipo porites, tanto con cemento calcáreo como embebidas en una matriz arcillosa, igualmente calcárea; tal situación les confiere una resistencia diferencial según lo planteado por Ingeominas (2001a). Se aclara que en general el coral Porites tiene un esqueleto macizo y está compuesto por carbonato cálcico.

Aunque el conjunto (T1-3) no aparece cartografiado en el sector del Colegio Comfenalco en el barrio Zaragocilla, según Ingeominas (2001a) a nivel local se aprecian calizas macizas y compactas de color amarillo crema, en bancos de 2 m de espesor, con intercalaciones de arcillolitas de color gris claro de 5 a 10 cm de espesor y un banco de arenisca muy friable de grano muy fino de color pardo de 15 cm de espesor. En las calizas es característica la abundancia de fragmentos de 2 a 5 cm de coral Porites y restos de moluscos de la clase gasterópodos o univalvos y bivalvos.

En el sector Kennedy del cerro de La Popa, las calizas están constituidas de fragmentos localmente sueltos de coral Porites, mientras en el sector de la loma del Diamante en el barrio Torices se presenta un banco de 3 a 4 m de espesor de caliza maciza, localmente con porosidad primaria y alta meteorización. El suelo vegetal desarrollado tiene un espesor promedio de 12 a 20 cm, es de constitución areno-arcillosa y color pardo oscuro. Por la composición y textura localmente porosa de las calizas, presentan resistencias



intermedias, pero cuando son sometidas a la acción del agua se vuelven blandas y fácilmente deleznable, lo cual les confiere una resistencia menor (Ingeominas 2001a).

En un sector que integran los barrios Nuevo Bosque y Bosquecito hacia la base de la loma del Marión se presenta escaso el conjunto (T1-3), el cual no aparece cartografiado, sin embargo las calizas presentes están constituidas de fragmentos de coral porites embebidos en matriz arenosa calcárea y conforman un banco blando de aspecto calichoso de aproximadamente 4 m de espesor. De acuerdo con perforaciones hechas en terrenos de las antiguas canteras de Colclinker este conjunto puede superar los 35 m de espesor (Pinto, comunicación verbal en Ingeominas 2001a).

Conjunto Intermedio (T1-2): La parte intermedia de este conjunto aflora hacia la parte norte del cerro de Albornoz, al pie de la ladera en los sectores Luis Carlos Galán y 20 de Julio (Sur) y más hacia el norte de este lugar en algunas zonas de los barrios Vista Hermosa, Nuevo Campestre, Campestre, El Golf, El Carmelo, El Milagro, La Central Almirante Colón y un sector al sur de Blas de Lezo.

Igualmente, aflora hacia el sector suroccidental de la loma del Marión, en los barrios Juan XXIII, Nuevo Paraguay, Republica de Chile, Altos de San Isidro, El Olivo y en algunas zonas de los barrios San Isidro, Los Cerros, Nueva Granada, Nuevo Bosque (hacia la Transversal 54 y sector Manzanares), Las Brisas, 9 de Abril, Piedra de Bolívar, Andalucía, José A. Galán, La Gloria y cruzando la Avenida Crisanto Luque hacia los barrios El Bosque, El Refugio, Gustavo Lemaitre y Alto Bosque.

Finalmente este conjunto se presenta en la base del cerro de La Popa, hacia la parte occidental en el barrio Torices, sector Paseo de Bolívar entre las Calles 46 (Guillermo Posada) y 51 (San José), de la Carrera 17 hacia el cerro y en un sector del barrio Lo Amador. Hacia la parte nororiental del cerro se presentan afloramientos principalmente en los barrios San Francisco (sector Urbanización), Daniel Lemaitre (sector 20 de Julio) y un sector al norte del barrio San Bernardo.

Según Ingeominas (2001a), el conjunto (T1-2) está conformado por una secuencia de limolitas calcáreas de color amarillo rojizo y gris con presencia de fósiles de moluscos de la clase gasterópodos o univalvos y bivalvos. Esta secuencia está dispuesta en bancos de 3 a 7 m de espesor, con intercalaciones de calizas de 1 a 2 m de espesor según datos de perforación tomados en las antiguas canteras de Colclinker. Se destaca en este mismo lugar y en la parte intermedia del conjunto (T1-2), la presencia de dos bancos de 12 y 3 m de espesor compuestos por areniscas muy friables (arena suelta) de color gris pardo y grano fino medio, de composición cuarzo-feldespática con micas diseminadas y presencia de óxidos de hierro. El espesor de este banco arenoso disminuye hacia el occidente (Pinto, comunicación verbal en Ingeominas 2001a), lo cual es indicativo del carácter lenticular del mismo.

Hacia la parte norte de la loma del Marión en el barrio Andalucía afloran arcillas calcáreas de color gris con lentes de caliza en capas de 5 a 10 cm y presencia de areniscas de color gris pardo y grano fino, con concreciones calcáreas de 30 cm de diámetro mayor, que en general pueden considerarse propias de este conjunto. Hacia el sector Suroccidental de la loma del Marión, en los barrios Los Cerros, San Isidro y República de Chile se presentan arcillas pardas con fragmentos calcáreos, igualmente se presentan gravas de cuarzo lechoso y chert pardo y negro, de tamaño entre 0.5 - 1 cm, en matriz areno-arcillosa con niveles de calizas macizas, localmente muy meteorizadas, y



arcillas calcáreas de color pardo grisáceo. El análisis local de las arcillas en este sector indica un alto nivel de expansividad (Ingeominas 2001a).

En la parte occidental del cerro de La Popa en el barrio Torices, sector Paseo de Bolívar, hacia la Calle 46 (Guillermo Posada) se presenta de acuerdo con Ingeominas (2001a) una secuencia de 23 m de espesor de arcillolitas grises y limolitas pardas, dispuestas en capas de 1 a 2 m, con intercalaciones de areniscas calcáreas de composición cuarzofeldespática, de color pardo grisáceo de 2 a 5 m espesor. Esta secuencia de arcillolitas y limolitas se encuentra suprayacida por calizas arrecifales de un espesor de 5 m, compuestas de fragmentos de coral y conchas de bivalvos de 1 a 2 cm; estas calizas se encuentran en la parte superior de las laderas del sector.

Al sur de la ciudad, en los barrios La Central, El Golf y Campestre se presentan bancos de areniscas arcillosas de color pardo grisáceo de 3 a 6 m de espesor, con lentes calcáreas y delgadas intercalaciones de limolitas de color amarillento y gris. En la vía hacia el barrio Arroz Barato, en la base del cerro de Albornoz se encuentran según Ingeominas (2001a) arcillas plásticas de color amarillo claro y gris, con presencia de lentes arenosos de grano medio a grueso y bloques meteorizados de caliza, donde se desarrolla un suelo vegetal de color pardo oscuro de 30 cm de espesor de constitución areno-arcillosa. En general, el grado de meteorización del conjunto (T1-2) alcanza profundidades de 1 a 1.5 m, se observa una mezcla de fragmentos de coral embebidos en una matriz areno-arcillosa de consistencia media y color pardo amarillento. En las zonas de areniscas friables, éstas se presentan sueltas y fácilmente removibles.

Según datos de perforación tomados por Ingeominas (2001a) en las antiguas canteras de Colclinker en el cerro de Albornoz, el espesor calculado para el conjunto (T1-2) es de 45 a 50 m; sin embargo este espesor puede ser localmente menor.

Conjunto Superior (T1-1): Las rocas de este conjunto se encuentran expuestas en la parte superior de los cerros de la ciudad, tal como el cerro de La Popa, la loma del Marión y el cerro de Albornoz. En el cerro de La Popa el conjunto (T1-1) aflora en su punto más alto en terrenos del Convento Colonial de la Orden de Agustinos Recoletos y se convierte en la unidad litológica predominante del cerro, la cual también se presenta en algunos barrios emplazados en este lugar como Paraíso II, Loma Fresca, Pablo VI, Petare, Republica del Caribe y Pedro Salazar, y hacia la base del cerro en algunos sectores de San Francisco (sector Invasión), Sinaí, La Paz, Daniel Lemaitre y San Juan.

El conjunto (T1-1) se encuentra expuesto en varios sitios de la loma del Marión, entre ellos se destaca el sector de la planta de tratamiento de agua potable de Aguas de Cartagena en el barrio Paraguay, en la parte norte del barrio Nueva Granada, en los barrios La Conquista, Junín, y en algunas zonas de los barrios Zaragocilla (sector El Progreso, Mirador de Zaragocilla, Balcones de Zaragocilla, Torres del Mar y Colegio Comfenalco), Andalucía, Nuevo Bosque (sector Manzanares, Mirador y Altos de Nuevo Bosque), Bosquecito, 9 de Abril, España, Los Cerros, Nuevo Chile, Piedra de Bolívar, Las Brisas, José A. Galán y Altos de San Isidro.

En los costados sur y norte del cerro de Albornoz se presentan afloramientos importantes de la formación; al sur en terrenos de la empresa de cementos HOLCIM y de Aga Fano S.A. y hacia algunas zonas de los barrios Puerta de Hierro y Arroz barato, y al norte del cerro en los barrios Villa Barraza, El Reposo, El Libertador, San Pedro Martin, El Educador, Bayao, Camilo Torres, María Cano, Jaime Pardo Leal, Manuela Curí,



Esmeralda I y II, Nazareno, Villa Fanny, Nueva Jerusalén, Sectores Unidos, La Sierrita, Villa Rosa y en algunos sectores de Los Corales, La Fragata, Almirante Colón, El Campestre, La Central, Blas de Lezo, Los Jardines, La Victoria, La Consolata y Simón Bolívar.

El conjunto (T1-1) según Ingeominas (2001a) está constituido predominantemente de bancos de caliza terrosa y calichosa, de color amarillo crema, de espesor entre 2 y 4 m, y areniscas calcáreas de color amarillo pardo, con niveles delgados de 0.7 a 0.8 m de espesor y presencia de óxidos. En el cerro de La Popa se presentan bancos macizos de calizas arrecifales constituidos de fragmentos de coral Porites tipo porites y conchas cementadas de moluscos de clase bivalvos. Hacia el sector sur del Convento de los Agustinos Recoletos, a nivel local se presentan oquedades que varían de 1 a 50 cm, producto de la disolución de las calizas por efecto del agua. Hacia el norte del cerro, las calizas se presentan macizas, de color amarillo crema, pero con muestras de meteorización intensa, especialmente en el barrio San Francisco (loma del Guerrero).

En la loma de Marión se encuentran calizas arrecifales constituidas por fragmentos de coral Porites bien cementados, con signos de meteorización, especialmente en los valles que se han formado donde se presentan calizas con un aspecto terroso. Este tipo de calizas también se presentan especialmente en los barrios El Campestre, San Pedro Mártir, El Educador, La Central y La Sierrita. Se destaca que en el barrio La Sierrita se encuentra a nivel local abundancia de conchas de moluscos de clase gasterópodos o univalvos y bivalvos, y niveles delgados de arcilla plástica de color gris verdoso.

Los suelos generados en rocas del conjunto (T1-1) presentan espesores del orden de 60 cm, sin embargo debido al fuerte fracturamiento este espesor se incrementa localmente según lo planteado por Ingeominas (2001). El espesor de este conjunto es del orden de 25 m, sin embargo en el extremo sur de las antiguas canteras de Colclinker hacia la parte superior de las calizas se presenta una secuencia de limolitas y areniscas calcáreas, calizas, arcillolitas rojizas muy meteorizadas, lo cual incrementa el espesor de este conjunto a 40 m aproximadamente.

□ Depósitos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se pueden dividir de acuerdo con su origen en depósitos de origen marino, de origen marino-aluvial, de origen fluvial, de origen coluvial y de origen coluvio-aluvial. Dentro de los depósitos de origen marino se diferencian los depósitos de origen arrecifal, los depósitos de playón, los depósitos de playa, los depósitos intermareales y los sustratos de manglar, todos infrayacidos localmente por bajos arrecifales.

Con base en una cronología relativa, definida por Ingeominas (2001a), desde lo más antiguo hasta lo reciente, se presentan en el casco urbano de Cartagena, las siguientes unidades litológicas del cuaternario.

Bajos arrecifales (Ba): Los bajos arrecifales subrecientes son cuerpos rocosos someros constituidos y construidos por especies formadoras de arrecifes como corales y algas. Según Ingeominas (2001a) se presentan en la parte interna de la bahía de Cartagena, como bajos elongados en el borde oriental de la bahía frente a la zona industrial de Mamonal o como pináculos arrecifales (peneplanizados) de escasa extensión hacia el centro y borde de la misma, los cuales generan un efecto de barrera para los sedimentos detríticos que allí se depositan. Hacia el sector oriental de la bahía se presentan



pináculos que corresponden a arrecifes franjeantes fósiles que han sido cubiertos de manglar, se destacan cambios abruptos del talud en el fondo de la bahía probablemente por fallamiento.

Para Ingeominas (2001a) los bajos arrecifales constituyen el núcleo de las principales islas de la parte interna de la bahía de Cartagena, tales como Manga, El Diablo, El Chivo, Manzanillo, Cocosolo, Maparapita, y posiblemente las islas ubicadas en el costado suroriental de la ciénaga de la Virgen. En estos sectores los arrecifes subrecientes han sido localmente cubiertos por sedimentos de playa o sustrato de manglar.

De acuerdo con los restos fósiles presentes en las playas internas de la bahía, encontrados por Ingeominas (2001a), los cuerpos arrecifales corresponden principalmente al género Porites, aunque también se presentan en menor proporción corales tipo Agropora, Diploria y Agaracia. Igualmente se encuentran restos de algas tipo Alimeda, según lo planteado por Vernet (1986), quien realizó dataciones encontrando que la edad de estos corales varía en un período entre el año 1500 y 2500 a.C.

Depósitos de origen arrecifal (Da): Los depósitos de origen arrecifal son acumulaciones marinas, constituidas de fragmentos de coral, algas y conchas, producto de la destrucción de los cuerpos arrecifales. De acuerdo con Ingeominas (2001a), estos depósitos afloran en la isla de Manzanillo, El Diablo, El Chivo y el extremo suroriental de la isla de Manga donde constituyen antiguas terrazas marinas.

Los fragmentos de coral que constituyen los depósitos de origen arrecifal pertenecen principalmente al género Porites (coral en forma de dedo: caracolejo) y presentan tamaños entre 1 y 3 cm, soportados en matriz arenosa gruesa de composición calcárea y color amarillo crema, la cual constituye localmente de 30 al 60% del total. El espesor puede superar los 12 m en la isla de Manzanillo, aunque es difícil diferenciar el contacto con los arrecifes infrayacentes.

Depósitos de playón (Dpy): Los depósitos de playón son acumulaciones arenosas con concentraciones locales de grava de origen lítico (chinas) y biotrófico (fragmentos de concha y localmente coral). De acuerdo con Ingeominas (2001a), estos depósitos representan antiguos niveles de playa y conforman geformas de origen marino como las espigas, barras y playones propiamente dichos.

Los depósitos de playón se encuentran ampliamente distribuidos en el casco urbano de Cartagena en La Boquilla, en terrenos del Aeropuerto Rafael Núñez y en los barrios Crespo, Marbella, El Cabrero, San Diego, Sector La Matuna, Bocagrande, Laguito, Castillogrande y en el sector norte de la isla de Manga.

Los depósitos de playón se presentan de igual manera bordeando los caños y lagunas actuales en los barrios Canapote, Santa María, 7 de Agosto, algunas zonas de Daniel Lemaitre, Torices (Sector Paseo de Bolívar) y Papayal, El Centro histórico, Getsemaní, Pie del cerro, Pie de La Popa, algunos sectores de la Quinta, Prado, Bruselas, El Bosque, Nuevo Oriente y Albornoz.

Estos depósitos se presentan a nivel local en la zona industrial de Mamonal en terrenos que bordean el cerro de Albornoz y se extienden en forma de franja desde la empresa Todomar (Marina Albornoz) hasta el antiguo lote de Corelca, y sobre la vía a Mamonal en un sector entre la laguna de residuos de dragado (sector Petroquímica) y el barrio



Policarpa. Finalmente los depósitos de playón se presentan en forma de barras arenosas antiguas en el sector suroriental de la ciénaga de la Virgen, en una zona ubicada más allá del barrio El Pozón.

La composición y textura de las arenas distribuidas en los depósitos de playón varía de un lugar a otro; sin embargo, en general, las arenas poseen granos de tamaño de fino a medio, de color pardo grisáceo, con concentraciones locales de fragmentos de concha de tamaño de 0.5 a 3 cm y gravas de tamaño de 0.5 - 2 cm. A nivel composicional, la arena es cuarzofeldespática con menores proporciones de ferromagnesianos y trazas de mica. Las gravas encontradas son de chert negro, pardo y cuarzo lechoso (Ingeominas 2001a).

Los espesores de estos depósitos varían de un lugar a otro entre 1 y 45 m, aproximadamente. Según Ingeominas (2001a) en el sector del Laguito los espesores varían entre 35 y 45 m, donde localmente se presentan concentraciones de arcillas y fragmentos de coral; en Bocagrande y Castillogrande los espesores alcanzan 30 m, y en el Centro histórico alcanzan 25 m, lo cual permite establecer una disminución del espesor en dirección sur-norte.

Los espesores de los depósitos de playón en zonas más cercanas a los cerros de la ciudad (La Popa, Marión y Albornoz) son menores. En el barrio El Cabrero, los espesores son del orden 8 a 12 m, en Marbella y Crespo sobrepasan los 16 m, mientras que en el sector del Pie de La Popa, por el contrario, los espesores varían entre 2 y 10 m, disminuyendo el espesor de los depósitos hacia la base del cerro de La Popa.

De acuerdo con registros de perforación de Ingeominas (2001a), en el barrio El Bosque el espesor de estos depósitos alcanza 6 m y en los sedimentos se encuentra abundancia de fragmentos de coral Porites (caracolejo). Tal situación es similar en la zona industrial de Mamonal a la altura de la empresa Todomar, donde se observan incrementos significativos de los fragmentos de coral y hacia el sur en cercanías del Astillero Vikingos SA, donde los sedimentos son de constitución predominantemente calcárea con fragmentos de coral tamaño guijo, embebidos en una matriz arenosa de la misma composición y alcanzan espesores entre 4 y 6 m. En un sector sobre la vía a Mamonal entre la laguna de residuos de dragado y el barrio Policarpa se presenta una interdigitación de arenas finas de color gris verdoso y arcillas y limos del mismo color, en capas de 5 a 10 m de espesor.

Depósitos marino aluviales (Dma): Los depósitos marino aluviales son acumulaciones predominantemente arcillosas de color pardo y negro con lentes arenosos de varios metros de espesor, producto de la interacción de procesos marinos y aluviales en tiempos antiguos (Ingeominas 2001a). Estos depósitos constituyen extensas llanuras costeras presentes al oriente de la ciénaga de la Virgen hacia los barrios El Pozón, Villa Estrella, Villas de la Candelaria (sector norte), Las Américas, Nuevo Paraíso, Fredonia y en el sector suroccidental de Las Palmeras.

Igualmente estos depósitos se presentan hacia la zona suroccidental de la ciudad en terrenos de la Universidad San Buenaventura, en los barrios San José de los Campanos (sector noroccidental) y Huellas de Alberto Uribe, en terrenos colindantes con la parte posterior del barrio Villa Rosita, en los sectores de La Carolina, Ciudad Jardín (Marval SA), Bosque de la Circunvalar, Horizonte y Villa Grande de Indias, en la zona noroccidental de la Urbanización El Rodeo y sus terrenos vecinos hacia la Variante que conecta Mamonal con el puente de Turbaco.



Finalmente los depósitos marino aluviales se presentan al sur y suroccidente del cerro de Albornoz hacia los barrios Policarpa, en terrenos de la empresa Biofilm SA, un sector de Puerta de Hierro, Villa Hermosa, La Paz (sur) y algunas zonas de Nelson Mandela.

De acuerdo con Ángel et al. (1985) estos depósitos hacia el oriente de la ciénaga de la Virgen sobrepasan los 60 m de espesor e indican igualmente el contenido de agua salada en los sedimentos arenosos, lo cual confirma el ambiente marino transicional de los mismos. Hacia los terrenos vecinos a la Urbanización El Rodeo, sobre la Variante Mamonal que conduce a La Cordialidad, se observan a nivel local afloramientos de las areniscas friables del Conjunto Intermedio de la Formación Detrítica Bayunca, lo cual permite inferir que este conjunto rocoso al meteorizarse es una de las principales fuentes generadoras de los cuerpos arenosos de los depósitos intermareales.

Los depósitos marino aluviales hacia los barrios El Pozón y San José de Los Campanos son predominantemente arcillosos en superficie y hasta una profundidad de 1 o 2 m según registros de perforación de Ingeominas (2001a); predominan las arcillas firmes de color pardo grisáceo con gravas diseminadas de tamaño entre 0.5 y 1 cm, con presencia de chert negro o pardo y concentraciones locales de fragmentos calcáreos, materia orgánica y fragmentos de conchas. Igualmente al suroccidente del cerro de Albornoz, estos depósitos son predominantemente arcillosos, sin embargo se presentan arenas limosas de color pardo oscuro con gravas finas de chert negro y pardo de tamaño entre 0.1 y 0.5 cm.

Según el análisis composicional hecho por Ingeominas (2001a) sobre las muestras tomadas en los barrios Policarpa y San José de Los Campanos, la composición mineralógica de las arcillas presenta contenidos predominantes de vermiculita y caolinita, en especial en San José de Los Campanos. Tal situación le confiere al terreno un alto grado de expansividad.

Depósitos intermareales (Dima - Dimar): Los depósitos intermareales son acumulaciones de material lodoso de origen claramente sedimentario asociado a zonas donde la acción marina es baja (Ingeominas 2001a). Los materiales que se han depositado poseen características granulométricas decrecientes, en razón de las bajas velocidades de las corrientes de arrastre en zonas con dominio más cerrado al mar y por ende de variaciones marinas menos acentuadas, lo cual ha condicionado el movimiento de la carga de sedimento y por lo tanto el tipo de estructura que resulta al formarse los depósitos y aquellas que tienen lugar después de su consolidación.

Estos depósitos presentan cierto grado de materia orgánica en su composición, lo cual está dado por la fauna característica que habita en los sedimentos, lo que le confiere a estos unos rasgos estructurales específicos, bien por la actividad del organismo en vida o por la acumulación de sus restos, presentándose las mayores concentraciones de materia orgánica en aquellas zonas donde la velocidad de sedimentación y de erosión no son rápidas.

Los sedimentos que constituyen los depósitos intermareales de la zona, según Ingeominas (2001a) corresponden predominantemente a arcillas y limos blandos, de color gris oscuro, con restos de fragmentos de conchas y presentan localmente interdigitaciones de arena arcillosa de color pardo y de grano fino.



A nivel local Ingeominas (2001a) ha diferenciado los sedimentos intermareales con predominio de arcillas (Dima), de aquellos que contienen arenas y limos (Dimar), sin embargo aclara que sus características geotécnicas son muy parecidas. Se destaca que los depósitos intermareales de predominio arcilloso se sedimentan progresivamente durante su formación en el intervalo neutro de marea, momento en el que las arcillas se depositan partícula a partícula o mediante la formación de floculos, presentado laminación paralela y estratificación "flaser". Por otra parte los depósitos de arenas y limos se sedimentan de modo más rápido durante su formación bajo un régimen hidrodinámico alto, por lo tanto las estructuras están mejor conservadas y su contenido de materia orgánica es escaso o nulo.

Los depósitos intermareales se localizan en los bordes de los caños y lagunas, en especial en la ciénaga de la Virgen donde se presentan hacia la margen occidental, sur, suroriental y oriental de la misma. En la margen occidental de la ciénaga se localizan depósitos intermareales hacia La Boquilla, en terrenos paralelos a la pista del Aeropuerto Rafael Núñez, en el caño Juan de Angola, en los sectores de La María y Las Flores. Igualmente en la margen sur de la ciénaga se presentan estos depósitos a la altura de los barrios La Esperanza, La Candelaria, Republica del Líbano y en varios sectores de Olaya Herrera hasta la margen suroriental y oriental de la ciénaga.

Estos depósitos se presentan hacia la laguna del Cabrero en su margen occidental, en dos sectores de Chambacú (cerca al Edificio Inteligente), en las lagunas de San Lázaro y Chambacú, en un sector del Centro histórico sobre la Avenida Santander desde Punta Santo Domingo hasta una zona en el Parque de la Marina y localmente en forma de parches en Bocagrande, Castillogrande y Laguito.

En el sector oriental de la bahía de Cartagena hacia la isla de Manga se presentan depósitos intermareales en forma de parches, en ambos márgenes del caño Bazurto (sector Pie del cerro y Villa Venecia), en la Ciénaga de las Quintas sobre terrenos del mercado de Bazurto hacia la Avenida del Lago y en otros sectores de los barrios Chino y Martínez Martelo. En la isla de Manzanillo se localizan depósitos en la parte sur y hacia la parte continental en algunos sectores de los barrios Nuevo Oriente, Ceballos, Santa Clara y Mamonal (sector Petroquímica en la laguna de residuos de dragado).

Según Ingeominas (2001a), los depósitos intermareales se presentan mejor expuestos en el sector oriental, suroriental y sur de la Ciénaga de la Virgen, donde constituyen llanuras localmente inundables de 450 a 1000 m de ancho y con espesores al sur de la ciénaga de 4 a 6 m. Al sur de la ciénaga estos depósitos están constituidos de arcillas limosas, blandas, de color gris oscuro con fragmentos de concha diseminados, de tamaño de 0.2 a 0.5 cm. A nivel local se encuentran a profundidad lentejones de arcilla arenosa de color gris con abundancia de fragmentos de concha.

En el margen occidental de la Ciénaga de la Virgen se presentan depósitos intermareales dispuestos en forma festoneada a lo largo de la barra arenosa de La Boquilla. En este sector los depósitos se caracterizan por la alternancia en superficie de arcillas y arenas muy finas, limosas, de color gris oscuro y en capas de 0.5 cm en promedio (Carvajal y Pérez 1993).

En sectores aledaños a los caños Juan de Angola y Bazurto, y en las lagunas del Cabrero, Chambacú y San Lázaro, los depósitos intermareales se disponen en franjas de 20 a 60 m de ancho, de espesores variables entre 5 a 10 m; se constituyen de modo



predominante de arenas finas y de arcillas blandas de color gris oscuro, debido a su relación con los depósitos de playa y dunas cercanos. Tal situación se hace extensiva hacia los sectores del Parque de la Marina, Bocagrande y Laguito (Ingeominas 2001a).

Finalmente es importante indicar que la mayoría de estos depósitos se encuentran cubiertos por rellenos antrópicos de arena, grava o recebo (zahorra) hechos en la mayoría de los casos con bajas especificaciones técnicas.

Sustrato de manglar (Sma - Smr): Los manglares son agrupaciones de árboles y arbustos que dominan las zonas intermareales a lo largo de los bordes de las lagunas costeras, estuarios, desembocaduras de ríos y bahías en regiones tropicales y subtropicales (Middleton y McKee 2001); se localizan usualmente en la interfase de influencia del agua marina (ambiente salino) y de las descargas de agua dulce provenientes de la parte continental (Travieso 2005). Los humedales de manglar son ecosistemas altamente productivos, poseen una elevada tasa de producción primaria y además exportan materia orgánica a destinos variados sirviendo de sustrato para el desarrollo de diversos microorganismos (Mancera 2003).

Según Travieso (2005), el sustrato de manglar puede estar compuesto por fracciones finas (arcillas y limos) y fracciones gruesas (arenas) en diferentes proporciones, así como por turbas orgánicas (material orgánico en descomposición) en función de los aportes de sedimentos que existen en un lugar específico. En el caso de Cartagena, Ingeominas (2001a) plantea que los sustratos de manglar recientes (Smr) se constituyen de acumulaciones de lodos y arenas de color gris oscuro con abundante materia orgánica que se constituye en el sustrato apto para el desarrollo del manglar actual.

Los sustratos de manglar se presentan predominantemente en zonas protegidas, en las partes internas de la bahía de Cartagena y localmente en forma de parches que cubren los bajos arrecifales adyacentes (Ingeominas 2001a). Los sectores que albergan sustratos arcillosos y localmente arenosos, sobre los cuales en tiempo subreciente se desarrolló el ecosistema del manglar y otras plantas halófitas se denominan sustratos de manglar antiguo (Sma). La desaparición de estas plantas puede deberse a posibles cambios en las condiciones ambientales como contaminación por aguas servidas y dragados mal tratados (Viña 1989 en Carvajal y Pérez 1993), o como consecuencia de la tala indiscriminada del manglar. Los vientos y las fuertes lluvias también contribuyen en la destrucción de parte de las ramas de los manglares, desprenden sus flores y los propágulos, no logrando el manglar recuperarse completamente.

La característica principal de estos sustratos es la alta concentración de materia orgánica en descomposición, asociada íntima y genéticamente con los depósitos intermareales que se forman en la ciudad. Es importante destacar que la acumulación de sustratos de manglar se presenta cuando la tasa de pérdida de materia orgánica en el sistema es menor que la tasa de producción de biomasa.

Estos sustratos se encuentran bordeando los canales y lagunas internas de Cartagena; se destacan algunos sectores de la Ciénaga de la Virgen, en especial hacia su margen occidental en zonas de manglar de La Boquilla y del Aeropuerto Rafael Núñez, en forma de parches en el barrio Olaya Herrera en los sectores Rafael Núñez y Ricaurte en un área en la desembocadura del canal del mismo nombre, hacia la margen suroriental en cercanías al barrio Nuevo Paraíso y al oriente de la ciénaga.



Igualmente estos sustratos se presentan en zonas de manglar en la laguna del Cabrero sobre la margen del barrio Torices y San Pedro y Libertad, en el caño Juan de Angola sobre la margen que conforman los barrios Canapote y La María, y a nivel local en el sector de Marbella. En la laguna de Chambacú y en el sector del mismo nombre también se presentan sustratos de manglar, así como hacia la laguna de San Lázaro, en forma de parches en la isla de Manga, en el caño Bazurto del lado del Pie del cerro, en la ciénaga de las Quintas, a lo largo de los límites del barrio El Bosque con la parte interna de la bahía de Cartagena, en algunas zonas de la isla de Manzanillo y finalmente al oriente de la bahía, en algunos sectores de los barrios Nuevo Oriente, Ceballos y Santa Clara, y hacia Mamonal (Sector Petroquímica) y su zona insular.

En el sector de Torices se presenta un nivel de sustrato de manglar de 70 cm de espesor a una profundidad promedio de 1 m, relacionado con sedimentos arcillo-arenosos que poseen abundante materia orgánica y fragmentos de concha de tamaño de 1 a 2 cm. En Marbella y El Cabrero se detectaron sustratos de manglar a una profundidad variable entre 1.3 y 4 m, los cuales son suprayacidos localmente por limos arcillosos, orgánicos y blandos de color gris oscuro de espesor de 4 a 5 m (Ingeominas 2001a).

En el sector de Bocagrande y Castillogrande, antiguamente existieron grandes llanuras de manglar asociadas a la parte interna de la bahía, que han desaparecido principalmente por la actividad urbanizadora, sin embargo se han detectado sustratos de manglar a una profundidad entre 0.5 y 2 m y en esa misma zona a profundidades oscilantes entre 1.7 y 2.5 m (Ingeominas 2001a). En estos barrios los sustratos de manglar están compuestos por fracciones gruesas, por lo tanto se asocian a arenas limosas muy finas de color gris oscuro con abundante materia orgánica.

El sustrato de manglar en la isla de Manga alcanza espesores del orden de 1 a 1.2 m, se detectan a una profundidad entre 5 y 5.5 m y están constituidos por arenas limosas de color gris con presencia de materia orgánica. Tal situación es similar en el sector de El Bosque, donde se encuentran restos de manglar a 2 m de profundidad que se relacionan con arenas de playa que presentan fragmentos de coral. En el sector oriental de la bahía de Cartagena se presentan niveles de manglar a profundidades del orden de 0.5 a 1.5 m, asociados predominantemente a sedimentos de material arcilloso de color gris oscuro con abundante materia orgánica (Ingeominas 2001a).

Es importante mencionar que algunos sectores de la ciudad donde los manglares se desarrollaron fueron urbanizados (Ciénaga de la Virgen, islas de Manga y Manzanillo, Chambacú, Torices, Bazurto y Mamonal) por lo tanto el sustrato ha sido cubierto por rellenos antrópicos de arena, grava y zahorra, según lo planteado por Ingeominas (2001a). Las zonas de mayor cobertura de manglar reciente se encuentran en la parte suroriental de la Ciénaga de la Virgen y en las islas localizadas en la parte oriental de la bahía de Cartagena en zona insular de Mamonal. Igualmente se presentan sustratos de manglar recientes en forma de pequeños parches de una extensión entre 30 y 100 m² en la parte interna y oriental de la bahía de Cartagena.

Depósitos coluvio-aluviales (Dcal): Los depósitos coluvio-aluviales son acumulaciones de sedimentos de arena y grava y a nivel local de limos que se han conformado hacia la base de los cerros de la ciudad, producto de la acción combinada de procesos coluviales y de escorrentía superficial, localmente torrencial (Ingeominas 2001a). Estos sedimentos acumulados y poco consolidados tienen su origen en los depósitos de ladera, producto de desprendimientos o deslizamientos de material rocoso o suelo.



Es importante mencionar que este tipo de unidad litológica mixta formada de fragmentos angulares y materiales finos transportados principalmente por efecto de la gravedad y por corrientes de agua, posee una composición granulométrica heterogénea, poca cohesión y forma de depósito irregular.

Los depósitos coluvio-aluviales se han formado en los alrededores del cerro de La Popa en los barrios Pedro Salazar, Los Comuneros, Torices hacia la base de la loma del Diamante sobre las carreras 16 y 17, en terrenos circundantes al Castillo San Felipe de Barajas, en algunas zonas del Espinal, Lo Amador y La Quinta sobre la Avenida Pedro de Heredia y hacia La María y Las Flores.

Igualmente estos depósitos se presentan en algunos sectores de los barrios La Esperanza (sobre la carrera 34), Alcibia (sobre Avenida Pedro Romero), María Auxiliadora, Amberes, Boston, Tesca Nuevo, Villa Olímpica, Costa Linda, Castillete, Olaya Herrera (sectores 11 de Noviembre, Ricaurte y El Progreso), José Obrero y Nuevo Porvenir. Por último se localizan en forma de parches en algunas zonas de los barrios San Isidro, Puerta de Hierro, Arroz Barato y en un lote vecino a Policarpa, y están asociados a los depósitos de ladera transportados desde el cerro de Albornoz.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), la constitución de los depósitos coluvio-aluviales en las zonas distales es predominantemente areno-arcillosa de color pardo y grisáceo donde es común encontrar gravas gruesas de chert (chinas) y fragmentos de coral hasta de 8 cm. En las zonas cercanas a los escarpes pronunciados, especialmente hacia la parte sur del cerro de La Popa (Lo Amador y La Quinta) se encuentran bloques angulares de calizas y areniscas calcáreas de tamaño entre 5 y 20 cm. Referente a los espesores de estos depósitos, los mismos pueden variar entre 0.5 y 2 m en las zonas más distales, mientras en los sectores localizados cerca de las zonas de taludes, el espesor puede variar entre 5 y 15 m aproximadamente.

Depósitos coluviales (Dcl): Los depósitos coluviales son acumulaciones constituidas por materiales de diverso tamaño formados por la alteración y desintegración in situ de las rocas calcáreas ubicadas en la parte alta de los cerros de la ciudad, que han sido transportadas hacia el pie de las laderas primordialmente por la acción de la gravedad. Se caracterizan por contener gravas calizas angulosas a subangulosas, porosas y compresibles, distribuidas en forma caótica, sin selección ni estratificación aparente y de consolidación regular a pobre. La resistencia de estos materiales conformados por masas de origen inestable es baja, sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de lluvias intensas.

En los depósitos coluviales evaluados por Ingeominas (2001a) se han acumulado bloques de tamaño de 0.5 a 1 m, embebidos en una matriz arenosa gruesa, localizadas en la base de los escarpes o en las partes bajas de las laderas. Este tipo de depósitos están asociados a los procesos de remoción en masa y como tal depende del tipo de movimiento que usualmente pueden ser deslizamientos del tipo rotacional y en menor medida traslacional, flujos de tierra, de bloques de roca y detritos y desprendimientos o caídas.

Este tipo de depósitos se encuentran preferencialmente en las bases escarpadas del cerro de La Popa, hacia los barrios Torices sector Paseo de Bolívar (sobre la carrera 17), La Española, Tequendama, Lo Amador (sobre la calle 36), La Quinta (sobre la calle 33),



a lo largo de una franja de dirección nororiente desde la cota 100 cerca del Convento de los Agustinos Recoletos hasta el sector de Palestina, hacia la base de la loma del Peyé y en forma de parches en un sector del barrio San Bernardo, Daniel Lemaître (sobre la calle 73) y en la base de la loma del Guerrero en el barrio San Francisco.

Igualmente los depósitos coluviales se presentan al sur de la ciudad, en el sector occidental del cerro de Albornoz, hacia la base donde se localizan algunas empresas de Mamonal, en forma de parches en los sectores de Puerta de Hierro y Arroz Barato, y hacia la base del "volcán de lodo" del barrio El Rodeo, especialmente en algunas zonas de los terrenos de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Estos depósitos conformados en la parte nororiental de la base del "volcán de lodo" se relacionan según Carvajal (1999) con antiguos flujos de lodo de arcilla (caolinita, esmectita e illita) y limos, encausados por los drenajes hasta llegar a zonas bajas de deposición; no se descarta la acción combinada de la escorrentía superficial que contribuyó a la conformación actual de los mismos.

Según Ingeominas (2001a), en los alrededores de la base del cerro de La Popa estos depósitos alcanzan espesores que varían entre 1 y 12 m, se constituyen de bloques de arenisca calcárea y caliza de tamaño de 0.5 a 1 m, que se encuentran embebidos (flotantes) en una matriz arenosa calcárea de grano grueso, aunque son fácilmente removibles.

En el sector occidental y sur (Arroz Barato) del cerro de Albornoz se presentan grandes acumulaciones de material mixto producto del descapote de las calizas para su explotación como insumo de construcción. En el trabajo realizado por Ingeominas (2001a) se cartografiaron por practicidad depósitos coluviales de modo preliminar, los cuales se constituyen predominantemente de fragmentos de calizas de tamaño de 1 a 15 cm (aunque a nivel local se presentan bloques de 1 a 3 m) embebidos en una matriz de predominio areno-arcillosa en el sur y con mayor contenido de arena en el occidente del cerro.

En el cerro de La Popa, como en la zona escarpada oriental de la loma del Marión (sector Nuevo Bosque y en terrenos del Hospital Universitario) se presentan zonas deslizadas activas, las cuales han sido consideradas por Ingeominas (2001a) depósitos coluviales, sin embargo se aclara que en algunos sectores no fueron cartografiados. En el sector del barrio Nuevo Bosque estos depósitos alcanzan 10 m de espesor, se constituyen de bloques de tamaño entre 5 y 100 cm de arcillolitas negras y calizas arrecifales de color amarillo, localmente muy meteorizadas y dispuestas en forma caótica. De igual forma se han considerado depósitos coluviales en la parte norte y oriental del edificio volcánico de lodo de El Rodeo, constituidos de arcilla limosa color negro, cuyo origen probablemente está asociado a antiguos flujos de lodo emanados por las bocas localizadas en la parte alta del "volcán de lodo".

Depósitos aluviales recientes (Dar): Los depósitos aluviales están constituidos por materiales transportados y depositados naturalmente por corrientes de agua a lo largo de la sección y zona de influencia de los drenajes existentes, en llanuras de inundación o deltas formados usualmente en la desembocadura de dichos drenajes. Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad, conforman suelos muy anisotrópicos en su distribución, sus propiedades están estrechamente relacionadas con su composición granulométrica, su continuidad es irregular, acumulando cierto grado de materia orgánica. La permeabilidad de estos depósitos



depende de la granulometría y usualmente presentan un nivel freático alto. En algunas zonas de desembocadura de drenajes y canales se han formado deltas de tipo litoral, pues su ambiente de generación es transicional entre la parte continental y el entorno marino o lacustre; del mismo modo es posible que se generen deltas por la disminución de la velocidad de la corriente de arrastre y consecuente disminución de su capacidad de transporte.

En el caso de Cartagena, Ingeominas (2001a) plantea que los depósitos aluviales recientes están conformados por acumulaciones arenosas localmente arcillosas, no consolidadas, que se relacionan con los drenajes naturales y sus desembocaduras. Se constituyen de arenas gruesas o arcillosas de grano fino, cuya composición varía de acuerdo con su localización. Entre los principales drenajes naturales asociados a este tipo de depósitos se encuentran los ubicados en la parte oriental y sur del cerro de La Popa (Loma Fresca, Pablo VI, Nariño, La Salle, Reloj floral, Colonial, Cicolac y Antonia Santos), así como aquellos formados de las subcuencas María Auxiliadora, Barcelona, Amador y Cortés, Salim Bechara, Tabú, Ricaurte, Chapundún, Siete Leguas, Filtros, Bosque, Santa Clara y los ubicados en la parte norte y sur del cerro de Albornoz. Se destacan depósitos aluviales asociados a las llanuras de inundación en zonas de Daniel Lemaitre (sector 20 de Julio), San Bernardo, El Golf, Bellavista, 20 de Julio (sur), Antonio José de Sucre, Arroz Barato, La Paz, San José de los Campanos, Villa Rosita, en terrenos al nororiente de la Terminal de Transporte, Villa Estrella y El Pozón.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), los depósitos aluviales localizados en el cerro de La Popa se constituyen de arenas de grano medio y de grano grueso, de color amarillo crema y de composición calcárea donde predominan los fragmentos de caliza, mientras en sectores hacia el sur de la ciénaga de la Virgen y en el cerro de Albornoz y sus alrededores, predominan las arenas y limos de grano fino y medio, de color pardo grisáceo, con presencia de gravas finas de chert color negro y pardo. En la loma del Marión también se presentan depósitos aluviales a partir de la cota 45 en el barrio Las Brisas, cuya descarga desciende por el sector Piedra de Bolívar en dos cauces primarios, que se unifican al cruzar la Avenida Pedro de Heredia hacia el canal Amador y Cortés.

Hacia los sectores surorientales de la ciénaga de la Virgen (barrios Las Américas, Fredonia, Olaya Herrera sector Magdalena y Playa Blanca) y al noroccidente (Bellavista) y suroccidente (Arroz Barato) del cerro de Albornoz se encuentran arcillas limosas relacionadas con las llanuras de inundación.

Se destaca la formación de deltas subrecientes en la desembocadura de los drenajes naturales y canales, tanto al sur de la ciénaga de la Virgen donde los flujos desembocan en zonas intermareales, como hacia el suroriente de la bahía de Cartagena. En general se presentan deltas cuya extensión varía entre 10000 y 50000 m², donde son comunes las interdigitaciones de arcillas de color gris oscuro, arenas de grano medio y limos en capas de 2 a 3 m de espesor, como en el caso del sector de Frigopesca en la zona industrial de Mamonal (Ingeominas 2001a).

Los espesores de los depósitos aluviales recientes, según Ingeominas (2001a), no sobrepasan el orden de 2 m en los canales o drenajes naturales, sin embargo en zonas de delta pueden alcanzar los 12 m de espesor.

Depósitos de playa y duna: Los depósitos de playa (Dp) son acumulaciones de arenas y gravas (chinas) cuyo origen de sedimentación se debe a la acción dinámica reciente del



mar sobre las playas (Ingeominas 2001a). Estos depósitos se encuentran distribuidos a lo largo del litoral costero de la ciudad y se presentan hacia las playas de la zona norte y La Boquilla, La Bocana, Crespo, Marbella, El Cabrero, hacia el Centro histórico a lo largo de la Avenida Santander, exceptuando un tramo cerca de Punta Santo Domingo donde estos depósitos de playa han sido altamente erosionados (Aguilar-Collazo y Jiménez 2005), hasta Bocagrande, Laguito y Castillogrande, lugares donde hay depósitos de playa que no aparecen cartografiados.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), los depósitos de playa en los sectores de la Boquilla, Crespo, Bocagrande y Castillogrande se constituyen de arenas de grano fino a muy fino, de color pardo grisáceo con concentraciones locales de gravas (chinas) y fragmentos de concha.

A finales de la década de los 90's el tamaño medio de las arenas de estos sectores era del orden de 0.125 a 0.063 mm según lo planteado por Ingeominas (2001a). Tiempo después ISHA (2003) encontró que el tamaño medio de las arenas en los sectores de Castillogrande y Laguito era del orden de 0.15 y 0.12 mm respectivamente. Posteriormente UDC-AMC (2004) obtuvo valores promedios del tamaño medio de las arenas en los mismos sectores del orden de 0.18 y 0.17 mm. Por otro lado, Aguilar-Collazo y Jiménez (2005) encontraron que los depósitos de playa en el sector comprendido entre Punta Santo Domingo (Centro histórico) pasando por Crespo hasta llegar a la Playa sur de la Bocana cerca al Aeropuerto Rafael Núñez se constituyen de arenas grises finas de un tamaño medio de grano que varía entre 0.14 y 0.19 mm.

De los resultados obtenidos en los distintos estudios, se evidencia que en estos sectores el tamaño medio de las arenas se ha ido incrementando progresivamente con el paso del tiempo, si se compara con lo planteado por Ingeominas (2001a), lo cual se podría atribuir a una mayor energía en el oleaje incidente, especialmente en Castillogrande, el cual generaría mayores procesos de erosión, modificando en cierta medida las características sedimentológicas de la zona.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), a nivel composicional, en estos depósitos predomina el cuarzo hialino y los feldespatos y en menores proporciones los ferromagnesianos, fragmentos de concha y magnetita en un tamaño muy fino. Hacia La Boquilla y El Laguito localmente se encuentran moscovitas en los sedimentos. Las gravas encontradas corresponden a chert pardo y negro y cuarzo lechoso en tamaños que oscilan entre 0.5 y 2 cm.

Las dunas litorales son montículos que se han formado por la acumulación de las arenas transportadas por el viento, y pueden estar activas o estabilizadas por la vegetación. En el borde costero entre La Boquilla y Bocagrande se presentan en época seca cuerpos de dunas conformados por montículos de una altura entre 0.5 y 1.5 m, los cuales se constituyen de arenas finas a medias de color pardo claro y de composición predominantemente cuarzosa (Carvajal y Pérez 1993). En los últimos años en las playas de Marbella, El Cabrero, Crespo y Bocagrande se han conformado dunas de altura entre 0.5 y 1.0 m, las cuales aparecen de modo cíclico en los primeros meses del año, especialmente en el sector de Marbella, donde se forman dunas estabilizadas por vegetación.

Lodos (DI): La aparición de estos materiales se relaciona con el volcanismo de lodo como una manifestación del fenómeno de diapirismo de lodo en la costa Caribe colombiana



atribuido a la sobrepresurización por esfuerzos tectónicos compresivos regionales o locales (Aristizabal et al. 2009) y que se genera mediante un proceso de empuje en profundidad de materiales finos de características plásticas, que migran desde zonas de grandes presiones a zonas de baja presión, por el efecto de la diferencia de densidades entre estos materiales y la cobertura superior (Kopf 2002 en SGC 2010). Estos procesos diapíricos han conformado una serie de domos, diapiros y volcanes de lodo en las regiones emergidas.

Según Ingeominas (2001a), los lodos detectados en la ciudad son acumulaciones de arcillas y limos arcillo-arenosos de grano fino, de color gris oscuro a pardo con presencia de bloques embebidos de arcillolitas, limolitas, areniscas y calizas arrecifales, de tamaño entre 5 y 80 cm. El origen de estos lodos está asociado a la formación de "volcanes" por efecto de antiguas erupciones de lodo y en menor proporción a las emanaciones locales de lodo que salen por las bocas, manaderos o ventosas de los mismos.

Los lodos se presentan principalmente en la parte alta de los domos ubicados en el sector suroriental de la ciudad de Cartagena. Con base en un análisis detallado de fotografías aéreas de la zona realizado por Ingeominas (2001a) se identificaron seis sectores de acumulación de lodos asociados a antiguas erupciones volcánicas de lodo que cubren un área aproximada de 280000 m². Estas zonas igualmente se encuentran salpicadas por ventosas o manaderos actuales de lodo, de un número del orden de 60 según lo planteado por SGC (2010) y se encuentran concentradas particularmente en la parte alta del domo principal del "volcán de lodo" de El Rodeo localizado al sur occidente de la urbanización El Rodeo y al sur de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

El "volcán de lodo" de El Rodeo es una estructura en forma de domo, cuyo cuerpo más o menos cónico y aislado representa la expresión superficial subreciente de la salida de fluidos asociados al diapirismo, posee un diámetro aproximado de 1500 m y altura de 59 m con respecto al nivel medio del mar (SGC 2010). Este edificio dómico según Ingeominas (2001a) presenta laderas convexas con pendientes entre 15° y 25°, con desarrollo de drenaje radial, afectado localmente por un fracturamiento fallado de dirección NE el cual es considerado por SGC (2010) un fallamiento conjugado sintético de la falla de Mamonal. Las cerca de 60 bocas detectadas en el volcán con diámetros que varían de 20 a 60 cm emanan lodos grises muy fluidos al igual que gases predominantemente metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Es importante anotar que en el mes de Febrero de 2013 se presentó la última erupción local de lodo en el volcán, generando fisuras y grietas en infraestructura cercana y algunas casas de la Urbanización de El Rodeo, así como deformaciones en la superficie del terreno, lo que indica un nivel de actividad actual del mismo.

Es importante mencionar que en tiempo reciente han sido intervenidos varios lotes de la Variante Mamonal (de propiedad de Tubocaribe, Herrera & Duran y UTB) cercanos a la Urbanización El Rodeo, los cuales se encuentran localizados sobre zonas de acumulación de lodos que han sido parcialmente cubiertas por la ejecución de rellenos antrópicos de material seleccionado y de sitio para adecuar los lotes para construcción de infraestructura que podría verse afectada por posibles patologías estructurales (en razón de deformaciones y desplazamientos del suelo) si no se toman las medidas a que haya lugar.

Con base en los registros sísmicos y de geoelectrónica realizados en el área por Ingeominas (2001a) se encontró que el espesor total de los lodos varía de 5 a 20 m, sin



embargo registros de geoelectrónica recientes (Barboza 2013) hechos en la zona indican posibles espesores de lodos de hasta 35 m. El espesor de lodos es menor hacia los bordes de la zona cómica y varía de acuerdo a la topografía existente antes de las erupciones, según Barboza (2013) en algunas zonas el espesor aumenta a mayor cercanía con el centro de emisión del volcán de El Rodeo y tiende a disminuir al alejarse hacia la Variante Mamonal.

El lodo emanado por las bocas activas es muy fluido lo cual no permite la formación de conos en las mismas. Según Ingeominas (2001a) las densidades varían entre 1.4 y 1.7 gr/cm³. Tal característica de fluidez ha permitido que estos materiales se hayan encauzado por los drenajes naturales, acumulándose en la base de las laderas del “domo volcánico”, como se puede evidenciar en la zona norte del mismo.

Rellenos: Según Ingeominas (2001a) los rellenos de material son acumulaciones de arena, grava, recebo (zahorra), escombros de construcción y mezclas de los mismos, hechas por la actividad humana con el fin de acondicionar los terrenos para el desarrollo industrial o habitacional. En gran parte de la ciudad de Cartagena, especialmente hacia los cuerpos de agua que circundan y cruzan la misma se han ejecutado rellenos.

En términos generales se pueden considerar dos tipos de rellenos ejecutados en la ciudad de Cartagena de acuerdo con lo planteado por Ingeominas (2001a); aquellos realizados de forma técnica con materiales clasificados y debidamente compactados y los segundos hechos con bajas especificaciones constructivas, de manera artesanal (en estado semisuelto) a través de mezclas de materiales de sitio heterogéneos no aptos (con finos y alta plasticidad) y escombros.

Entre los rellenos hechos técnicamente, Ingeominas (2001a) destaca los rellenos hidráulicos hechos en el sector de Chambacú para acondicionar antiguas llanuras de manglar para la construcción de infraestructura, aquellos llevados a cabo en Bocagrande para ampliar las playas, los rellenos del sector oriental de la isla de Manzanillo y aquellos realizados al sur de Ceballos y al occidente de Santa Clara para acondicionar el muelle de Contecar. Entre los rellenos anti-técnicos se destacan por su magnitud, los rellenos desordenados que se realizaron progresiva y artesanalmente en los costados sur y sureste de la Ciénaga de la Virgen en los barrios La Esperanza, La Candelaria y Olaya Herrera, y de forma local en los bordes de caños y lagunas de Cartagena, en especial en el barrio Torices y sus alrededores.

Es importante destacar que a partir de la construcción de la vía Perimetral en el año 2000, la ejecución de rellenos disminuyó en la zona, aunque esta actividad se ha incrementado hacia los sectores Ricaurte, Central y El Progreso (ver figura 53) del barrio Olaya Herrera donde se proyecta continuar la segunda fase de la vía Perimetral.



Figura 53. Asentamientos en zonas de rellenos en el Sector El Progreso

Fuente: El autor (2010)

En general, en los rellenos técnicamente realizados se han utilizado materiales previamente seleccionados con presencia escasa o nula de finos y debidamente clasificados. De acuerdo con Ingeominas (2001a), en Bocagrande y Castillogrande, los rellenos se han ejecutado con arenas de playa dragadas de sectores cercanos, de color gris y de grano fino a medio. De igual constitución son los rellenos hechos en Chambacú y hacia Ceballos en el muelle de Contecar, donde previamente se removió la capa vegetal del sustrato de manglar y posteriormente se cubrió de arenas dragadas tomadas de la bahía interna.

En el barrio Crespo, entre el Centro Recreacional Los Corales de Comfenalco y la playa sur de la Bocana se destaca actualmente la ejecución de rellenos hidráulicos de arena de playa dragada de sectores cercanos del orden de 1.2 millones de m³, interviniendo de este modo las playas del sector al ampliar la zona litoral mediante la construcción de un muro marginal de 2.5 Km de longitud y de 7 espolones, para poder construir el Túnel (semideprimido) de Crespo de 600 m de longitud que conecta un tramo de la vía al Mar con la Avenida Santander.

Los espesores de los rellenos varían de un lugar a otro alcanzando 3 m de espesor en el muelle de Contecar (Ceballos), donde igualmente hubo compactación por medios mecánicos (Flota Mercante Gran Colombiana 1987 en Ingeominas 2001a). De acuerdo con Ingeominas (2001a) en otros sectores los espesores de los rellenos oscilan entre 0.5 y 1.5 m y se constituyen de arenas gruesas calcáreas con fragmentos de coral de tamaño de 1 a 2 cm, especialmente donde la disponibilidad de este material es posible. Tal es el caso de algunos sectores de Manga, en la isla de Manzanillo y El Bosque.

Los rellenos hechos con bajas especificaciones constructivas están constituidos de diferentes materiales tales como recebo (zahorra), presencia de arenas sueltas y arcillas plásticas, escombros de construcción, aserrín y localmente basuras. A diferencia de los primeros rellenos, en este tipo de relleno el material del sustrato vegetal en general no se ha removido, lo cual ha ocasionado en algunos sectores el hundimiento de las casas e infraestructura relacionada. Estos rellenos se presentan con mayor extensión en el sector sur de la ciénaga de la Virgen, donde están constituidos predominantemente de zahorra mal seleccionada y escombros de construcción, alcanzando espesores oscilantes de 0.5 a 1.5 m. En el sector suroccidental y occidental de la ciénaga de la Virgen alcanzan espesores de 0.5 a 1.0 m y en su constitución predominan los escombros de



construcción y las basuras, mientras que en el sector de Torices los espesores varían de 0.3 a 1.5 m (Ingeominas 2001a).

3.2.4. Geología Estructural

A nivel estructural la región de Cartagena, al igual que el sector occidental del Caribe colombiano presenta un marco geológico complejo como resultado de los esfuerzos del frente de deformación relacionado con la convergencia de las placas Caribe y Suramérica y los procesos de diapirismo de lodo, íntimamente ligados al Cinturón del Sinú (Duque 1984 y Vernet et al. 1992 en Ingeominas 2001a). Según Aristizabal et al. (2009) el Caribe colombiano se encuentra dentro de un punto triple de acción interplacas, caracterizado por la subducción de la corteza oceánica bajo la corteza continental, donde las márgenes de las placas de Nazca y Caribe, alcanzan la margen de la placa Suramericana con diferentes ángulos y velocidades, además de estar influenciadas por las placas de Coco y del Pacífico. Producto de este contexto tectónico regional, según Ingeominas (2001a) el casco urbano de Cartagena se ha desarrollado sobre terrenos plegados y localmente fracturados, cuya disposición estructural es difícil de determinar, no sólo por la friabilidad de las rocas del área, sino por el alto grado de urbanización de la ciudad.

Entre las estructuras identificadas por Ingeominas (2001a) se presentan pliegues, fallas y lineamientos, y diaclasas. Se destacan los pliegues anticlinales de Zaragocilla, Albornoz y del cerro de La Popa y los sinclinales en los barrios Socorro y Policarpa (Mamonal). Las estructuras definidas por Ingeominas (2001a) son asimétricas con buzamientos o inclinaciones del orden de 5 a 45°. Se determinaron patrones de fracturamiento de direcciones noreste - noroeste y este - oeste asociados a fallas normales de poco desplazamiento. Entre estas se destacan la falla de Mamonal (Dirección NNE), centro médico Los Ejecutivos (NE), Las Brisas (EW) y (NW-SE), Albornoz (NE), La Popa (EW y NW-SE). El diaclasamiento evidenciado presenta tendencia de dirección EN, NEE y NW con inclinaciones altas del orden de 75° en promedio, localmente en favor de la pendiente de las laderas (Carvajal et al. 1995 en Ingeominas 2001a).

A continuación se describen las estructuras geológicas definidas por Ingeominas (2001a), complementada con información generada por Ángel et al. (1985), Carvajal (1998, 1999), y Servicio Geológico Colombiano, SGC (2010).

□ Pliegues

Las estructuras en el casco urbano de Cartagena tienen en general un rumbo NE-SW y E-W y afectan principalmente las rocas de la Formación Detrítica Bayunca (Ingeominas 2001a). Los pliegues de la ciudad se han formado a través de deformaciones en materiales rocosos dúctiles en su estado plástico, formando parte de un posible gran sistema de plegamientos por efecto de esfuerzos tectónicos de compresión y fenómenos de diapirismo de lodo. Ese sistema de plegamientos estaría conformado por las mayores estructuras plegadas de la ciudad tal como el cerro de La Popa, la loma del Marión y el cerro de Albornoz, las cuales al alinearlas de modo aproximado se obtiene un eje de dirección aproximado de N25°W.

Entre los tipos de pliegues identificados en Cartagena, a continuación se destacan los anticlinales (que se caracterizan por presentar pliegues convexos hacia arriba) y los sinclinales (con pliegues cóncavos hacia arriba).



Anticlinal de Zaragocilla: El anticlinal de Zaragocilla se encuentra localizado al suroriente de la ciudad, en cuyo núcleo se encuentran los barrios Los Cerros, Nuevo Bosque (sector Manzanares, Mirador y Altos de Nuevo Bosque), Nueva Granada, Las Brisas, Mirador de Zaragocilla, terrenos de la Universidad de Cartagena (sede Piedra de Bolívar), Zaragocilla, Escallón Villa y atraviesa la Avenida Pedro de Heredia en inmediaciones del Coliseo de Combate hasta el Estadio de Softbol de Chiquinquirá (ver figura 54).



Figura 54. Esquema de perfil de elevación de tramo de Anticlinal de Zaragocilla

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

El anticlinal de Zaragocilla es una estructura que se ubica al sur de la Ciénaga de la Virgen y se asocia con la formación de la loma del Marión. Según Ingeominas (2001a), esta estructura corresponde a un pliegue asimétrico con eje de dirección $N72^{\circ}E$ y buzamientos del orden de 15 a 20° en el flanco suroriental y de 5 a 10° en el flanco noroccidental. El anticlinal cabecea hacia el suroeste bajo las rocas de la Formación Calcárea de La Popa y se presenta en rocas de la Formación Detrítica Bayunca.

Las rocas de la Formación Calcárea de La Popa solo se presentan en el flanco suroriental de la loma del Marión con buzamientos locales del orden de 25 a 35° hacia el noreste según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Anticlinal de Albornoz: El anticlinal de Albornoz se encuentra ubicado hacia el sector oriental de la bahía de Cartagena, en el sur de la ciudad, y se asocia a la formación del cerro de Albornoz de donde la estructura toma su nombre. Según Ángel et al. (1985) este anticlinal está constituido en el núcleo por la unidad detrítica de La Popa denominada en este documento Formación Detrítica Bayunca y en los flancos por las calizas arrecifales de La Popa, hipótesis que es confirmada por Ingeominas (2001a).

El núcleo de este pliegue pasa por sectores como Villa Rosa, en terrenos del antiguo basurero de Henequén, hacia los asentamientos de 3 de Junio y Nelson Mandela (ver figura 55), y en inmediaciones de las instalaciones de Tenaris Tubocaribe.

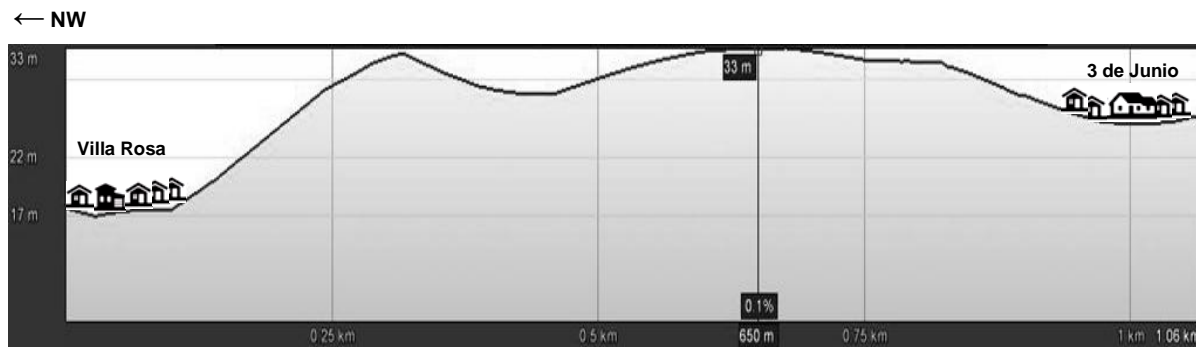


Figura 55. Esquema de perfil de elevación de Anticlinal de Albornoz (Sector Henequén)

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

Según Ingeominas (2001a), el anticlinal de Albornoz es asimétrico y de eje de dirección W-E con buzamientos del orden de 30 a 35° en el flanco sur y de 6 a 30° en el flanco norte. El anticlinal cabecea hacia el oeste 30° en rocas de la Formación Detrítica Bayunca, mientras hacia el oriente la estructura desaparece contra el trazo de la Falla de Mamonal.

Es notable la presencia de rocas de la Formación Calcárea de La Popa que bordean el anticlinal con buzamientos del orden de 35 a 45° en el flanco sur y de 14 a 38° en el norte, donde conforma un paleoatolón localmente afectado por fallamiento intenso (Ingeominas 2001a). Tal situación fue evidenciada por Ángel et al. (1985), al notar el control que tiene la estructura original en la formación de los arrecifes, los cuales fueron basculados posteriormente.

Anticlinal de La Popa: El anticlinal de La Popa es una estructura de aspecto cóncavo en planta, que se asocia a la formación del cerro de La Popa de donde la estructura toma su nombre. Según Ingeominas (2001a), el anticlinal se presenta al costado nororiental del cerro de La Popa; el eje de la estructura es de difícil determinación, por la falta de datos estructurales, mientras en el costado occidental del cerro los buzamientos medidos son del orden de 3 a 8° hacia el noroeste, en el flanco oriental son de 3 a 8° y dirección NNE.

En el sector sur por su parte, el cerro se muestra muy escarpado, lo cual puede deberse a procesos erosivos intensos o a la probable presencia de una falla de trazo aproximado E-W que según Pelgrain (1990) en Ingeominas (2001a) es probablemente de cizallamiento inverso.

Sí se considera una dirección hipotética del eje de la estructura de predominio NE en razón de su geomorfología local y sus características geológicas, el núcleo del anticlinal pasaría en principio al suroeste del cerro de La Popa por el barrio La Quinta, en su punto más alto a través del Convento de los Agustinos Recoletos, hacia la parte noreste del cerro sobre los barrios Paraíso II, Palestina, Daniel Lemaitre y finalmente por Canapote, tal como se ilustra en la figura 56.

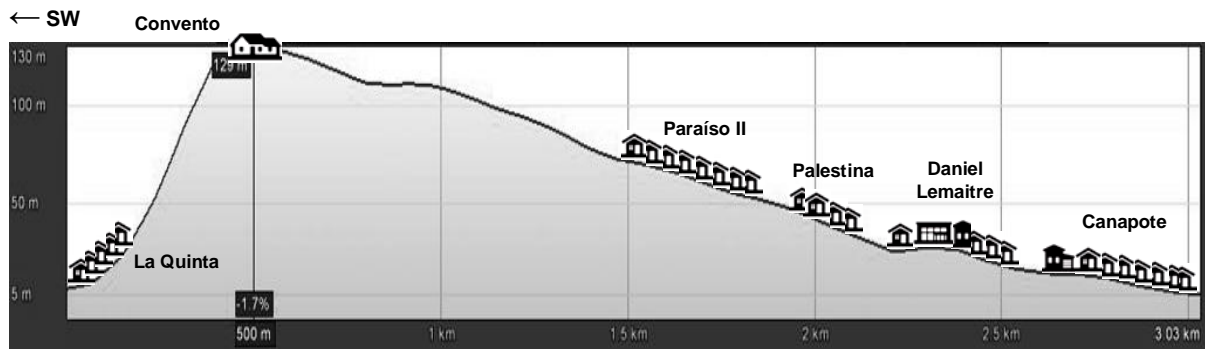


Figura 56. Esquema de perfil de elevación de Anticlinal de La Popa

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

La estructura dómica afecta principalmente las rocas de la Formación Detrítica Bayunca, y conforma una estructura monoclin. Por otro lado, las calizas del conjunto superior de la Formación Calcárea de La Popa se muestran dispuestas con buzamientos del orden de 5 a 8° hacia el noreste, con basculamientos locales del orden de 12 a 27° hacia el oriente, especialmente en el costado nororiental del cerro en el barrio San Francisco, donde las rocas están afectadas por fallamiento. Se destaca que bordeando las estructuras prominentes se encuentran sinclinales amplios como aquellos ubicados en Policarpa y Socorro (Ingeominas 2001a).

Sinclinal de Policarpa: El sinclinal de Policarpa se localiza al sur de la ciudad, su núcleo se encuentra en una zona ubicada entre el barrio Policarpa y terrenos de la empresa Biofilm SA y se extiende al este atravesando la calle 3 (vía Arroz Barato) en un lote intervenido con rellenos de material seleccionado hacia la parte posterior de Policarpa.

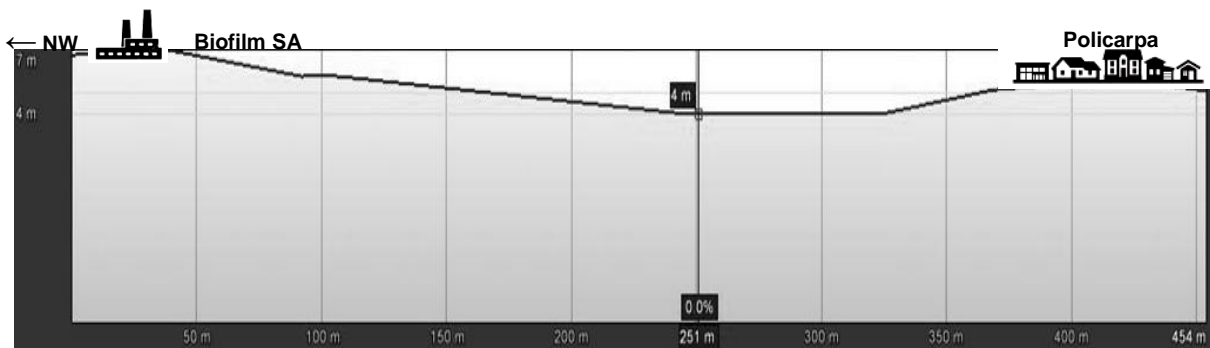


Figura 57. Esquema de perfil de elevación de un tramo del Sinclinal de Policarpa

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

Según Ingeominas (2001a), el sinclinal de Policarpa es una estructura que presenta una forma de artesa (similar a un recipiente en forma de tronco de pirámide invertida - ver figura 57) con eje de dirección E - W y buzamientos del orden de 35 a 45° asociados al cerro de Albornoz y a la loma de Conspique (Ángel et al. 1985), cuya estructura anticlinal presenta pendiente suave y poca altura, como se aprecia en la figura 58.

El núcleo de la estructura de Policarpa se encuentra constituido por rellenos de sedimentos cuaternarios recientes (Q) de origen marino y fluvial y se relaciona con los domos anticlinales de Albornoz y Conspique (hoy, muelle carbonero) conformados por la Formación Calcárea de La Popa (T1) y la Formación Detrítica Bayunca (T2).

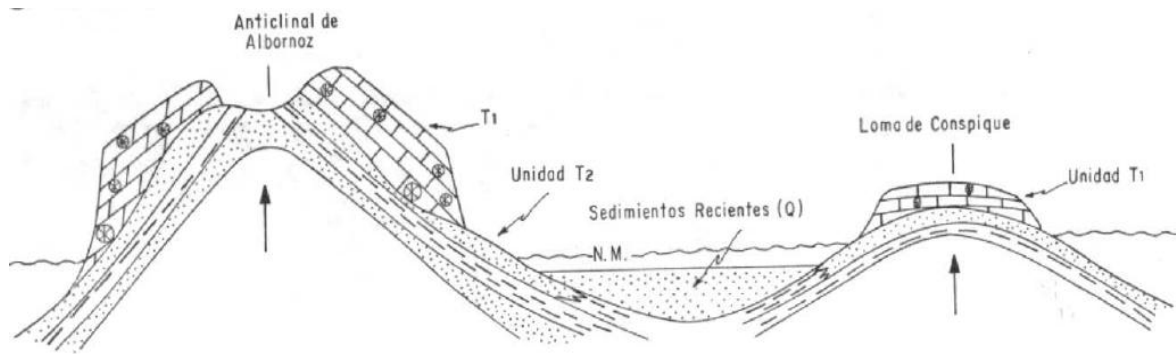


Figura 58. Antigua zona de plegamiento en Albornoz y Policarpa por efecto del control tectónico

Fuente: Tomado de Ángel et al. (1985)

Sinclinal del Socorro: El sinclinal del Socorro se encuentra ubicado en el sector suroriental de la ciudad, en cuyo núcleo se encuentran los barrios El Golf, El Milagro, El Carmelo, Socorro, Plan 400, Alameda La Victoria, Sector Medellín, San Fernando, atraviesa terrenos de la cárcel de Ternera y la Urbanización 11 de Noviembre, y se extiende hasta área de influencia de la falla Mamonal en terrenos del Centro Industrial Ternera, como se muestra en la figura 59.

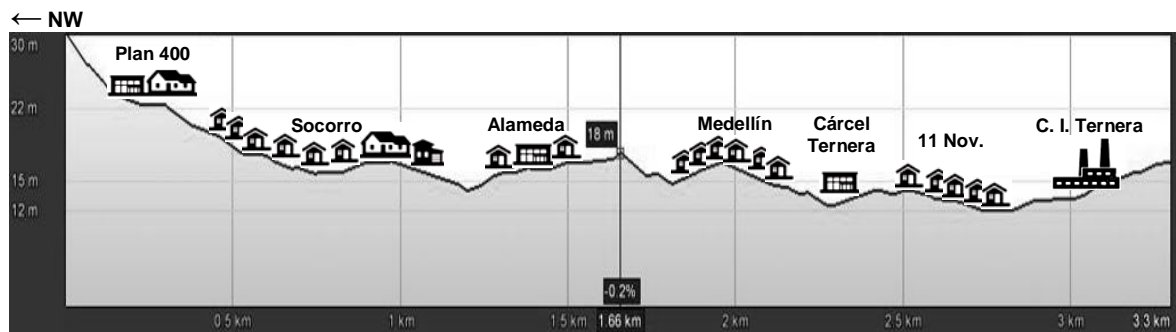


Figura 59. Esquema de perfil de elevación de un tramo del Sinclinal de Socorro

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

De acuerdo con Ingeominas (2001a), el sinclinal del Socorro es una estructura amplia de dirección de eje sureste, con buzamientos del orden de 7 a 10° en el costado norte y de 6 a 30° en el flanco sur. El eje de la estructura en el costado noroccidental presenta cabeceo alto en calizas del orden de 40°, mientras en el extremo suroriental el eje choca con el trazo de Falla de Mamonal.

El núcleo del sinclinal está parcialmente relleno por sedimentos de origen fluvial y coluvio-aluvial de composición arcillosa, y en éstos es característica la alta concentración de humedad.

❑ Fallas y lineamientos

Las fallas y lineamientos identificados en la ciudad se han formado a través de deformaciones plásticas en materiales rocosos calcáreos que tienen comportamiento frágil; las grietas formadas presentan movimiento o desplazamiento relativo en dirección paralela a la superficie de falla por efecto de esfuerzos tectónicos de compresión o tensión que generan roturas en la litosfera.



Ingeominas (2001a) cartografió las fallas y lineamientos presentes en la zona con base en análisis fotogeológico y control local de campo. Estas fracturas se pueden dividir en dos direcciones predominantes: fallas y lineamientos de dirección noreste y de dirección noroeste. A continuación se muestra una descripción general de las mismas.

Fallas y lineamientos de dirección noreste: La principal estructura con dirección noreste corresponde a la Falla de Mamonal, se localiza en el sector suroriental del casco urbano de Cartagena y es catalogada como una falla de carácter regional con el bloque occidental hundido que pone en contacto las arcillolitas de Bocatocino y la Formación calcárea de La Popa en la parte norte del departamento de Bolívar (Ángel et al. 1985).

Las llamadas arcillolitas de Bocatocino por Ángel et al. (1985) son hoy denominadas Formación Perdices y hacen referencia a una secuencia que se compone de lodolitas, arcillolitas y lodolitas arenosas de grano fino, están muy meteorizadas y son color gris verdoso.

El trazo de la falla de Mamonal fue definida por Ingeominas (2001a) usando la técnica de fotogeología por el sector sureste de las antiguas instalaciones de la Federación Nacional de Algodoneros con una dirección N40°E, donde se observaron buzamientos del orden de 75 a 84° hacia el NW y donde igualmente, se definieron confluencias de lineamientos y se evidenciaron espejos de falla que definen un movimiento de rumbo sinistral. En tiempo reciente se ha encontrado que esta falla presenta un rumbo N50°E y buzamiento del plano de falla al E de alrededor de 50 a 60° (SGC 2010), algo levemente diferente a la dirección del trazo propuesta inicialmente.

Es importante destacar que una parte de los terrenos de las antiguas instalaciones de la Federación Nacional de Algodoneros es hoy ocupado por el barrio Ciudadela 2000 vecino de los barrios Simón Bolívar y San Fernando, mientras que en la otra parte del lote se tenía previsto hacia el año 2005 la construcción del proyecto de VIS Colombiatón, sin embargo no fue posible ejecutarlo debido a que los suelos de esta zona podrían estar contaminados con desechos tóxicos que habrían sido enterrados en el lugar tiempo atrás.

La falla de Mamonal es definida como una estructura inversa por Ingeominas (2001a), con buzamientos del orden de 45° hacia el oriente. Tal situación se comprueba con los perfiles sísmicos realizados en el área, al igual que los perfiles geoeléctricos llevados a cabo por Ingeominas (2001a) a la altura del "volcán de lodo" de El Rodeo, cuya característica principal del "cono volcánico" que lo compone es el alto grado de fracturamiento asociado a los fenómenos de diapirismo de lodo y a movimientos relacionados con la falla de Mamonal. Según Carvajal (1999) esta falla regional delimita el costado noroccidental del "domo volcánico" principal y es clasificada como una estructura de rumbo sinestrolateral con componente inversa, con el bloque occidental hundido.

A nivel regional, la falla de Mamonal se extiende hasta Galerazamba y prosigue probablemente en zonas marinas, hacia el sur pone en contacto fallado a las calizas de la Formación Calcárea de La Popa con las areniscas de la Formación Detrítica Bayunca, marca un cambio significativo en la conformación geológica y geomorfológica de la región, puesto que al oriente las rocas se presentan replegadas fuertemente y asociadas a fallamientos inversos, mientras que al occidente la morfología es suavemente ondulada y con buzamientos del orden de 10 a 25°, solo interrumpidas por la presencia local de los



altos arrecifales asociados a la Formación Calcárea de La Popa (SGC 2010). Es claro entonces que el trazo de esta falla define una modificación topográfica importante de la zona, asociada con una sierra homoclinal denudada que representa un pliegue de arrastre en el cerro de Albornoz, el cual determina la extensión de la Formación Calcárea de La Popa en dicho cerro.

Es notable igualmente, al sur del cerro de Albornoz un lineamiento regional de dirección N70°E, el cual se relaciona por el costado oriental del área con buzamientos altos medidos del orden de 70° hacia el noreste y que definen un cambio brusco del rumbo del arroyo de Ternera en esa dirección (Ingeominas 2001a). Es probable que el mismo lineamiento tenga relación con otro definido por Carvajal y Pérez (1993) en el sector sur de la isla de Tierra Bomba, el cual muestra en planta un componente de desplazamiento dextralateral.

Una de las fallas que se destaca en el entorno estructural de la ciudad es la Falla de Henequén de dirección N75°E, la cual cruza diagonalmente el flanco sur del anticlinal de Albornoz, ocasiona basculamientos inversos con buzamientos de 25° al sureste en el sector de las antiguas canteras de Colclinker y termina en la falla de Mamonal (Reyes y Barbosa 1997). La falla de Henequén es una falla inversa de cabalgamiento, cuyo trazo constituye un ramal de la falla de Mamonal que afecta la Formación Calcárea de La Popa en el cerro de Albornoz (SGC 2010) y que la pone en contacto con rocas de la Formación Detrítica Bayunca. De acuerdo con Ingeominas (2001a), más al norte y cruzando con la misma dirección el centro del anticlinal de Albornoz, se presenta otro lineamiento que controla localmente los drenajes que cruzan el antiguo basurero municipal de Henequén (hoy clausurado).

El "volcán de lodo" de El Rodeo al sureste de la ciudad se encuentra atravesado por dos fallas de dirección N65°E que despegan de la Falla de Mamonal y definen el levantamiento de la parte central de la zona dómica. La fractura occidental es normal, de alto ángulo, con el bloque occidental hundido. La segunda falla es inversa y se encuentra a una distancia de 300 a 400 m al sureste, con el bloque levantado igualmente al occidente. Esta segunda fractura se subdivide en un ramal de características normales de 50 a 100 m más al sureste (Ingeominas 2001a).

Según Ingeominas (2001a), las fallas normal e inversa que atraviesan el volcán de El Rodeo controlan el curso del arroyo Matute más al oriente y están claramente asociadas a la concentración de manaderos de lodo o bocas en la zona de influencia del "volcán de lodo". De hecho, los registros sísmicos realizados por Ingeominas (2001a) en esta zona muestran una serie de fracturas menores por donde sale hacia la superficie el material lodoso. En la parte central de la zona donde se presenta la mayor concentración de manaderos de lodo, recientemente se han evidenciado levantamientos del terreno de un orden de 30 a 70 cm, de características inversas y en dirección noroeste. Tal situación es una muestra de la actividad tectónica del lugar.

Según Carvajal (1999) la eventualidad de una erupción considerable de lodo estaría acompañada de levantamientos y hundimientos del terreno en zonas circundantes al volcán de El Rodeo, donde se podrían formar fallas de rumbo con desplazamientos de 20 a 30 cm y fallas normales e inversas con desplazamientos verticales entre 10 y 100 cm.

Al sur de la Ciénaga de la Virgen se presenta un lineamiento-falla de dirección N78°E, el cual cruza los barrios de Zaragocilla, Buenos Aires, Chiquinquirá y Las Gaviotas, y está



asociado a fallas normales evidentes que según Ingeominas (2001a) se manifiestan cerca del Centro Médico Los Ejecutivos, donde se presentan con un desplazamiento relativo del orden de 30 a 50 cm con el bloque norte hundido.

Fallas y lineamientos de dirección noroeste: Hacia el sector norte del cerro de La Popa en el barrio San Francisco se presenta según Ingeominas (2001a) un fracturamiento regional de dirección N60°W que se extiende desde la base del cerro de La Popa en el barrio Daniel Lemaitre atravesando la Ciénaga de la Virgen hasta el sector sureste de la misma y alineando el arroyo Ternera (Canal Chapundún) pasando por los barrios Fredonia, Las Palmeras, Villa Rosita y Ternera. Este lineamiento delimita basculamientos de las calizas de La Popa en el sector nororiental del cerro y está asociado a cambios de buzamientos estructurales al sureste del barrio Villa Rosita.

Curiosamente, al suroriente del área los canales presentan un paralelismo sorprendente conformando unas llanuras bajas de 1.3 Km de ancho, que preliminarmente pueden estar asociadas a las fallas mencionadas. En el cerro de La Popa, igualmente se presentan lineamientos locales de la misma dirección, especialmente en el sector sureste del cerro en el sector Kennedy, donde se ubican basculamientos de desplazamientos normales asociados probablemente a deslizamientos traslacionales no activos (Ingeominas 2001a).

En el año 1998 se presentó un deslizamiento en el barrio San Francisco localizado sobre la loma del Guerrero en las estribaciones del cerro de La Popa, presumiblemente por efecto de los asentamientos del terreno ocasionados por un sismo de magnitud 5.9 en la escala de Richter que se sintió en la ciudad para esa época, y adicionalmente por la alta saturación de estratos de suelo arenosos, la forma convexa de altas pendientes de la ladera y la actividad antrópica en la misma (Carvajal 1998). Posteriormente, en el año 2010 se reactivaron los deslizamientos en el barrio San Francisco y el sector Sinaí. Estos movimientos en masa agudizados por la ola invernal de ese año, afectaron la mayor parte de la zona generando la destrucción de más de 1500 viviendas y dejando más de 1200 familias afectadas, es decir representó la cuasi-desaparición del barrio en mención.

A nivel estructural la loma del Guerrero se encuentra según Carvajal (1998) delimitada por dos fallas de dirección noroeste y sureste que son las que determinan la forma triangular de la loma. Estas fallas de poco desplazamiento y con los bloques hundidos hacia el norte, están asociadas con un diaclasamiento de dirección noreste y suroeste que definen la conformación ortogonal de las calizas de la parte superior.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), por el costado sur del cerro de La Popa y bordeando el sector sur de la ciénaga de la Virgen se evidencia un lineamiento de dirección N80°W que pone tentativamente en contacto el conjunto superior con el inferior de la Formación detrítica Bayunca en el sector Prado - Alcibia.

Según investigaciones hechas en zona de plataforma continental, Pelgrain (1990) en Ingeominas (2001a) traza una falla por el sur del cerro de La Popa y la clasifica como una falla de cizallamiento inversa de alto ángulo con desplazamiento dextralateral. De hecho, en el sector norte de la desembocadura del canal de Blas de Lezo, se nota un cambio brusco del curso del agua, lo cual tentativamente puede atribuirse al efecto de esta falla. Hipotéticamente, los fuertes escarpes mayores de 45° asociados con abanicos aluviales y coluviales, en el sector sur del cerro de La Popa, pueden deberse a efectos de la falla,



sin embargo, las evidencias geomorfológicas indican igualmente erosión marina intensa en tiempos subrecientes.

Hacia el sur de la Ciénaga de la Virgen se presenta otro lineamiento de dirección N 20°W, el cual cruza diagonalmente los anticlinales de Albornoz y Zaragocilla. Esta fractura, que localmente en el sector de Albornoz está relacionada con fallas normales de corto desplazamiento (de 10 a 20 cm), con el bloque oeste hundido, se cruza con los lineamientos de dirección noreste aproximadamente en el centro de los anticlinales (Ingeominas 2001a).

Según Ingeominas (2001a), al nororiente del área y asociado al canal de Blas de Lezo se presenta otro lineamiento con dirección N20°W, el cual en estribaciones del flanco norte de un anticlinal identificado en el sector la Sierrita está asociado a fallas normales de poco desplazamiento vertical (de 30 a 50 cm) y con el bloque oriental hundido.

Al norte del "volcán de lodo" de El Rodeo se presenta una fractura de dirección este - oeste que limita al domo por este sector. Corresponde a una falla de tipo normal con el bloque hundido hacia el norte. Evidencias de la misma se encuentran tanto en este sector, como en el barrio La Sierrita, donde muestra desplazamientos de 10 a 20 cm (Ingeominas 2001a).

□ Diaclasas

Las diaclasas de la región son fracturas que forman planos de debilidad en materiales rocosos de origen predominantemente calcáreo por efecto de esfuerzos de tensión o cizallamiento, no presentan movimiento a lo largo del plano de debilidad, pues en esta estructura los bloques no se desplazan uno con respecto del otro, más que una mínima separación transversal y forman grietas. Las diaclasas no se presentan nunca solas sino en sistemas complejos como es el caso del sector cerro de La Popa. Es posible que una parte del grupo de diaclasas en la ciudad se hayan formado por procesos de liberación de carga (descompresión) por erosión en los materiales que conforman las laderas.

Con base en el análisis preliminar de diagramas de frecuencia llevado a cabo con la información de fracturamiento recopilada en campo por parte de Ingeominas (2001a), se definieron tres sectores asociados al cerro de La Popa, la loma de Marión y el cerro de Albornoz, sobre los cuales se identificaron tendencias de diaclasamiento.

Sector cerro de La Popa: De manera preliminar en el cerro de La Popa Ingeominas (2001a) define tres tendencias de diaclasamiento predominantes; una de dirección N10°E, con buzamiento del orden de 74°SE; una segunda de dirección N72°E y buzamiento de 83° SE; y un tercer conjunto, de dirección N52°W, con buzamiento de 12° NE. Las separaciones entre diaclasas varían entre 5 y 80 cm, y se muestran asociadas localmente a venas de yeso, especialmente hacia la base.

Es importante destacar que la tercera dirección de diaclasas está relacionada con el fracturamiento nororiental y la estratificación, mientras las dos primeras direcciones probablemente están relacionadas con el plegamiento. Se resalta la relación existente entre la dirección de los escarpes en el costado oriental de La Popa, y la dirección predominante hacia el noroeste del primer conjunto de diaclasas indicado (Ingeominas 2001a).



Sector Anticlinal de Zaragocilla: Según los diagramas de frecuencia de fracturamiento para el sector del Anticlinal de Zaragocilla, Ingeominas (2001a) define preliminarmente tres tendencias de fracturamiento. La principal tendencia presenta dirección N72°W y buzamiento 80°NE, un segundo conjunto de dirección N59°E y buzamiento de 83° SE y una tercera tendencia de dirección N34°E y buzamiento de 58° NW. El espaciamiento entre diaclasas es predominantemente de 20 a 50 cm, aunque localmente pueden estar separadas hasta 1 m y esporádicamente asociadas con venas de yeso.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), la dirección principal de fracturamiento está relacionada con los fallamientos y lineamientos predominantes en el área. El segundo conjunto está relacionado igualmente con lineamientos y coincide con los escarpes casi verticales presente en el costado suroriental de la loma del Marión (sector Acueducto), lo que favorece los deslizamientos. Con respecto al tercer conjunto, éste muestra concordancia con la estratificación y se asocia al plegamiento existente.

Sector Anticlinal de las Antiguas canteras de Colclinker: En el sector del Anticlinal de Albornoz en zona de influencia de las antiguas canteras de Colclinker, Ingeominas (2001a) identifica preliminarmente dos tendencias de fracturamiento principal. Un conjunto de dirección N65°W y buzamiento de 81° NE y un segundo conjunto de dirección N47°E y buzamiento de 80° NW. Este segundo conjunto de fracturas está asociado con un tercer conjunto de dirección N 30°E y buzamiento de 12° SE.

El fracturamiento evidenciado en esta zona por Ingeominas (2001a) está relacionado esencialmente a plegamientos y presenta localmente separaciones de 10 a 20 cm. Hacia el oriente en el sector del "volcán de lodo" de El Rodeo, el diaclasamiento presenta tendencias hacia el suroccidente con buzamientos del orden de 50 a 70° con separación de 20 a 50 cm.

A continuación en las figuras 60, 61, 62 y 63 se muestra el Mapa de geología de la ciudad de Cartagena elaborado por Ingeominas (20001a), el cual ha sido dividido en cuatro planchas. Para su mejor visualización y mayor claridad, debido a su extensión y nivel de detalle, los mapas también han sido consignados en el Anexo C titulado "*Mapas de Geología de Cartagena (Ingeominas 2000)*". Se aclara que los mapas disponibles en formato pdf son del mes de Diciembre del año 2000, sin embargo la totalidad del estudio se entregó oficialmente en el año 2001.



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

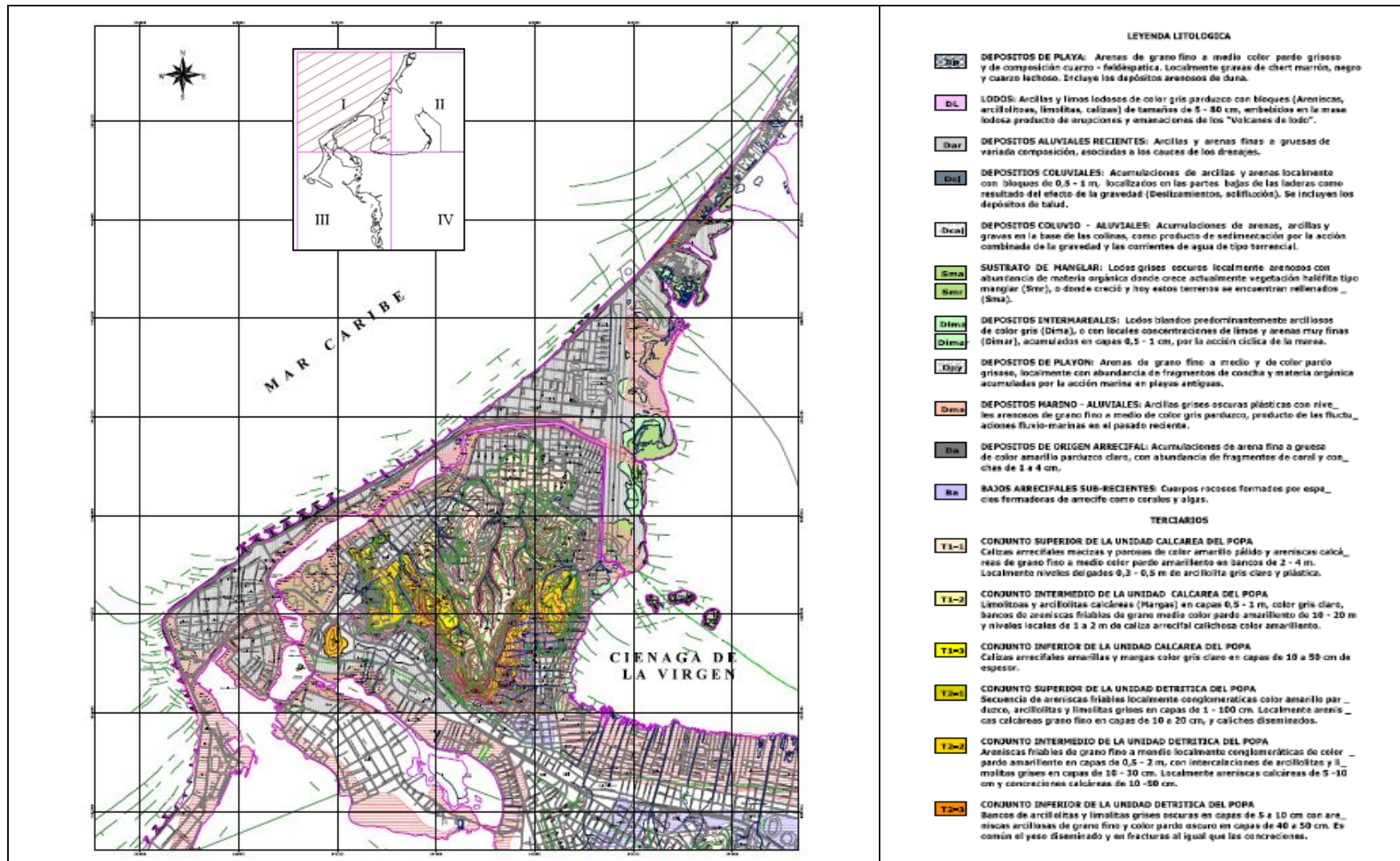


Figura 60. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha I de IV
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

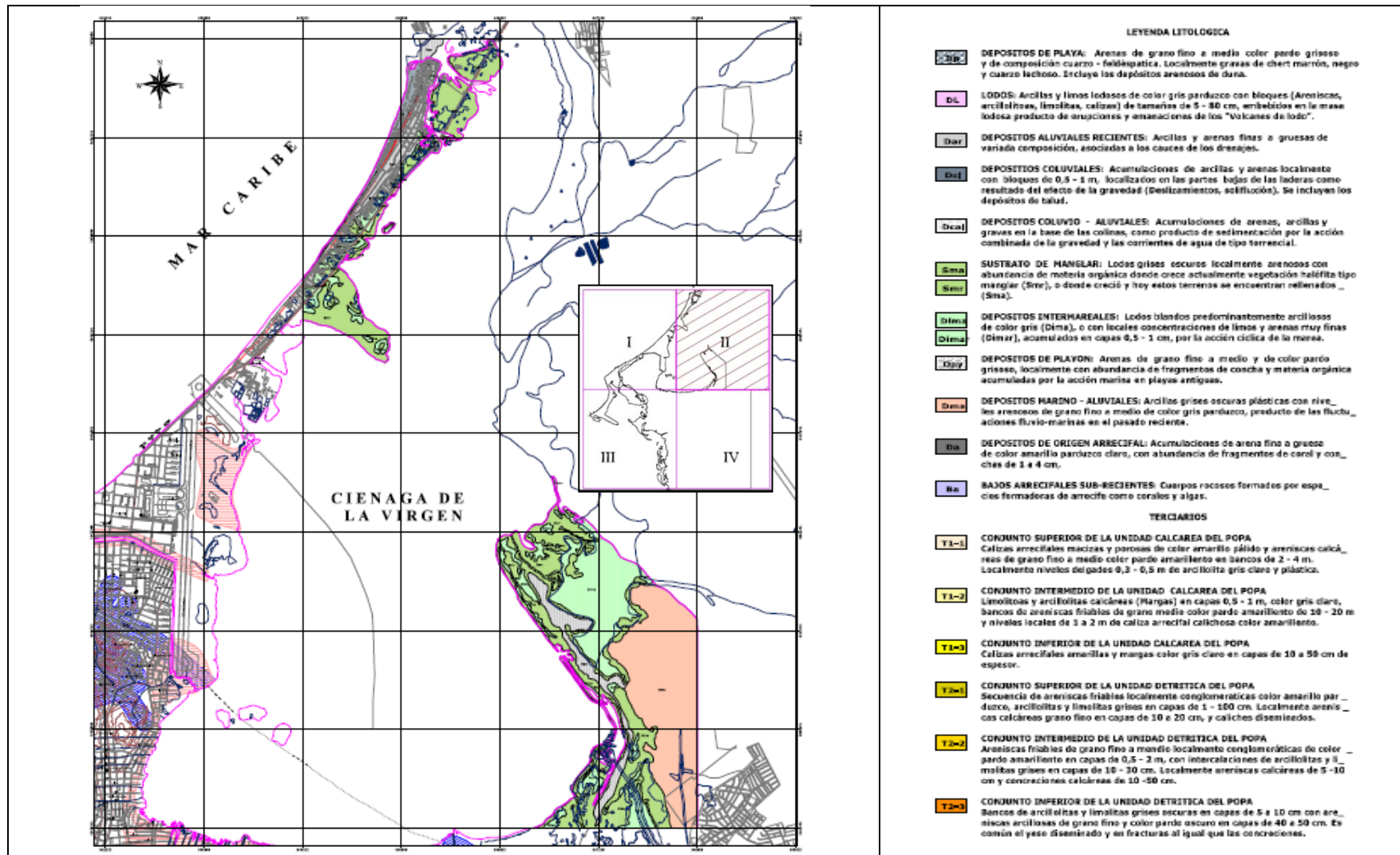


Figura 61. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha II de IV

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

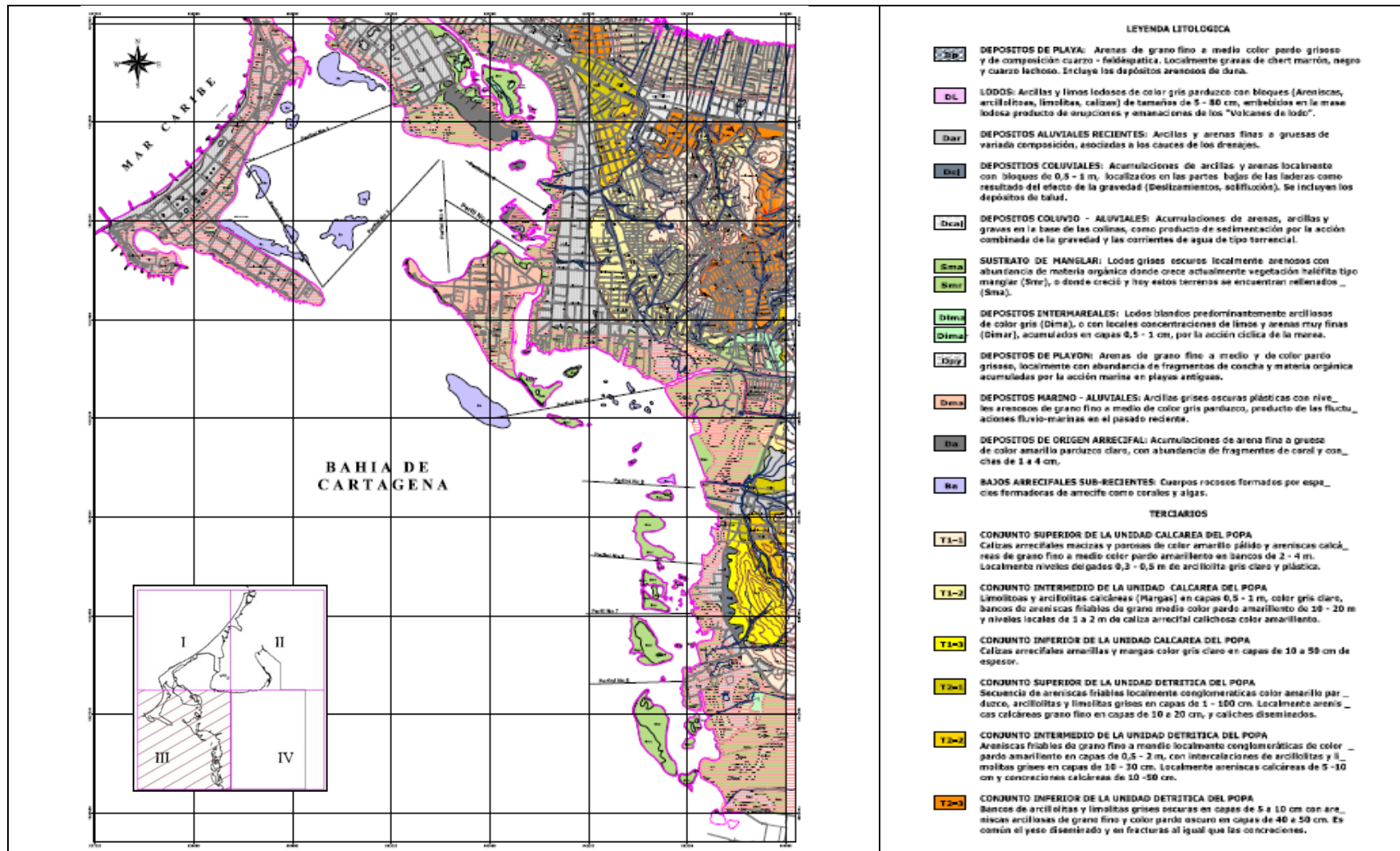


Figura 62. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha III de IV

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

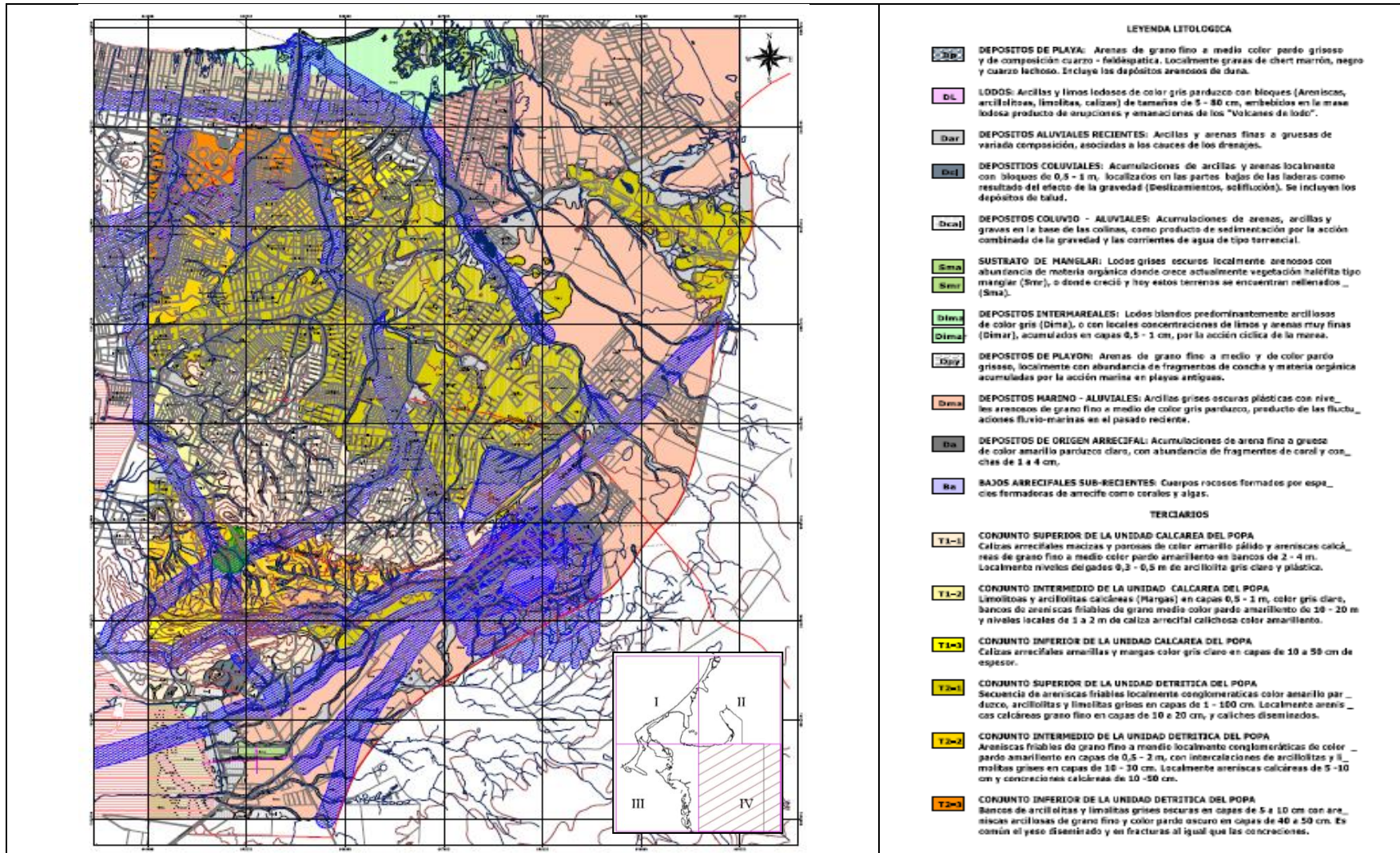


Figura 63. Mapa de Geología local de Cartagena - Plancha IV de IV

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



3.2.5. Geomorfología

La evolución de las geoformas está ligada tanto a la génesis geológica de las mismas (procesos endogenéticos), como a los procesos morfoclimáticos y morfodinámicos que han modificado las formas preexistentes (procesos exogenéticos), determinando su expresión morfológica actual (SGC 2010). Las geoformas identificadas por Ingeominas (2001a) en el casco urbano de Cartagena deben su origen a procesos endogenéticos asociados en primer lugar a los fenómenos de diapirismo de lodo, que determinan la deformación del terreno, conformación de zonas dómicas y la presencia local de “volcanes de lodo”, y en segundo lugar a los procesos compresivos relacionados con la interacción convergente de las placas tectónicas Caribe y Suramericana, cuya geodinámica interna ha contribuido a la disposición actual del territorio, en relación a levantamientos del terreno que han determinado la generación de basculamientos, plegamientos y fallamiento.

De acuerdo con SGC (2010), a escala regional el terreno donde se ubica la ciudad de Cartagena hace parte de la Provincia Geomorfológica del Sinú, cuya génesis geológica dentro de un contexto de ciudad está asociada predominantemente a las formaciones Detrítica Bayunca y Calcárea de La Popa. Al relacionar estas formaciones geológicas con la geomorfología presente se encuentra que la Formación Detrítica Bayunca dada las características blandas y friables de las rocas que la constituyen, definen una morfología de lomas y colinas dispuestas de manera compleja y, asociadas localmente a espolones estructurales, mesas muy denudadas y lomos de falla denudados, mientras que la Formación Calcárea de La Popa a nivel geomorfológico corresponde a Plataformas de abrasión levantadas y mesetas localmente escarpadas, mesas, cuevas y cerros. Igualmente se encuentran plegadas, formando sierras sinclinales con cabeceo, asociadas a pliegues de arrastre por fallamiento transcurrente

En este punto es importante destacar que las categorías de jerarquización geomorfológica se definen de una escala menor a una mayor en Geomorfoestructuras, provincias, regiones, unidades (también llamada subregiones), subunidades y componente geomorfológico. A continuación en la figura 64 se muestra un esquema de esta jerarquización ajustada por Carvajal (2002, 2003) con base en lo planteado por Velásquez (1999) e Ingeominas (2002), el cual se ha tomado de Carvajal (2008).

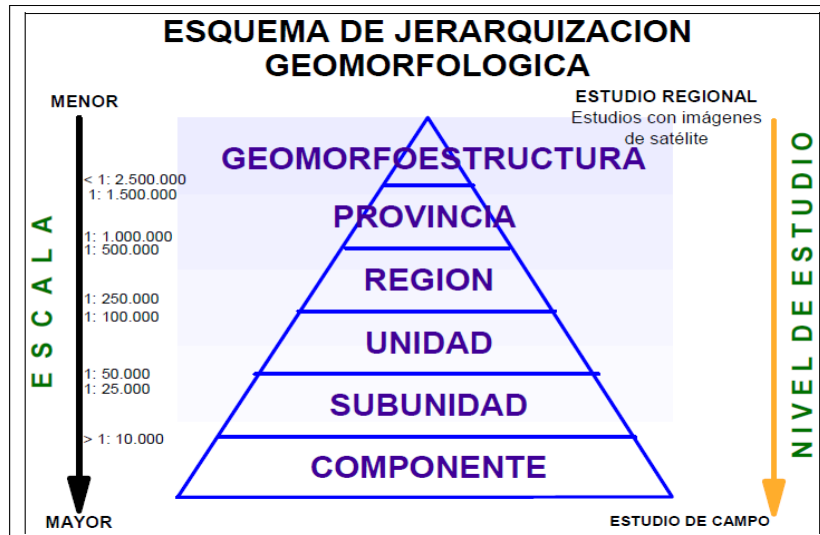


Figura 64. Esquema de jerarquización geomorfológica

Fuente: Tomado de Carvajal (2008)

Según SGC (2010), la Provincia Geomorfológica del Sinú perteneciente a la Geomorfoestructura del Sistema orogénico costero, ha sido subdividida en regiones y subregiones geomorfológicas, siguiendo su jerarquización geomorfológica. Las regiones geomorfológicas agrupan geoformas relacionadas genética y geográficamente, y están determinadas por la diferenciación de ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos. Estos ambientes son aquellos de clase morfoestructural, denudacional, depositacional y antrópico. Por otro lado, las subregiones o unidades geomorfológicas agrupan geoformas individuales y genéticamente homogéneas, y están determinadas por procesos morfodinámicos afectados por procesos geomórficos de construcción (acumulación) o destrucción (erosión).

En la zona de estudio definida por Ingeominas (2001a) correspondiente al casco urbano de Cartagena, la escala de trabajo utilizada fue 1:10000 y el análisis geomorfológico se realizó subdividiendo las unidades geomorfológicas a nivel de subunidades geomorfológicas. La caracterización y cartografía de las subunidades geomorfológicas que se definieron se fundamentó en los contrastes morfométricos que relacionan el tipo de roca y la correspondiente topografía del terreno. De igual manera, relaciona el contraste de las formaciones geológicas superficiales asociadas a procesos morfodinámicos identificados en campo, de acuerdo con la conceptualización de Velásquez (1999) en Ingeominas (2001a). De acuerdo con Ingeominas (2001a), la modelación actual de las geoformas iniciales es resultado de la acción de procesos exogenéticos marinos, fluviomarinos y continentales, localmente alterados por la acción del hombre en su afán de ocupar el territorio para su uso habitacional o industrial.

En el presente trabajo se utiliza la cartografía geomorfológica generada por Ingeominas (2001a) según su metodología aplicada. Es importante mencionar que para futuros estudios geomorfológicos que se proyecten en la zona a una escala de trabajo menor que 1:10000 es conveniente que el análisis geomorfológico corresponda al nivel de componente geomorfológico siguiendo lo planteado en Carvajal (2008).

Las unidades geomorfológicas definidas según su expresión topográfica, Ingeominas (2001a) las subdivide en unidades geomorfológicas prominentes, cuya expresión es



elevada con respecto al nivel del mar y en unidades geomorfológicas bajas, cuya expresión topográfica es baja con respecto a las zonas de colinas y lomas. En el presente documento se consigna la descripción geomorfológica hecha por Ingeominas (2001a), sin embargo la subdivisión de las unidades se plantea con base en el criterio del tipo de ambiente geomorfológico predominante, siguiendo lo planteado en SGC (2010).

Los ambientes geomorfológicos predominantes en la región son: Morfodinámico estructural denudacional (incluye morfodinámico denudacional), marino costero (incluye eólico), fluvial y de manera implícita la acción antrópica.

La información de geomorfología que es consignada a continuación, fue extraída del estudio elaborado por Ingeominas (2001a) en la ciudad de Cartagena y ha sido ampliada en algunos apartes usando información generada por Ángel et al. (1985), Gayet y Vernet (1989), Carvajal y Pérez (1993), Carvajal (1998, 1999, 2001, 2003, 2012), Aguilar-Collazo y Jiménez (2005), Barboza (2007), NSSH (2008), UDC-AMC (2004, 2009a y b, 2011), SGC (2010) y Gómez et al. (2012).

Geoformas de origen Morfoestructural denudacional

De acuerdo con SGC (2010), estas geoformas exhiben una expresión morfológica definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes en la ciudad. Se presentan afectadas por procesos erosivos intensos y se caracterizan por su relieve colinado a alomado de laderas con pendientes abruptas y escarpadas. Dentro de este tipo de geoformas se han incluido aquellas de origen morfodinámico denudacional, pues el contraste del relieve, el nivel de fracturamiento del terreno, en asocio del clima semiárido de la región han contribuido al desmantelamiento de las geoformas iniciales de origen morfoestructural, generando la formación de planicies complejas de lomeríos y colinas de baja altura, asociados con pedimentos de erosión y acumulación (SGC 2010).

Según SGC (2010), en este tipo de ambiente denudacional predominan los procesos de remoción y disección de materiales de sus cauces y donde la actividad antrópica ha sido intensa, se pueden observar procesos acentuados de erosión y generación local de tierras malas. Entre las unidades geomorfológicas de este ambiente denudacional se incluyen las colinas, lomas, domos volcánicos, pedimentos (glacis) y coluviones.

Colinas (C): Las colinas son prominencias topográficas con alturas superiores a 55 m y hasta 300 m, de pendientes localmente rectas, cóncavas o convexas, donde es común el desarrollo de drenaje radial o angular, con escarpes subverticales de 15 a 50 m de altura. Este tipo de elevaciones tienen bases aproximadamente circulares y laderas que divergen en todas las direcciones a partir de cimas estrechas y redondeadas.

Las colinas deben su origen a procesos degradacionales intensos, ejercidos sobre rocas dispuestas de manera casi horizontal. Según SGC (2010) estas formas se presentan particularmente en el núcleo de pliegues anticlinales y sinclinales amplios, donde el desmantelamiento de las rocas es alto, dejando remanentes rocosos. Tal situación se presenta por el alto grado de erodabilidad de las rocas aflorantes en la zona, particularmente de la Formación Detrítica Bayunca, lo cual se favorece, tanto por el clima semiárido imperante, como por la baja cobertura vegetal de la región.

Las colinas pueden ocurrir aisladas o en grupo y de acuerdo con su altura, pueden dividirse en colinas bajas de una altura de hasta 90 m y colinas altas entre 90 y 300 m de altura (NSSH, 2008).



Aunque coloquialmente las principales elevaciones de la ciudad son llamadas respectivamente cerro de La Popa (150 m de altura), cerro de Albornoz (110 m de altura) y loma del Marión (60 m de altura), a nivel geomorfológico se definen como colinas y están asociadas genéticamente a las calizas de la Formación Calcárea de La Popa. Se aclara que por efectos prácticos en el presente documento estas elevaciones son llamadas de la misma forma en que coloquialmente se conocen.

Cerro de La Popa: Es una colina alta que corresponde a una cuesta cuya altura máxima se aproxima a 150 m en su parte sur cerca al convento de los Agustinos Recoletos. Se dispone elongada hacia el norte con pendiente recta de 5 a 10° hacia el noroeste que coincide con la pendiente estructural de las calizas de la Formación Calcárea de La Popa. Se desarrolla un drenaje angular con valles profundos de 15 a 20 m, en formas de "V", asimétricos y localmente con fondo plano o curvo.

Según Ingeominas (2001a), el flanco suroriental del cerro de La Popa se caracteriza por presentar laderas convexas hacia la base con pendientes del orden de 15 a 20° y escarpes en la parte superior de 30 a 50 m de altura, con pendientes de 33 a 40° que están asociadas a las calizas de la Formación Calcárea de La Popa. Los canales desarrollados hacia la base de la ladera son en forma de "V" con profundización significativa y retrogresiva debido a la erosión acentuada, favorecida por el carácter friable de las rocas de la Formación Detrítica Bayunca. Hacia la parte intermedia de la ladera, se presenta una franja de 50 a 70 m de ancho y pendientes de 7 a 15° que localmente corresponde con abanicos coluviales producto de la erosión intensa de la zona escarpada.

El sector sur del cerro de La Popa es particularmente la zona más escarpada, con pendientes de 33 a 45° y altura de escarpes de 70 a 80 m; se presentan a nivel local escarpes mayores en la base del convento de los Agustinos Recoletos. Hacia la base del cerro de La Popa se presentan abanicos aluviales y coluviales, que se han formado por la erosión intensa de la ladera. Es importante destacar que se han detectado coronas de deslizamientos no activas en la actualidad a través del uso de fotografías aéreas antiguas (Ingeominas 2001a). En la figura 65 se aprecia una vista parcial del cerro de La Popa.



Figura 65. Vista parcial del cerro de La Popa (Sector Sur)

Fuente: UDC-AMC (2009a)



Las pendientes de los cauces, al igual que las laderas son altas y en forma de "V", localmente con paredes verticales y fondo plano. Las laderas presentan perfiles rectos, aunque a nivel local son convexos e irregulares.

La ladera noroccidental del cerro de La Popa en el sector Los Comuneros se caracteriza por sus formas convexas hacia la base y escarpes de 15 a 25 m de altura hacia la parte superior. Hacia la parte inferior, las pendientes son de 10 a 20°, mientras hacia la parte más alta alcanza los 45°.

Con base en el análisis de fotografías aéreas y control local de campo, hecho por Ingeominas (2001a), en el sector suroccidental del cerro de La Popa se determinaron deslizamientos tipo translacional no activo, los cuales probablemente se generaron por la profundización del canal y las inclinaciones estructurales del orden de 20° en favor de la pendiente.

La acción antropogénica es alta en el cerro de La Popa, debido a la antigua explotación de canteras (hoy abandonadas) y la colonización del cerro por personas de bajos ingresos económicos que, en su afán de acondicionar el terreno para la vivienda excavan escarpes verticales de 4 a 5 m, especialmente hacia la parte oriental del cerro. Tal situación determina la obstrucción y destrucción local de los drenajes naturales, lo que determina una mala evacuación de las aguas superficiales (Ingeominas 2001a).

En las antiguas canteras se encuentran escarpes verticales de 15 a 25 m de altura, hechos especialmente para la explotación de las calizas. Son notables los escarpes en los barrios Pedro Salazar, Los Comuneros y el flanco oriental del cerro de La Popa.

Loma del Marión: Está "loma" es en realidad una colina baja, cuya altura máxima oscila entre 55 y 60 m hacia el Sector Acueducto (barrio Paraguay), mientras que hacia el barrio Las Brisas y 9 de Abril su altura máxima es del orden de 57 m; está asociada al flanco noroccidental del Anticlinal de Zaragocilla (ver figura 66).

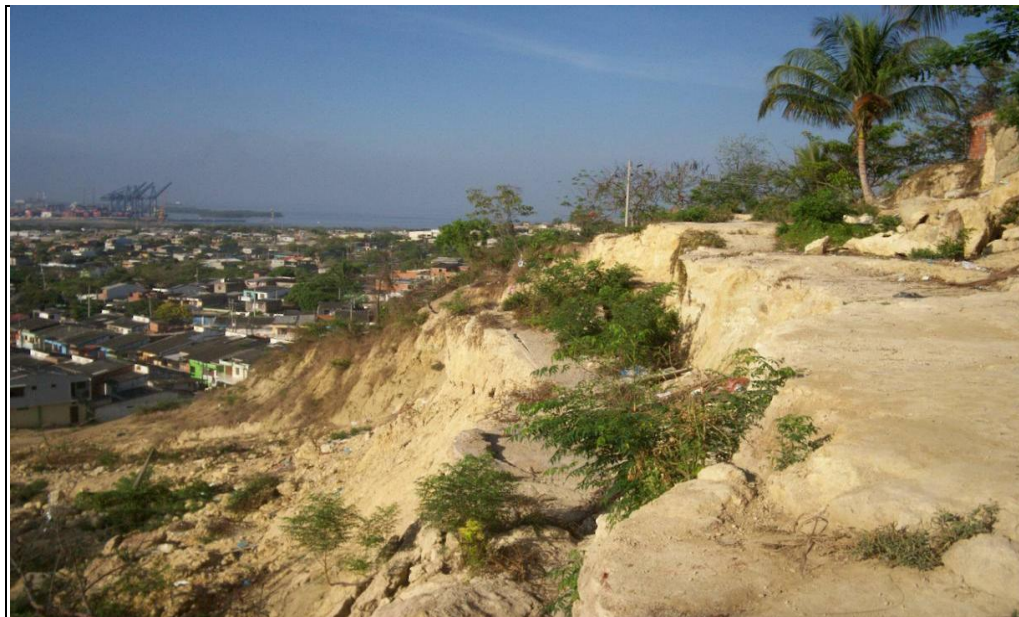


Figura 66. Vista parcial de la loma del Marión (sector sureste: Las Brisas)

Fuente: UDC-AMC (2009b)



De acuerdo con Ingeominas (2001a), hacia el sector Acueducto la colina presenta desarrollo de un drenaje radial espaciado con cauces profundos y escarpados, y confiere al terreno una fuerte disección con valles en forma de "U", localmente con fondo plano y con escarpes del orden de 10 a 25 m de altura y pendientes de 7 a 15° de inclinación. A nivel local, las laderas poseen pendientes rectas asociadas tanto a las inclinaciones estructurales de las calizas de la Formación Calcárea de La Popa como al fuerte fracturamiento que presenta la zona, el cual determina la conformación de pequeños cerros delimitados por las fallas geológicas que afectan el sector.

Por acción antrópica, las pendientes en general han sido incrementadas localmente hasta en 33°, en especial en el costado oriental de la colina, Tal situación ha generado deslizamientos rotacionales periódicos en el sector sureste (barrios Nuevo Bosque Sector Manzanares, Las Brisas y 9 de Abril). En el año 2010 las pendientes del terreno aumentaron en el sector Manzanares y Mirador del Nuevo Bosque formando escarpes subverticales significativos que fueron posteriormente intervenidos a través de obras localizadas de contención y protección (Ingeominas 2001a).

Cerro de Albornoz: Las colinas de este anticlinal están asociadas a los flancos sur y norte de dicha estructura. En el sector sur del anticlinal se aprecia el cerro de Albornoz, cuyas elevaciones máximas son del orden de 100 a 110 m sobre el nivel del mar, lo que lo configura como una colina alta, mientras que en el sector norte del anticlinal, las elevaciones no sobrepasan los 65 m, por lo cual solo se aprecian colinas bajas.



Figura 67. Vista del cerro de Albornoz (vía Mamonal)
Fuente: Google Maps (2014)

Según Ingeominas (2001a), las pendientes en el cerro de Albornoz son rectas, localmente cóncavas, asociadas a la litología y pendiente estructural de las calizas de la Formación Calcárea de La Popa, lo cual en su conjunto definen una sierra homoclinal denudada. Las laderas tienen pendientes de 7 a 33°, aunque por efecto de la explotación de materiales son comunes los escarpes de 10 a 20 m de altura y pendientes mayores de 45°. Tal situación ha generado deslizamientos locales de tipo translacional que han afectado un área superior a los 20000 m². Es notorio el escarpe natural de forma curva de 30 a 40 m de altura en el costado norte del cerro de Albornoz, el cual presenta pendientes entre 33 y 45° y aun mayores. El patrón de drenaje del cerro de Albornoz es



subparalelo. Los drenajes naturales han sido parcialmente destruidos por la explotación de materiales y dejan zonas bajas donde se estancan las aguas superficiales.

La parte norte del Anticlinal de Albornoz corresponde según Ingeominas (2001a) a una cuesta que conforma en conjunto con el sur un paleoatolón elongado en dirección E-W; presenta en general pendientes estructurales de 3 a 15° hacia el noreste. Tales pendientes se modifican por los drenajes en forma de "V" con fondo curvo y pendientes laterales de 15 a 33° y aun mayores, especialmente en el sector sur y suroeste del cerro de Albornoz, donde por registro fotográfico aéreo, se evidencian antiguas coronas de deslizamiento tipo rotacional. La ladera norte es fuertemente disectada, y determina un drenaje radial subparalelo y angular denso. La influencia antropogénica se manifiesta a nivel local a través de escarpes verticales de 3 a 15 m, realizados para la construcción desordenada de casas y en algunos sectores para la explotación de las calizas aflorantes en el área.

Finalmente es importante mencionar que al noroccidente del "volcán de lodo" de El Rodeo se presentan colinas de características escarpadas y altura del orden de 65 m sobre el nivel del mar que enmarcan la zona "volcánica de lodo" y se derivan del anticlinal de Albornoz.

Lomas (L): Las lomas son prominencias topográficas con elevaciones menores de 55 m, poseen cimas muy amplias de formas redondeadas y elongadas, y de laderas usualmente convexas con inclinaciones entre 10 y 20°. Según SGC (2010) su origen está definido por procesos degradacionales intensos, sobre geoformas estructurales preexistentes inclinadas que han sido desmanteladas por erosión acentuada. La alta erodabilidad de las rocas particularmente de la Formación Detrítica Bayunca contribuye en la distribución de las lomas en la ciudad, cuya altura usual varía de 10 a 50 m.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), estas elevaciones presentan morfología suavemente ondulada donde se desarrolla, en general, un drenaje dendrítico, subparalelo y espaciado (poco denso). Se encuentran ampliamente distribuidos en el casco urbano de Cartagena y en relación genética directa con las rocas friables de la Formación Detrítica Bayunca.

En zona de influencia del cerro de La Popa se han formado en tiempo subreciente estribaciones a nivel lateral que se derivan en lomas y colinas de una altura menor; entre ellas se destacan la loma del Peyé, "loma" del Guerrero, loma del Colegio de La Salle, loma del Castillo San Felipe de Barajas y loma del Diamante.

Loma del Peyé: Se ubica al oriente del cerro, posee 50 m de altura y alberga parte de los barrios San Bernardo (incluye sector Panorama, Cantera y Colegio Pies Descalzos) y La María (incluye sector Los Corales), se caracteriza por sus pendientes topográficas cuasi-rectas, del orden de 7 a 8° hacia el noreste, relacionadas con las pendientes estructurales que definen una morfología de cuestas (ver figura 68).

Loma del Guerrero: Esta "loma" es otra estribación, se define en realidad como una colina baja de 60 m de altura, se ubica al nororiente del cerro y sobre ella está emplazado el barrio San Francisco. Según Carvajal (1998) esta colina de forma triangular en planta, tiene formas convexas con pendientes del orden de 30 a 40° en la parte superior y de 15 a 25° en la parte media y baja; se presentan procesos erosivos intensos e intervención antrópica relacionada con la excavación de escarpes de 2 a 3 m de altura



para acondicionar el terreno para la construcción de viviendas, alteración y taponamiento de drenajes y vertimiento de aguas servidas y residuos sólidos. En el sector norte de la colina se encuentra un escarpe en forma de herradura que corresponde a una corona antigua de deslizamiento, la cual se reactivó con la ola invernal del año 2010 (figura 69).



Figura 68. Vista parcial de la loma del Peyé, Sector Los Corales
Fuente: El autor (2015)



Figura 69. Parte alta de la loma del Guerrero (Escarpe principal)
Fuente: UDC-AMC (2011)



La **loma del Colegio de La Salle** llamada antes cerro Le Franc se localiza al occidente del cerro de La Popa, posee 35 m de altura y en sus terrenos fue construido hace más de 60 años el primer edificio de la institución educativa y hacia su flanco norte se ubica parte del sector Paseo de Bolívar. Se caracteriza por sus pendientes topográficas rectas, del orden de 3 a 5° hacia el noroeste, que definen una morfología de cuevas, sin embargo en límites con la Urbanización La Española, las pendientes son altas superando en algunos casos los 45° y el drenaje es incipiente, de tipo radial y subparalelo (figura 70).



Figura 70. Vista parcial de la loma del Colegio de La Salle

Fuente: El autor (2009)

La **loma del Castillo San Felipe de Barajas** llamada antiguamente cerro San Lázaro se localiza al occidente del cerro de La Popa, tiene una altura aproximada de 30 m y en sus terrenos fue construida en el año de 1536 una fortificación en ladrillo y roca con fines militares para la protección de la ciudad y hoy en día sirve como atractivo turístico. En la figura 71 se puede apreciar su estado actual.

Finalmente la **loma del Diamante** se ubica al noroccidente del cerro, presenta una altura aproximada de 26 m y alberga sobre ella parte del barrio Torices. En el sector sur de la loma las pendientes alcanzan los 70° formando un escarpe aparentemente estable, aunque erosionado (ver figura 72), sin embargo hacia los sectores sureste y suroeste, las pendientes decrecen, presentándose en el orden de 30°, y más aun hacia el norte donde el terreno tiende a emparejarse y se presenta una especie de llanura.



Figura 71. Vista parcial de la loma del Castillo San Felipe de Barajas
Fuente: El autor (2015)



Figura 72. Vista parcial de la loma del Diamante (sector sur)
Fuente: UDC-AMC (2009a)

En general las zonas que bordean lateralmente las elevaciones pertenecientes a las estribaciones del cerro de La Popa son laderas de pendientes cortas e irregulares del



orden de 15 a 33° que sobrepasan los 45° en algunos sectores, tal es el caso del sector oriental de la loma del Colegio de La Salle.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), el drenaje en estas lomas es incipiente, de tipo radial y subparalelo, con valle en forma de "V". Por efecto de la intervención antropogénica algunas de estas elevaciones han sido intervenidas tiempo atrás para la explotación de arena y calizas a través de canteras, especialmente en la loma del Peyé (sector nororiental) y para la adaptación del terreno para la construcción de casas o asentamientos irregulares.

Los escarpes naturales han sido muy modificados, a nivel local presentan alturas de 15 a 20 m y en algunas zonas dejan escarpes menores de una altura entre 5 y 10 m, lo cual genera movimientos en masa tipo deslizamientos a una escala menor y caída de bloques. En ciertos sectores de estas elevaciones los escarpes pueden ser de una altura menor que 5 m.

Según Ingeominas (2001a), en el sector sur y sureste de la Ciénaga de la Virgen, las lomas presentan la mayor cobertura en la ciudad con un área aproximada de 10 Km², se caracterizan por sus pendientes suaves entre 3 y 7°, aunque al suroriente de la ciudad se presenta un sistema de lomeríos extenso y de poca altura que se extiende sobre la avenida Pedro de Heredia desde el Centro Comercial Los Ejecutivos hasta La Urbanización La Princesa y sobre la Transversal 54 desde El barrio Nuevo Bosque hasta el barrio Anita, donde las pendientes pueden alcanzar los 15° al noroccidente del barrio Los Ejecutivos.

Las lomas en esta zona no superan los 45 m de elevación sobre el nivel del mar, en ellas se desarrolla un drenaje dendrítico, subparalelo y espaciado, con valles en forma de "U" y de artesa, localmente más acentuados hacia el sector del Hospital Universitario (Zaragocilla), donde el drenaje es más denso y las laderas son de pendientes cóncavas y convexas y es particularmente notorio, el alto carcavamiento de las mismas, asociado localmente a la presencia de arcillas expansivas que permiten la concentración de la escorrentía superficial por las grietas formadas (Ingeominas 2001a).

Al oriente de la Bahía de Cartagena en forma de franja de dirección noroccidente se presentan lomas de 10 a 20 m de altura que albergan a los barrios España, Bruselas, Juan XXIII, Paraguay, Nuevo Paraguay, Republica de Chile, Nuevo Chile, Los Cerros y Altos de San Isidro, donde localmente los cauces se muestran más profundos.

El sector sur de la Ciénaga de la Virgen es la zona más poblada de la ciudad, según lo planteado por Ingeominas (2001a). Tal situación ha permitido la modificación natural del paisaje, y se observa como un sinnúmero de casas han sido construidas sobre los drenajes naturales, lo que ocasiona inundaciones locales que son evacuadas rápidamente, una vez ha finalizado la lluvia. Esta característica es particularmente notoria hacia la Avenida Pedro de Heredia en los Canales Tabú, Chiquinquirá y Blas de Lezo, y el sector de Ceballos, más al sur.

Debido a la presencia de arenas y gravas aptas para la construcción en algunas lomas de la ciudad, antiguamente existían canteras que dejaron como resultado escarpes verticales de 3 a 6 m de altura, en especial en el barrio Los Calamares en las etapas III y V (Ingeominas 2001a) y en el sector del cerro de La Popa. Del mismo modo se han excavado escarpes similares de una altura entre 5 y 10 m, para la urbanización de



algunas áreas. Es importante destacar que aunque muchos de estos escarpes no muestran aparentemente problemas de inestabilidad, deben ser intervenidos oportunamente y ser protegidos contra procesos erosivos y posibles movimientos en masa

Hacia la parte norte del cerro de Albornoz igualmente se destacan sistemas de lomas, en los barrios 20 de Julio (Sur), Bellavista, Villa Barraza, El Libertador, Villa Rosa, Henequén y 3 de Junio. Según Ingeominas (2001a) se presentan lomas fuertemente disectadas de 35 a 40 m de altura y pendientes convexas, localmente cóncavas de 3 a 7° de inclinación. En estas lomas asociadas al núcleo del llamado Anticlinal de Albornoz, se desarrolla un drenaje dendrítico y subparalelo con valles en forma de artesa en las partes bajas y de "V" en las zonas altas.

Muchas zonas circundantes al cerro de Albornoz han sido altamente colonizadas, por lo tanto los habitantes a nivel local han ocupado los canales de drenaje natural. De acuerdo con Ingeominas (2001a) llama la atención la ubicación del antiguo basurero municipal de Henequén, el cual se hizo precisamente sobre estos arroyos intermitentes y donde hoy existen asentamientos irregulares entre ellos Henequén y 3 de Junio. Tal situación ha generado inundación en la parte alta de los cauces y deslizamientos menores en algunos sitios. Es muy probable que los acuíferos existentes en la zona, asociados con las areniscas del conjunto intermedio de la Formación Detrítica Bayunca estén contaminados.

Finalmente es importante mencionar que al occidente del "volcán de lodo" de El Rodeo se presentan lomas que enmarcan la zona "volcánica de lodo", están asociadas al anticlinal de Albornoz y exhiben según Carvajal (1999) morfología suavemente ondulada, de pendientes rectas relacionadas con control estructural litológico y de un fallamiento asociado a la falla de Mamonal.

Domos volcánicas (Dm): Los domos volcánicos son prominencias topográficas de morfología alomada y redondeada, y plana en las partes altas. Su origen está asociado a movimientos verticales generados por el fenómeno de diapirismo de lodos, donde según Carvajal (2012) la deformación de la superficie provocada se presenta por la expulsión de capas de lodo de baja densidad, poca compactación y una presión de poros anormalmente alta, por lo que pueden reaccionar ante cualquier alteración del medio en que fueron depositados.

En el sector suroriental de la ciudad de Cartagena, los domos volcánicos existentes hacen parte de la estructura geomorfológica del "volcán de lodo" de El Rodeo (ver figura 73), el cual se constituye de dos zonas dómicas disectadas por un ramal de fallas o fracturamiento fallado, el cual es considerado según SGC (2010) un fallamiento conjugado sintético de la falla de Mamonal.



Figura 73. Vista panorámica del "volcán de lodo" de El Rodeo (Nótese lotes intervenidos)

Fuente: Tomado de Google Earth (2013) y modificado por el autor (2015)

Por efecto de este fracturamiento los "edificios volcánicos" se presentan elongados en dirección NE con un diámetro promedio de 1200 m y una altura de 60 m sobre el nivel del mar, en el centro principal de emisión de lodo (SGC 2010). Se localizan en antiguos terrenos cuyo propietario era la Constructora Álvarez y Collins SA y donde hoy se aprecian lotes en proceso de urbanización de propiedad de las Empresas Tenaris Tubocaribe, Herrera y Duran (H&D) y de la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB). Es típico en estos domos, el desarrollo de drenaje radial, afectado localmente por el fracturamiento antes mencionado (Carvajal 1999).

Es importante destacar que la parte alta del "volcán de lodo" de El Rodeo donde se encuentra el centro principal de emisión de lodo y su área de influencia es definida a nivel geomorfológico como flujos (F) por Ingeominas (2001a), pues allí se encuentran aproximadamente 60 bocas o manaderos tipo C y O (según la clasificación de Higgins y Saunders 1974, en Carvajal 2001) con diámetros de 20 a 60 cm, por donde fluyen lodos grises arcillo-limosos muy fluidos al igual que gases como el aire, metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

La morfología de la parte superior del "volcán de lodo" es plana, suavemente ondulada y cubierta de los flujos de lodo de erupciones pasadas, y localmente peneplanizadas por acción antrópica para acondicionar el terreno para la construcción de infraestructura (Ingeominas 2001a). Según SGC (2010) es característico de las partes planas de la parte superior del domo, el desplazamiento fallado de rumbo dextral con componente normal en dirección NEE y desplazamiento vertical de 3 a 15 cm, asociado con carcavamiento acentuado, alineamiento de bocas y grietas de disecación locales. Llama la atención en la parte superior, la permanencia de coberturas de verdolaga aun en los tiempos secos extremos, lo cual indica la permeabilidad de las rocas infrayacentes del conjunto intermedio de la Formación Calcárea de La Popa, lo mismo que la acción y la fuerza del fenómeno del diapirismo de lodo para mantener estas zonas húmedas a esta altura (Carvajal 1999).

Los flancos de los domos están asociados a laderas convexas con pendientes entre 15 y 25°, donde es igualmente característico el fuerte carcavamiento (Ingeominas 2001a). Hacia la parte norte y en las vías que atraviesan las estructuras "volcánicas de lodo" se



presentan escarpes de 3 a 4 m de altura, asociadas a actividad antrópica, lo que según SGC (2010) ha contribuido al desconfinamiento de los lodos y la generación de flujos del material de los escarpes.

En tiempo reciente, SGC (2010) ha definido los domos volcánicos como "*volcán de lodo*" *activo*, cuya geoforma de origen morfoestructural denudacional se considera un cerro colinado en forma de domo afectado por diapirismo de lodo, mientras que la zona de su centro principal de emisión de lodo lo define como *flujos de lodo actuales* (geoforma de origen denudacional) conformados por lóbulos y abanicos de lodo alomados originados por erupciones "volcánicas de lodo". En general lo planteado por Ingeominas (2001a) y SGC (2010) es similar.

Pedimentos (Pda - Pde): Los pedimentos son superficies de erosión próximas a un plano de longitud moderadamente larga a muy larga, de formas cóncavas y suavemente inclinadas, esculpida en rocas blandas de la Formación Detrítica Bayunca por procesos de escorrentía superficial en el pie de zonas colinadas o alomadas de la ciudad, sometidas a condiciones climáticas semiáridas. A nivel local hacia la base de las elevaciones, los pedimentos (llamados también glacia) se encuentran cubiertos ocasionalmente por delgadas capas de grava de origen aluvial producto del arrastre de materiales asociados con el proceso de escorrentía superficial.

A nivel local Ingeominas (2001a) diferencia los pedimentos por erosión diferencial en sustrato rocoso (Pde) y los pedimentos por acumulación de sedimentos cuesta abajo (Pda). Según SGC (2010) los pedimentos por erosión se caracterizan por ser superficies erosivas largas a muy largas, de forma cóncava y suavemente inclinadas, formadas en roca blanda en el pie de las colinas o lomas por procesos de escorrentía superficial, mientras que los pedimentos por acumulación se caracterizan por presentarse como superficies de acumulación de longitudes moderadamente largas, de formas cóncavas y suavemente inclinadas; su génesis se asocia a la acumulación del material fino en zonas bajas por procesos de erosión laminar.

En Cartagena, los pedimentos son superficies en declive de 1 a 7° de inclinación localizadas en el pie de las colinas y lomas, cuyo origen se debe a procesos erosivos de acumulación diferencial, asociados a flujos laminares de agua (Ingeominas 2001a). En el casco urbano, los pedimentos se definen por los bordes del cerro de La Popa, asociado a las lomas del Peyé, del Diamante, del Colegio de La Salle y del Castillo San Felipe de Barajas. Igualmente se presentan en las lomas descritas al sur de la ciénaga de la Virgen en los barrios La Esperanza, Alcibia, María Auxiliadora, parte de Amberes, Boston y Tesca Nuevo, y hacia la parte sur de la base del cerro de Albornoz, en algunos sectores de los barrios Albornoz, Puerta de Hierro y Arroz Barato.

Según Ingeominas (2001a), los pedimentos por erosión se caracterizan por la presencia de surcos en el terreno de una profundidad de 10 a 20 cm, están relacionados con las arcillolitas del conjunto inferior de la Formación Detrítica Bayunca y tienen una mayor pendiente que varía de 5 a 7°, especialmente hacia los cuerpos de agua que los bordean, mientras que los pedimentos por acumulación presentan una morfología suavemente ondulada y pendientes bajas del orden de 1 a 3° que favorecen los procesos de deposición de sedimentos relacionados localmente con la escorrentía superficial de origen torrencial.



El desarrollo de los pedimentos es favorecido por el carácter friable de las rocas de la Formación Detrítica Bayunca y la carencia de vegetación en algunos sectores. De acuerdo con Ingeominas (2001a), en época seca es característico en la ciudad, la pérdida de la cobertura vegetal especialmente en el cerro de La Popa y la formación de grietas en terrenos con predominio de arcillas expansivas. Al llegar la época invernal, la escorrentía superficial se concentra localmente por las grietas y forman surcos y cárcavas por donde se transporta el sedimento que va acumulándose a manera de "playones" cuesta abajo. En la actualidad, la escorrentía se concentra por las calles generando usualmente inundaciones locales y formando canales incipientes.

Coluviones (Co): Los coluviones son depósitos en forma de cono o lóbulo de longitudes cortas o largas, de formas convexas e inclinaciones suaves o abruptas, conformados por material sin estratificar y de condiciones no consolidadas; suelen presentar una gradación muy pobre, generando una mezcla de material heterogéneo que se localiza en la parte baja de las laderas por efecto de la gravedad, según Gómez et al. (2012) se constituyen de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en una matriz usualmente arcillosa.

Estos depósitos se originan a través de movimientos en masa de tipo gravitatorio tal como deslizamientos y flujos. En algunos casos, el origen de los coluviones se debe al mecanismo de desplazamiento del terreno porque el suelo se satura ante un evento de lluvia extremo, por excavaciones de tipo antrópico o por soliflucción en zonas de clima periglaciario.

Según Ingeominas (2001a), los coluviones de la ciudad son acumulaciones de fragmentos de roca blanda localizados en la base de las zonas escarpadas. A nivel local presentan forma de cono o lóbulo y su origen se debe fundamentalmente a la acumulación mecánica de materiales térreos por efecto de la gravedad que genera procesos de escorrentía superficial, deslizamientos y flujo lento y viscoso en suelos saturados y no saturados. Se incluyen los talus localizados en la base de las zonas escarpadas, los cuales han formado depósitos caóticos con formas irregulares a partir de acumulaciones de fragmentos de roca.

Se presentan a manera de franjas y parches en la base de zonas escarpadas relacionadas con las calizas de la Formación Calcárea de La Popa, especialmente al oriente, sur y occidente del cerro de La Popa y en los costados norte y occidente del cerro de Albornoz (Ingeominas 2001a). Las pendientes desarrolladas en este tipo de geoforma son del orden de 20 a 30°. Los coluviones derivados del cerro de La Popa se han formado en algunos sectores de los barrios Lo Amador, La Quinta, Lomas del Cielo (en forma de franja de dirección NE), San Francisco, Pablo VI y La María, hacia la base de la loma del Peyé, mientras que en la parte occidental de la base del cerro de Albornoz se presenta un coluvión visto en planta en forma de franja de dirección norte que se ubica en terrenos de empresas del sector de Mamonal y alineada a la vía.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), en el cerro de La Popa, en general los coluviones están constituidos de bloques de tamaño entre 0.5 y 1 m, embebidos en material arenoso grueso y de composición predominantemente calcárea que pueden alcanzar espesores cercanos a 12 m. Debido a la acción antrópica estos depósitos han sido cortados o intervenidos para la adecuación de caminos y construcción de casas y asentamientos irregulares, lo que genera la inestabilidad de los cuerpos. Es de común ocurrencia, particularmente en el costado norte y occidental del cerro de La Popa, la acumulación de



bloques de caliza de tamaño entre 1 y 3 m de arista, embebido en material arenoso o arcilloso, cuyo origen está relacionado con procesos de remoción en masa tipo caída de bloques y deslizamientos menores de tierra. Estas acumulaciones de materiales no cartografiados según lo definido por Ingeominas (2001a) se localizan en los patios de las viviendas y son causadas en su mayoría por la ejecución de cortes en las laderas para construir, ampliar o adecuar las mismas.

En la loma del Marión se destaca un coluvión asociado al deslizamiento del sector de Manzanares y Mirador y altos del Nuevo Bosque, localizado por el costado oriental del mismo, el cual no fue cartografiado por Ingeominas (2001a). Alcanza 2 hectáreas de extensión, presenta pendientes del orden de 22°. Este coluvión de deslizamiento presenta agrietamientos de 10 a 50 cm de apertura, una corona de deslizamiento tipo rotacional de 200 m de longitud y 2.5 m de altura del escarpe principal. Adicionalmente, se encuentran coluviones de deslizamiento menores y no cartografiados a la escala del trabajo de Ingeominas (2001a), en los barrios Las Brisas, Nueve de Abril, Andalucía y El Conquistador.

En el cerro de Albornoz, según Ingeominas (2001a) estos depósitos son de pequeña escala con excepción del coluvión paralelo a la vía de Mamonal, sin embargo, se llama la atención sobre los depósitos generados por la explotación de la caliza y las arenas en las antiguas canteras de Colclinker y que en el trabajo de Ingeominas (2001a), por razones prácticas, se cartografiaron como tal. Tales "abanicos" son fácilmente removibles por la acción de las lluvias, y generan localmente deslizamientos rotacionales, en pequeña escala.

Finalmente es importante destacar que al noreste del "volcán de lodo" de El Rodeo según Carvajal (1999) se han evidenciado conos coluviales de suave pendiente del orden de 3 a 7° relacionados con antiguos flujos de lodo conducidos por cauces y drenajes naturales hacia las zonas bajas.

□ **Geoformas de origen Marino costero**

La acción del oleaje marino en la zona litoral y particularmente los avances y retrocesos de la línea de costa en el pasado subactual y subreciente, han modelado el paisaje, determinando la conformación de grandes planicies costeras, formadas tanto por la abrasión como la acumulación de sedimentos, por efecto de las corrientes marinas y costeras (SGC 2010). En Cartagena se evidencia una dinámica marina prevalente, asociada indirectamente con la actividad actual del fenómeno del diapirismo de lodos en la región.

Es importante mencionar que la mayoría de unidades geomorfológicas bajas definidas por Ingeominas (2001a) en el casco urbano de Cartagena son geoformas de origen marino costero y se asocian en general a sedimentos semiconsolidados del Cuaternario. Entre las unidades geomorfológicas de este ambiente se incluyen las terrazas marinas, plataformas de abrasión elevadas, llanuras costeras, lagunas costeras, espigas, playones, llanuras intermareales, llanuras de manglar recientes y antiguas, playas, deltas de flujo de marea, plataformas y bajos arrecifales, y finalmente las dunas costeras que también están asociadas al ambiente eólico, por efecto de los vientos alisios en la región.

Terrazas marinas (Tm): Las terrazas marinas son superficies elevadas horizontales (planas) a subhorizontales que sufren un ligero desnivel respecto al nivel del mar, el cual puede ser de origen tectónico o por cambios en el nivel del mar según lo planteado por



Gómez et al. (2012). Se necesita un medio propicio para el crecimiento de corales y algas coralinas o para la formación de playas, antes de que se pueda formar una terraza marina, puesto que éstas se originan a través de la acumulación marina de fragmentos coralinos, especialmente de corales y conchas. Es importante destacar que es posible la formación de terrazas marinas a partir de plataformas de abrasión levantadas. Al igual que estas plataformas, las terrazas se presentan limitadas en sus bordes por escarpes acantilados o paleoacantilados de 0.5 a 3 m de altura según lo planteado inicialmente por Burel (1981) en Ángel et al. (1985) y confirmado por SGC (2010).

De acuerdo con Ingeominas (2001a), las terrazas se ubican en la parte interna de la bahía de Cartagena, en las islas de Manzanillo, Diablo, Chivo y a nivel local en la isla de Manga, donde se constituyen de fragmentos de coral y están limitadas por escarpes acantilados de 0.5 a 1 m de altura. Estas terrazas marinas se extienden localmente por el borde oriental de la Bahía de Cartagena, donde se encuentran cubiertas de manera parcial por playones arenosos conformados de 100 a 500 m de amplitud, pero que en la actualidad han sido intervenidos a nivel antrópico por el desarrollo portuario.

En la parte norte de la isla de Manzanillo se encuentran terrazas marinas con elevaciones máximas de 2.6 m sobre el nivel del mar, se presentan suavemente onduladas y a nivel local se evidencian escarpes muy intervenidos de 0.5 a 1 m de altura (Ingeominas 2001a). Se resalta que la isla de Manzanillo presenta terrazas marinas que cubren un área de 0.4 Km², completando casi un 50% de su territorio.

Las terrazas marinas de las islas Diablo y Chivo se presentan en forma de parche y alcanzan elevaciones de 0.95 y 1 m respectivamente (Ingeominas 2001a). En el sector sureste de la isla de Manga en terrenos del terminal marítimo se presentan antiguas terrazas intervenidas por el desarrollo portuario, con elevaciones máximas de 2.8 m y con escarpes que pueden alcanzar 1 m de altura.

Las islas de Cartagena que albergan las terrazas marinas están constituidas según Ingeominas (2001a) de fragmentos de coral genéticamente relacionados con los arrecifes franjeantes antiguos, los cuales se comportan como barreras de sedimentos detríticos provenientes de la parte continental, lo cual permitió la posterior colonización del manglar.

Plataformas de abrasión elevadas (Pe): Este tipo de plataformas son superficies elevadas planas o ligeramente inclinadas hacia el mar que fueron labradas sobre sustrato rocoso en el período Cuaternario reciente, por la dinámica marina imperante. Según Ingeominas (2001a) estas superficies se encuentran elevadas con respecto al nivel del mar actual como consecuencia de movimientos eustáticos marinos o levantamientos posteriores del borde costero, y se encuentran limitadas por escarpes acantilados antiguos o paleoacantilados, de 3 a 20 m de altura, hoy alejados de la línea de costa.

Las Plataformas de abrasión elevadas son de constitución calcárea y están dispuestas a manera de parches que no sobrepasan los 500 m², con escarpes acantilados antiguos de 4 a 5 m de altura (SGC 2010). Se encuentran localizadas en un sector al noroeste del casco urbano de Cartagena, en los barrios Pedro Salazar, Daniel Lemaitre y parte de Canapote y hacia el oriente de la bahía de Cartagena en los barrios Gustavo Lemaitre, El Refugio, Alto Bosque, Republica de Chile, El Olivo, El Bosque y San Isidro.



Al noroeste de la ciudad, en el barrio Lemaitre se presenta una plataforma de abrasión elevada que según Ingeominas (2001a) alcanza localmente 12 m de altura sobre el nivel del mar. Su morfología es suavemente ondulada y con pendientes de 3 a 4° hacia el mar. Cubre una extensión aproximada de 0.8 Km² y se encuentra limitado por escarpes paleoacantilados de 4 a 5 m de altura, los cuales en el sur y sureste se presentan verticales, mientras hacia el norte han perdido su expresión original por los procesos de urbanización del sector.

En el suroeste de Cartagena, hacia el sector El Bosque - San Isidro igualmente se expone según Ingeominas (2001a) una plataforma de abrasión elevada que en algunos sectores alcanza 16 m de altura sobre el nivel del mar. Es una plataforma ondulada y localmente disectada por canales, que conservan pendientes del orden de 3°, cubre un área de 0.5 Km² y se encuentra limitada hacia el occidente por escarpes paleoacantilados muy intervenidos por la acción del Hombre, de una altura de 4 a 5 m, que dejan pendientes promedios del orden de 25°. Al igual que en el sector noroeste de Cartagena, estas plataformas de abrasión están esculpidas en rocas de la Formación Calcárea de La Popa.

Es posible que la identificación en campo de las plataformas de abrasión elevadas sea difícil, pues con el paso del tiempo estas geoformas derivan en la formación de terrazas marinas, que a su vez con el tiempo son cubiertas por coluviones que se hacen más espesos en dirección hacia el continente. Gómez et al. (2012) consideran que las plataformas de abrasión antiguas son un tipo de terraza marina ya que pueden presentarse coalescentes con estas terrazas a partir de ambientes depositacionales. En este sentido estos autores recomiendan utilizar el término terraza marina genéricamente para todos los casos donde haya una superficie de origen marino elevada sobre el nivel del mar, a menos que haya evidencia de que la superficie elevada sea producto del efecto combinado de la meteorización y de la abrasión del oleaje sobre la roca y en ese caso se debe especificar que la terraza marina se ha producido a partir de una plataforma de abrasión antigua. Se aclara que en el presente documento se sigue considerando como plataforma de abrasión elevada, a este tipo de geoforma, según lo definido por Ingeominas (2001a).

Llanuras costeras (LLC): Las llanuras costeras son extensas planicies ligeramente onduladas, limitadas hacia la parte continental por colinas y lomas, y hacia el mar por playas o llanuras intermareales (Ingeominas 2001a) asociadas a lagunas costeras. Su génesis está ligada a procesos fluviomarinos de sedimentación y erosión que se han producido según SGC (2010) en el pasado reciente y subreciente, cuando el mar estaba por encima del nivel actual.

En general estas llanuras incluyen áreas con una morfología predominantemente plana o de baja altura con respecto al nivel del mar, por lo tanto esta característica las diferencia de las terrazas marinas; su origen puede ser fluviomarino como se mencionó antes o netamente marino, y generalmente representa una franja de costa que ha progradado o que es resultado de cambios en el nivel del mar (NSSH 2008).

Es importante destacar que de acuerdo con Gómez et al. (2012) las llanuras costeras también conocidas como planicies costeras o depósitos litorales recientes, pueden considerarse una región geomorfológica según la jerarquización propuesta por Carvajal (2003), no obstante en Cartagena, Ingeominas (2001a) la definió en la categoría de unidad geomorfológica y así se considera en el presente trabajo.



Las llanuras costeras en la ciudad se presentan ampliamente expuestas al oriente y suroriente de la Ciénaga de la Virgen (Ingeominas 2001a), en los barrios Fredonia, Nuevo Paraíso, Las Américas, El Pozón, Villa Estrella, Villas de la Candelaria, Sector Los Arenales, La Carolina, Ciudad Jardín, San José de los Campanos, Bosque de la Circunvalar, en el antiguo lote de la Federación Nacional de Algodoneros (hoy, Ciudadela 2000) y en una parte de los terrenos de la Universidad Tecnológica de Bolívar y de la Empresa Tenaris Tubocaribe. Igualmente estas planicies se presentan al sur y sureste del cerro de Albornoz en algunos terrenos de empresas de la zona industrial de Mamonal y en los barrios Policarpa, Arroz Barato, La Paz (sur) y parte de Nelson Mandela.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), al oriente de la Ciénaga de la Virgen, las llanuras costeras alcanzan una extensión aproximada de 120 Km² y pendientes del orden de 3°, donde se desarrolla un drenaje paralelo espaciado que se dirige hacia el occidente, generando a nivel local inundaciones en época invernal en sectores aledaños a los barrios El Pozón y Villa Rosita, entre otros.

En el sector sur del cerro de Albornoz, según Ingeominas (2001a) las llanuras no sobrepasan una extensión de 4 Km² y presentan una configuración elongada en dirección E-W, asociada al núcleo del Sinclinal de Policarpa. Al igual que en el sector oriental de la Ciénaga de la Virgen, las pendientes en este sector son mínimas, lo cual genera zonas de inundación, especialmente en el barrio Policarpa y hacia la empresa Biofilm SA, asociadas a los canales que llevan sus aguas hacia la bahía.

Lagunas costeras (Lc): Este tipo de lagunas son depresiones costeras ocupadas total o parcialmente por agua salobre, separadas del mar abierto por barreras o espigas arenosas, y con comunicación hacia el mar a través de bocas permanentes o efímeras. Al estar situadas bajo el nivel medio del mar, las lagunas se consideran depresiones someras. Según SGC (2010) el origen de las lagunas costeras se relaciona con la formación de barras espigas, subsidencia sedimentaria local o aislamiento rocoso generado por movimientos tectónicos de origen diapírico de lodo.

Las lagunas costeras de acuerdo al origen hidro-sedimentario de la barrera que la limita con el mar y al ambiente geológico-tectónico donde se desarrolla, se clasifican en 4 tipos: lagunas con barreras formadas por aporte sedimentario deltaico, lagunas con barreras arenosas formadas por acumulación marina, lagunas con barreras de origen tectónico y lagunas con barreras construidas por organismos tipo coral (Gayet y Vernet 1989).

La laguna más importante en la ciudad de Cartagena es la Ciénaga de la Virgen o de Tesca, cuyas barreras se atribuyen a procesos hidro-sedimentarios costeros (SGC 2010). De acuerdo con Ingeominas (2001a), esta laguna se presenta elongada en dirección N-S, con una extensión aproximada de 22.5 Km² y una profundidad máxima de 1.5 m. Hacia el oeste la Ciénaga de la Virgen está separada por una barra espiga de un largo de 5 a 6 Km, de constitución arenosa y asociada a llanuras intermareales y de manglar. La única boca natural de comunicación temporal con el mar se localiza en La Boquilla, tiene una amplitud variable de 50 a 300 m y una profundidad de 2 m, y se caracteriza por estar asociada en la parte interna por deltas de flujo de marea que en la actualidad han sido colonizados por manglar.

Por el oriente, la Ciénaga de la Virgen recibe el aporte de aguas dulces de los arroyos Mesa, Tabacal, Hormiga, Tabla y Limón, mientras por el sur desembocan los canales María Auxiliadora, Amador, Tabú, Blas de Lezo y Ternera (Chapundún), entre otros



(Ingeominas 2001a). Según SGC (2010) los materiales de fondo de la Ciénaga de la Virgen, son predominantemente lodosos con abundancia de materia orgánica.

En el año 2000 se puso en funcionamiento la bocana de marea estabilizada con el fin de oxigenar la Ciénaga de la Virgen, la cual se construyó en el sector norte del aeropuerto Rafael Núñez. La bocana es una estructura hidráulica de intercambio de aguas, compuesta de una dársena sobre la playa, un box coulvert y un canal, tiene 100 m de ancho, 700 m de largo y 6 m de profundidad; mediante 6 compuertas de ingreso y 4 de salida, permite el paso de las aguas marinas a la ciénaga y fuera de la misma, al aprovechar el ascenso de la marea, permitiendo así un recambio de agua de la ciénaga cada 24 horas y su oxigenación.

Se destaca que la descarga de los canales Chapundún, Calincanto y Ricaurte aportaba a la Ciénaga de la Virgen por lo menos un 50% de las aguas servidas de Cartagena, donde antes del año 2013, la ciénaga recibía aproximadamente un 78% de las aguas servidas de la ciudad, mientras que el 22% restante se vertía hacia la bahía de Cartagena en un sitio conocido como "Cuatro Calles". La puesta en funcionamiento (a prueba) del proyecto Emisario Submarino en el mes de marzo de 2013 ha aliviado las descargas hacia este cuerpo lagunar.

A nivel regional, la bahía de Cartagena ha sido catalogada como una laguna costera de origen tectónico (Gayet y Vernet 1989 en Ingeominas 2001a). Según estos autores esta laguna está delimitada y separada del mar abierto por la isla de Tierra Bomba, cuyo origen indirectamente, se atribuye al diapirismo de lodo. Según SGC (2010) la bahía posee dos entradas o bocas de intercambio de aguas localizadas, una al sur de Bocagrande de 2 Km de ancho y 2 m de profundidad, y otra en Bocachica de 600 m de ancho y 15 m de profundidad.

Según Ingeominas (2001a), la bahía de Cartagena presenta una configuración en forma de riñón, elongada en dirección N-S, en una extensión de 82 Km² y una profundidad que sobrepasa localmente los 30 m. La morfología suave del fondo es interrumpido por bajos arrecifales de 15 a 20 m de altura, especialmente en el sector oriental de la bahía. De acuerdo con SGC (2010) tal situación determina coberturas de sedimento de origen variable, tanto bioclástico (fragmentos de coral y conchas) como arenoso detrítico fino proveniente principalmente del canal del Dique, que según Álvarez et al. (2003) en SGC (2010), aporta a la bahía 80 m³/s de material fino, proceso establecido con base en la progradación rápida de los lóbulos deltaicos actuales del canal y la pluma de sedimentos evidente.

Es importante destacar que en los bordes de la bahía de Cartagena, particularmente hacia la isla de Tierra Bomba, se encuentran lagunas costeras de una menor extensión entre 0.6 y 1.5 Km², cuyas barreras corresponden a crecimientos de corales de arrecifes costeros franjeantes, no vivos actualmente. Tal situación se evidencia a nivel local en el margen oriental de la bahía, donde las lagunas han desaparecido por la actividad antrópica, quedando los remanentes de las barreras arrecifales, hoy colonizadas por manglar (SGC 2010).

Los cuerpos de agua internos de Cartagena han sido definidos por Ingeominas (2001a) como lagunas costeras de menor extensión. Entre estos cuerpos de agua Ingeominas (2001a) destaca la laguna de Chambacú, laguna del Cabrero, laguna de San Lázaro, Ciénaga de las Quintas, Caño Bazurto y Caño Juan de Angola. De acuerdo con



resultados obtenidos por Edurbe et al. (1992) en Ingeominas (2001a), la profundidad promedio en estos cuerpos de agua son del orden de 1.2 a 2.5 m; sin embargo la laguna del Cabrero presenta la mayor profundidad de un orden de 7.4 m. En general las lagunas costeras de menor extensión no presentan comunicación directa con el mar abierto, por lo tanto el intercambio de aguas se lleva a cabo a través de la Bahía de Cartagena. Las únicas lagunas con comunicación hacia el mar son la Ciénaga de la Virgen y la bahía de Cartagena, las cuales son las más extensas y representativas de la ciudad.

Barras espigas (E/B): Se consideran barras elongadas constituidas de arena y grava, de morfología baja, usualmente dispuestas paralelas a la línea de costa y configuradas según Ingeominas (2001a) por la acción combinada del oleaje y las corrientes litorales en aguas de poca profundidad. La característica principal de las barras espigas es separar cuerpos de agua interiores, generalmente salobres, del mar abierto, aunque en su formación intervienen procesos avanzados de progradación de espigas, que dejan bocas que comunican el mar con estos cuerpos de agua (p.e. lagunas costeras).

Según Gómez et al. (2012) la formación de estas geoformas es producto de un proceso de acrecimiento generado por el transporte de sedimentos por efecto de la marea, oleaje, viento, o deriva litoral. Siguiendo a SGC (2010) en algunos sectores estas barras se asocian con deltas de sobrelavado, playas, llanuras intermareales y de manglar y deltas de flujo y reflujo de marea. En ciertos casos su formación puede generarse por la emergencia de barras litorales que localmente pueden estar soportadas por barreras de coral subactual.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), la barra espiga más desarrollada y representativa de Cartagena se encuentra al norte de la ciudad, en el sector de La Boquilla, es elongada en dirección NNE, tiene una longitud de 6 Km y una amplitud variable de 80 a 1700 m. La parte más ancha de la barra se presenta hacia el sur en el área del aeropuerto Rafael Núñez, mientras la más angosta se encuentra en hacia la parte central de la misma, en el sector de punta Zapatero. La morfología es suavemente ondulada asociada a crestas de playas con elevación promedio sobre el nivel del mar de 0.5 a 1.7 m. Es característico desde una vista de planta, el aspecto festoneado (borde en forma de ondas) hacia la ciénaga de la Virgen, lo cual es indicativo de abanicos de sobrelavados recientes, asociados a eventos de alta energía, probablemente mares de leva antiguos.

Según Ingeominas (2001a), llama igualmente la atención, la presencia de espigas, que al sureste de la pista del aeropuerto Rafael Núñez presentan sus ganchos curvos hacia el sur, y conservan aún crestas de playas. Esta configuración es indicativa de la evolución creciente de la barra hacia el NE (ver figura 74). De acuerdo con SGC (2010) esta disposición igualmente indica la presencia de bajos arrecifales antiguos, que sirvieron de amarre al cuerpo arenoso asociado con la barra espiga de La Boquilla, lo cual es evidente en la parte más norte en los alrededores de El Morrito, donde se muestra la conformación de tómbolos que determinan la formación de grandes playones que unen el continente con los montículos e islas adyacentes. Tal situación se completa con la existencia de islas existentes actualmente al sur de la ciénaga de la Virgen, considerados bajos o pináculos arrecifales subactuales, actualmente colonizados de manglar.

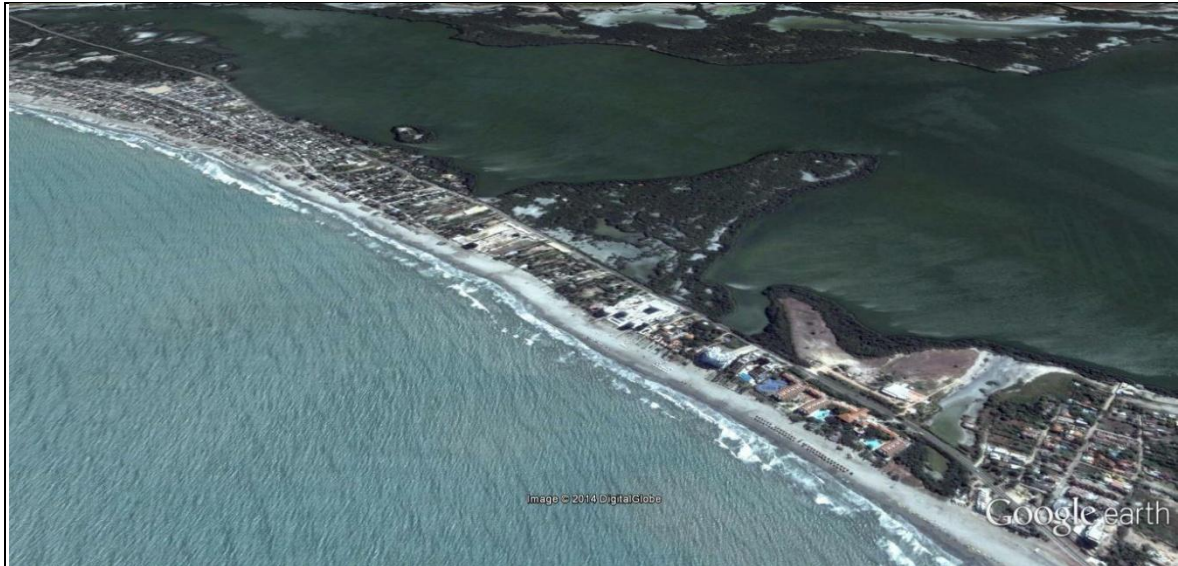


Figura 74. Panorámica hacia el NE de la barra espiga de La Boquilla

Fuente: Tomado de Google Earth (2007)

Desde el sector de Canapote hasta el centro histórico de la ciudad se extiende una barra espiga de 3.5 km de longitud y una amplitud variable de 50 a 500 m (Ingeominas 2001a), evidenciando su parte más ancha hacia el sur en el sector amurallado y su parte más angosta hacia el sector de Marbella (ver figura 75). Esta barra de constitución arenosa se relaciona con depósitos de playón recientes y encierra el caño Juan de Angola y la laguna del Cabrero, cuyos bordes constituían hace algún tiempo llanuras de manglar, hoy intervenidas con rellenos antrópicos en razón del crecimiento urbanístico de la ciudad. De acuerdo con Ingeominas (2001a), su morfología es de aspecto plano ligeramente ondulada y presenta una elevación promedio sobre el nivel del mar de de 0.6 a 2.2 m.



Figura 75. Panorámica hacia el NE de la barra espiga de Canapote al centro histórico

Fuente: Tomado de Google Earth (2014)



Con base en un análisis de fotografías aéreas antiguas, hacia la parte sur y sureste de la ciénaga de la Virgen, se determinó la existencia hace menos de 50 años de antiguas barras espigas de constitución areno-arcillosa, de una longitud de por lo menos 3 Km y una amplitud que no supera los 80 m, las cuales delimitaban llanuras intermareales antiguas y aislaban una especie de laguna costera interna a la ciénaga de la Virgen (fig. 76), intervenida a través de la ejecución progresiva de rellenos de baja especificación técnica, no compactados, utilizando escombros y restos de materiales de construcción.

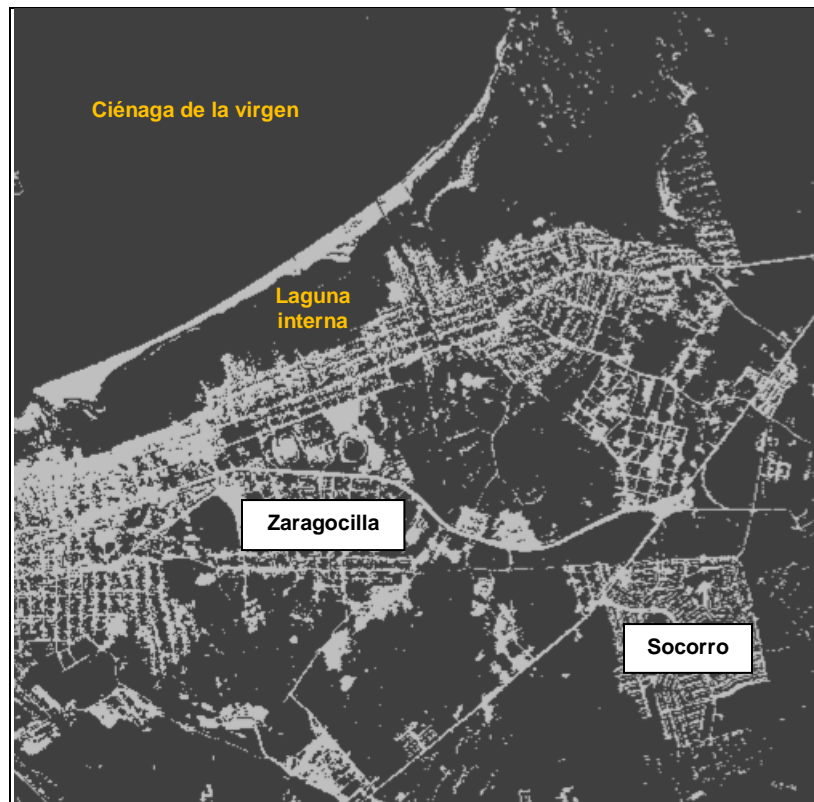


Figura 76. Estado de la margen sur de la ciénaga de la Virgen en la década de los 70's
Fuente: Tomado de Barboza (2007)

Las barras de Tesca no superaban según Ingeominas (2001a) una elevación sobre el nivel del mar de 60 cm y presentaban tres bocas bien definidas, una en el sector de Boston, otra en el canal Ricaurte y una tercera en la quebrada El Limón, esta última asociada con deltas de marea antiguos, hoy colonizados por manglar.

En el sector suroccidental de la ciudad, en la laguna de residuos de dragado de la planta de soda (sector Petroquímica), igualmente se evidencia la existencia de antiguas barras espigas en dirección noroeste. Estas barras fueron intervenidas mediante rellenos antrópicos, en su momento presentaban una amplitud variable de 50 a 120 m y una elevación sobre el nivel del mar del orden de 3 m, las cuales hoy en día están probablemente sustentadas en bajos arrecifales antiguos (Ingeominas 2001a).

Espigas (E/B): Las espigas son barras o cuerpos arenosos bajos y elongados en dirección de la deriva litoral predominante (Ingeominas 2001a), caracterizados porque uno de sus extremos se encuentra fijo a una saliente o bajo firme, mientras que el otro extremo se encuentra libre y progresa en forma curva (tomando la forma de gancho) por



procesos de deriva, refracción y difracción del oleaje. Es característica la presencia de complejos de crestas y artesas de playa de tamaño arena o grava en espigas sin intervención antropogénica, lo cual según SGC (2010) permite discernir la evolución de la geoforma, donde es usual en su parte interna la ocurrencia de lagunas costeras asociadas con llanuras intermareales localmente colonizadas de manglar.

De acuerdo con SGC (2010), es un rasgo característico de las espigas de la región, la configuración y adosamiento hacia las zonas continentales de los extremos libres de las mismas, conformando a nivel local barras espigas, lo cual se atribuye principalmente a un déficit regional de sedimentos y erosión acentuada de la parte proximal de esta geoformas.

Según Gómez et al. (2012) a nivel cartográfico la espiga puede contener otras unidades geomorfológicas como las playas o lagunas costeras. Al evaluar el comportamiento de una espiga ante eventos de oleaje extremos, se pueden distinguir 2 tipos: una espiga consolidada o con vegetación y otra espiga sin consolidar, más vulnerable a sufrir retrocesos en la línea de costa ante estos eventos.

La espiga más grande del casco urbano de Cartagena se presenta en el sector peninsular de Bocagrande, Castillogrande y El Laguito y se considera del tipo de espiga sin consolidar. Siguiendo a Ingeominas (2001a) se desprende desde el sector del Parque de La Marina en dirección sureste y luego se prolonga hacia el suroeste por 2.5 km hasta el sector de El Laguito donde se presenta un gancho curvado hacia el oriente. Tiene amplitudes de 50 a 500 m, y muestran su parte más angosta en el sector de la Base Naval. Su morfología actual es plana, ligeramente ondulada, con elevaciones variables sobre el nivel del mar entre 0.5 y 2.2 m.

La configuración morfológica de la espiga ha variado sustancialmente debido a la intervención antrópica que a nivel local ha ampliado la geoforma por medio de obras costeras tipo espolones y rompeolas, y rellenos de material arenoso. No obstante lo anterior, la disposición de la espiga parece estar sustentada en bajos arrecifales subcrecientes, que en gran medida han influido en su conformación actual (Vernette et al. 1984, y Carvajal y Pérez 1993 en Ingeominas 2001a)

Según SGC (2010), se destaca hacia el sector de Punta canoas una espiga "sin consolidar" en dirección SE, con una longitud de 3200 m y una amplitud de 200 a 600 m, la cual muestra eventos de erosión y acreción que han dejado lagunas costeras en la parte trasera de las espigas remanentes. La composición de los materiales constituyentes de la espiga de Punta canoas, corresponde a arenas de grano fino a medio de composición cuarzo feldespática. Llama la atención la abundancia de gravas de chert de color negro, gris y marrón, cuarzo lechoso y abundancia local de conchales de bivalvos, evidentes en Manzanillo del Mar como niveles aterrazados de una altura de 1 a 3 m.

Finalmente es importante resaltar que las barras espigas y las espigas fueron cartografiadas por Ingeominas (2001a) como una misma unidad geomorfológica y no aparecen diferenciadas entre sí, y así se considera en el presente trabajo.

Playones: Los playones son lóbulos o prismas de material arenoso no consolidado, asociados a playas antiguas de gran extensión. Se presentan bordeando las zonas



elevadas actuales y cubren parcialmente algunas islas en forma de parche, según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Los playones se encuentran ampliamente distribuidos en el casco urbano de Cartagena, aunque ya intervenidos por la acción del hombre debido al crecimiento urbanístico de la ciudad. Se evidencia la cercanía de estos depósitos con los cuerpos de agua internos, lo cual ha influido en la formación de los mismos en tiempo subreciente. Se destacan antiguos playones de gran extensión en el barrio Getsemaní y la parte norte y centro de la isla de Manga. Entre las elevaciones que bordean los playones se encuentra el cerro de La Popa a la altura del barrio Torices y a lo largo de la Carrera 14 bordeando las lomas del Diamante, del colegio de La Salle y del castillo San Felipe de Barajas. En la parte suroeste del cerro de La Popa aparecen nuevamente playones hacia los sectores Pie del cerro, Pie de La Popa, La Quinta, barrio Chino y Martínez Martelo.

Otra elevación bordeada por playones es la "loma" del Marión, al oeste y suroeste de la misma, sobre la Diagonal 21 (Carretera El Bosque) en los sectores Poseidón, La Cuchilla, Bruselas, El Bosque, Gustavo Lemaitre, Cartagenita y Nuevo Oriente, al igual que en el cerro de Albornoz, al oeste del mismo, en zonas que limitan con el sector oriental de la bahía de Cartagena en la zona industrial de Mamonal.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), en los alrededores del cerro de La Popa, en los barrios Torices, Pie de La Popa, Pie del cerro y Martínez Martelo, los playones presentan amplitudes de 50 a 450 m, elevaciones sobre el nivel del mar que oscilan entre 1.5 y 2.5 m, la configuración es irregular, con inclinaciones de 3 a 5° hacia las lagunas, y conforman una morfología suavemente ondulada y bisectada a nivel local por canales de agua que provienen del cerro de La Popa.

Los playones que bordean al oeste de la "loma" del Marión conservan una morfología ondulada suave, con amplitudes del orden de 600 m en el sector de El Bosque, elevaciones hasta de 4 m en cercanías a la base de la loma y presentan fuerte bisección por canales, especialmente hacia el sector sur del cerro (Ingeominas 2001a).

En la isla de Manga esta geoforma presenta una amplitud máxima de 550 m a lo largo de la Avenida de la Asamblea, del mismo modo en el barrio de Getsemaní la mayor amplitud es del orden de 580 m y se presenta en dirección paralela a la calle del Arsenal. Según Ingeominas (2001a), en el sector noroeste de la isla de Manga estos playones son suavemente ondulados y con elevaciones sobre el nivel del mar entre 1.8 y 3 m, mientras en el barrio de Getsemaní no superan los 2.3 m de altura.

Llanuras Intermareales (Llia - Lliar): Las llanuras intermareales son planicies o depresiones leves y poco profundas, de morfología plana suavemente inclinada hacia los cuerpos de agua y localizadas en las partes protegidas de las lagunas costeras, espigas y barras espigas. Según SGC (2010) su origen obedece a los cambios de marea en zonas protegidas, lo que permite la floculación de las arcillas presentes y la posterior colonización de vegetación de mangle, pastos o rastreras escasas y de animales tolerantes a las aguas salobres.

Estas llanuras presentan usualmente forma de franjas, están constituidas por acumulaciones de material lodoso y se ubican a nivel del mar o por debajo del mismo, por lo tanto se caracterizan porque sufren inundaciones periódicas de manera total o parcial por efecto de la marea (alto nivel freático) o la escorrentía superficial.



De acuerdo con Gómez et al. (2012), los suelos en estas depresiones presentan alta humedad y están compuestos comúnmente por sedimentos finos no consolidados. A nivel local Ingeominas (2001a) ha diferenciado las llanuras intermareales constituidas por sedimentos con predominio de arcillas (Llia), de aquellas que contienen arenas y limos (Lliar), las cuales se localizan en sectores hacia el continente donde la textura es más gruesa, posiblemente por el aporte de sedimentos de los canales que desembocan por esas zonas.

Las llanuras intermareales se presentan en la ciudad, en forma de parche hacia la bahía de Cartagena en los barrios de Bocagrande, Laguito, Manga, Marbella, Chambacú y Pie del cerro y en algunos sectores al oriente de dicha bahía hacia la zona industrial de Mamonal y en la Isla de Manzanillo. Igualmente se presentan algunas llanuras en La Boquilla, en terrenos colindantes con la pista del aeropuerto Rafael Núñez, La María (hacia base de la loma del Peyé), Las Flores, La Esperanza, La Candelaria, Boston, Líbano, Tesca y Olaya Herrera (sectores Rafael Núñez, 11 de Noviembre, Ricaurte, Central y El Progreso).

Según Ingeominas (2001a), este tipo de llanuras se encuentran ampliamente desarrolladas al sur y oriente de la ciénaga de la Virgen, presentan amplitudes del orden de 500 a 1000 m y permanecen inundadas especialmente en el sector suroriental.

En la margen occidental de la ciénaga, donde se ubica la barra espiga de La Boquilla, las llanuras intermareales son más reducidas, con amplitudes del orden de 100 a 200 m y elevaciones sobre el nivel del mar que oscilan entre 10 y 60 cm, de ahí que se inunden de modo periódico según lo planteado por Ingeominas (2001a). Estas llanuras presentan un aspecto interdigitado y festoneado con los sedimentos arenosos de la barra.

Hacia el sur de la ciudad, en los sectores de Ceballos, Santa Clara (ver figura 77) y en la Planta de Soda en Mamonal, igualmente se presentan llanuras intermareales de 0.5 a 1 Km² de extensión, las cuales fueron colonizadas parcialmente por manglar que ha sido intervenido por el crecimiento urbanístico del área. Estas llanuras no sobrepasaban una altura de 0.5 m de sobre el nivel del mar y localmente fueron rellenadas hasta alcanzar elevaciones de 1 a 2 m (Ingeominas 2001a).



Figura 77. Antigua llanura intermareal al lado de la Urbanización Santa Clara

Fuente: Google Maps (2014)



Se destaca un lote no urbanizado al lado de la Urbanización Santa Clara donde se observan rastros de una antigua llanura intermareal en forma de franja, localmente rellenada hasta una elevación de 2 m, en conjunto con depósitos de manglar y de playón.

Se evidencia que al sur de la ciénaga, especialmente en el barrio Olaya Herrera, estas llanuras de constitución arcillosa y limosa, fueron intervenidas mediante grandes rellenos de baja especificación técnica hechos periódicamente usando recebo (zahorra) y escombros de construcción, siendo acondicionadas para construir viviendas y asentamientos irregulares.

De acuerdo con Carvajal y Pérez (1993) en Ingeominas (2001a), entre 1956 - 1993 estas llanuras fueron pobladas en dirección hacia la ciénaga de la Virgen a una tasa de 16 m/año, y según Ingeominas (2001a) igualmente se evidencia un acrecimiento local del borde de la ciénaga de 20 a 30 m/año entre 1996 - 2000. A través de un análisis de evolución morfodinámica de la zona, hecho por Barboza (2007), es posible sugerir que entre 2000 - 2005 los sectores de La Candelaria, Libano y Olaya Herrera sector Rafael Núñez presentaron menor acrecimiento local del borde de la ciénaga de la Virgen con un avance del orden de 7 m/año, mientras que hacia el sector Ricaurte de Olaya Herrera, los conos deltaicos originados por efecto de la carga de sedimentos transportada a través del canal Ricaurte, generaron nuevos "terrenos" cenagosos (parcialmente invadidos), presentándose acrecimientos del borde de la ciénaga mayores de 50 m/año.

Con la construcción de la primera etapa de la vía perimetral, inaugurada en el año 2007, se frenó el avance de los rellenos para invadir la ciénaga hasta el sector 11 de Noviembre del barrio Olaya Herrera, punto de finalización de la vía, sin embargo en la actualidad hacia los sectores Ricaurte, Central y El Progreso continua la ejecución progresiva de rellenos antitécnicos para acondicionar terrenos y levantar asentamientos irregulares.

Llanuras de manglar (Llmr - Llma): Las llanuras de manglar son superficies planas cenagosas compuestas esencialmente de lodos y arenas (Ingeominas 2001a) muy finas con abundante materia orgánica, que se constituye en el sustrato apto para el desarrollo del manglar y otras especies halófitas. Según SGC (2010), las especies halófitas más comunes en el Caribe Colombiano en su orden son: *Rhizophora mangle* (manglar rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro o prieto), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus facultativa* (mangle botoncillo), las cuales se encuentran dispuestas en zonaciones en el mismo orden desde la zona frente al mar hacia el continente.

En Cartagena, estas llanuras se encuentran asociadas a los bordes de los cuerpos de agua internas, entre ellos las lagunas costeras (ciénaga de la Virgen y bahía de Cartagena) y cubren localmente pináculos peneplanizados de escasa extensión o bajos arrecifales antiguos según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Según Gómez et al. (2012) estas llanuras tienen bajas elevaciones y alto nivel freático, presentan procesos de sedimentación marina y continental a nivel del mar o un poco por encima del nivel de marea alta. Estos sectores sufren inundaciones periódicas por oleajes extremos, mareas, la combinación de ambos o por desborde de las lagunas costeras u otro cuerpo de agua cercano.

A nivel local Ingeominas (2001a) ha diferenciado las llanuras de manglar reciente (Llmr) de las llanuras de manglar antiguo (Llma).



Las *llanuras de manglar reciente* (Llmr) corresponden a aquellas zonas planas donde crece actualmente el manglar. En orden de abundancia las especies de manglar más representativas de la ciudad son: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*. Alcanzan alturas de 3 a 6 m y se presentan como franjas de 10 a 60 m de ancho que bordean los cuerpos de aguas internos e igualmente como parches de 0.2 a 0.5 Km² de extensión, asociados a bajos arrecifales antiguos y deltas de flujo de marea (Ingeominas 2001a).

Según Ingeominas (2001a), el máximo desarrollo de manglar se presenta en el borde interno de la barra espiga de La Boquilla y en el costado suroriental de la ciénaga de La Virgen. Igualmente se encuentran en la boca de La Boquilla, punta Zapatero y Fredonia, donde cubren deltas de flujo de marea de configuración en abanico o festoneada.

En el borde oriental de la bahía de Cartagena se encuentran parches de manglar, que colonizan entre otras islas, aquellas de carácter arrecifal como Maparapita y Cocosolo. Su configuración es elongada en dirección N-S y, parcialmente, el manglar ha sido destruido por factores tales como tala o la probable contaminación de las aguas de la bahía como lo establece Urbano et al. (1992) en Ingeominas (2001a).

En la ciénaga de Las Quintas se presenta un parche de manglar que cubre aproximadamente 800 m² de extensión, y es característico (en todos los sectores descritos) el desarrollo de un drenaje interno asociado a flujos y reflujos de marea (Ingeominas 2001a).

Las *llanuras de manglar antiguas* (Llma) fueron destruidas por efecto del crecimiento urbanístico de la ciudad, según Ingeominas (2001a) para acondicionar el terreno para la construcción de obras civiles, industriales o residenciales. Actualmente han sido rellenadas, y presentan una morfología plana.

Su máxima expresión se encuentra en la bahía interna de Cartagena, en los sectores de Planta de Soda (Mamonal) con una extensión de 1.2 Km², en Ceballos con 0.5 Km² y en la franja Castillo grande - Bocagrande - Parque de La Marina con 1.5 Km². Igualmente estas llanuras se destacan por su extensión en el sector de Chambacú y el barrio Torices, con un área de 0.3 y 0.2 Km² respectivamente, las cuales son zonas aledañas a la laguna de El Cabrero y el caño Juan de Angola (Ingeominas 2001a).

De acuerdo con Ingeominas (2001a), este tipo de llanuras se presentan bordeando los cuerpos de agua internos, como en el caso de la ciénaga de la Virgen, donde se evidencian franjas de antiguas llanuras de manglar de un ancho de 100 a 300 m, las cuales han sido colonizadas paulatinamente por medio de rellenos de material muchas veces no adecuados.

Playas (Py): Las playas son franjas angostas de suave pendiente hacia el mar, constituidas de arena (Ingeominas 2001a) y a nivel local de grava y fragmentos de concha acumulados por las corrientes marinas costeras. Según Ingeominas (2001a), se extienden desde el límite de marea baja y el sitio donde se presenta un cambio fisiográfico marcado, tal como una duna, la base de un escarpe acantilado o un contacto directo con manglar. A partir de lo documentado por Gómez et al. (2012) se deduce que la acumulación de estos sedimentos no consolidados a lo largo del perfil de playa tiene lugar hasta la profundidad de cierre de dicho perfil donde teóricamente no hay transporte activo de material debido a la acción del oleaje.



Siguiendo a SGC (2010) las playas que se presentan a lo largo de la franja litoral de la ciudad, a nivel local hacen parte de otras geoformas de acumulación como espigas, barras espigas y tómbolos. A nivel sedimentológico, se encuentran arenas cuarzo feldespáticas de grano fino a medio, con gravas diseminadas de chert negro, marrón, cuarzo lechoso y fragmentos de concha, localmente con acumulaciones de arenas negras y abundancia de madera.

Según lo planteado por Ingeominas (2001a), la totalidad del borde occidental del casco urbano de Cartagena desde La Boquilla hasta el barrio de Castillo grande se encuentra bordeado por playas, tiene una longitud de 15750 m de costa, donde el 72% está intervenido por obras de protección costera tales como espolones en un 36%, rompeolas en un 18%, y malecones en un 8%, aunque en algunos sectores las obras costeras se encuentran combinadas, ya sea con espolones o con rompeolas.

Las playas más extensas de la ciudad se encuentran en el sector oeste de la barra espiga de La Boquilla en una longitud aproximada de 3.7 Km, alcanzan amplitudes de 60 a 100 m y desarrollan de 2 a 3 bermas (zonas planas de la parte trasera de las playas). El frente de playa (zona de lavado de las olas) se constituye de arenas de color gris pardo, de grano fino a muy fino, localmente con gravas y fragmentos de concha, y posee inclinaciones que oscilan entre 3 y 7° (Ingeominas 2001a).

Desde el extremo norte de la pista del aeropuerto Rafael Núñez hasta el barrio Crespo a la altura del Centro Recreacional Los Corales de Comfenalco, las playas, en general, han sido históricamente angostas, con amplitudes de 5 a 20 m. Entre la Calle 70 y el Centro Recreacional Los Corales antes se presentaban escarpes de una altura de 0.5 a 2 m, asociados localmente con las bases o cimientos de las casas del lugar y que limitaban las playas en su parte trasera según lo planteado por Ingeominas (2001a), sin embargo en la actualidad estos rasgos geomorfológicos han cambiado por efecto de la acción antrópica.

A principios de los 90's, el sector de Crespo exhibía playas de 5 a 20 m de amplitud, con berma y frente de playa con inclinaciones entre 4 y 7°, y presencia de sedimentos arenosos finos, color gris, localmente con abundancia de gravas de tamaño entre 1 y 2 cm, y fragmentos de concha (Cañas 1987 y Molina 1993 en Ingeominas 2001a), sin embargo hacia el año 2001 las playas estaban desapareciendo y la energía del mar atacaba directamente los cimientos de las casas, y a nivel local se presentaban frentes de playa de 3 a 5 m de amplitud, asociados a material grueso tipo grava (chinas) y de 18° de inclinación. En la actualidad este sector ha sido intervenido a través de grandes rellenos de arena y la ampliación artificial de la playa debido a la construcción del Túnel (semideprimido) de Crespo que conecta un tramo de la vía al Mar con la Avenida Santander.

Por otra parte, las playas de Marbella poseen una longitud de 1.6 Km, alcanzan una amplitud del orden de 40 m y se limitan hacia su parte trasera por dunas de sombra. La amplitud de estas playas se debe a la construcción de espolones con separación entre sí de 150 a 200 m, lo cual ha permitido la formación de playas arenosas con 1 o 2 bermas y el mantenimiento de los frentes de playa con inclinaciones de 3 a 5° (Ingeominas 2001a). No obstante, la protección ejercida por las obras costeras construidas, estas playas evidencian un retroceso significativo de la línea de costa, según Aguilar-Collazo y Jiménez (2005) por efecto de procesos muy marcados de erosión progresiva, que producen migración de sedimentos hacia otras zonas.



Según Ingeominas (2001a), en el sector del Cabrero se encuentran playas de una amplitud de 60 a 70 m, relacionadas con la protección de 7 rompeolas localizados en una longitud de 1.1 Km. La separación de los rompeolas es de 150 m, lo cual permite la formación de playas en forma cóncava y con pendientes del frente de playa de 3 a 5°. Con la incidencia de eventos de alta energía que se han presentado, las playas del Cabrero han retrocedido de 10 a 12 m y han dejado escarpes en su parte trasera de una altura de 0.5 a 0.7 m, particularmente en el sector norte de los rompeolas.

Frente al cordón amurallado se presentan playas, de una amplitud incipiente que ha disminuido en los últimos 20 años de 3 m a menos de 1 m y en algunos sectores ya no existen. Las profundidades son del orden de 3 m, a una distancia de 5 a 10 m de la línea de costa, donde la profundización del perfil es evidente. Tal situación se debe al efecto de socavación del mar en la base del malecón que bordea la Avenida Santander de acuerdo con lo planteado por Ingeominas (2001a).

En su momento, la construcción de la Avenida Santander y los rompeolas de protección a la altura de La Tenaza, estabilizaron la línea de costa según Ingeominas (2001a); sin embargo, es notorio el retroceso de la línea de costa al norte del monumento de Los Alcatraces, donde se puede evidenciar un retroceso de más de 45 m en este sector, y es característica la presencia de escarpes 0.5 a 1 m de altura. Otro lugar crítico se presenta a la altura del Teatro Heredia (200 m al sur), donde en el año de 1956 el oleaje golpeaba la muralla y en la actualidad es el lugar donde se presentan más estragos en la vía, durante los mares de leva.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), desde el baluarte de Santo Domingo hasta el sector de la Base Naval, la configuración de la costa es cóncava, y las playas son incipientes. Aunque el sector igualmente está protegido por el malecón, entre 1996 - 2000 se construyeron 6 espolones de una longitud de 50 a 60 m y de una separación de 150 a 200 m que han contribuido en la formación de unas playas muy pequeñas en la parte norte de los mismos.

En Bocagrande el malecón se extiende hasta la Calle 8a protegido por rompeolas, que han permitido la formación de playas hasta de 30 m de amplitud con forma de media luna y pendientes de 3 a 5°. Desde el hotel Capilla del Mar hasta el espolón Iribarren las playas son más amplias (50 a 100 m) y están asociadas a la presencia de espolones de 100 m de longitud, y con separación entre sí de 150 a 200 m. Desarrollan 2 bermas y tienen inclinaciones del frente de playa de 5 a 7°; históricamente es uno de los sectores más intervenidos con rellenos de arena para su mantenimiento (Martínez 1989) en Ingeominas (2001a) y en la actualidad presentan tendencias erosivas significativas.

Las playas de El Laguito son incipientes aunque estén protegidos por espolones. A nivel local pueden alcanzar 20 m de amplitud y en algunos lugares ya no existen, lo que permite que el oleaje choque directamente en los cimientos de las edificaciones (p.e. Edificio Tocahagua). La pendiente de las playas oscila entre 5 y 8°, y en algunos sectores éstas presentan una berma (Carvajal y Pérez 1993 en Ingeominas 2001a).

En el costado sur del barrio Castillogrande, las playas se encuentran protegidas tanto por rompeolas como por espolones. Se presentan mejor preservadas las del sector comprendido entre las avenidas San Martín (Carrera 2) y Pichincha (Calle 5A), con amplitudes del orden de 50 m y pendientes de 4 a 6° (Ingeominas 2001a). Hacia el Club Naval de Oficiales, las playas hace 20 años no superaban los 10 m de amplitud, por lo



tanto tiempo después se han realizado rellenos hidráulicos en el sector, lo cual ha permitido la recuperación de las mismas.

Según Ingeominas (2001a), en la parte interna de la bahía, en las islas de Manga y Manzanillo del Mar, localmente se presentan playas incipientes de 1 a 3 m, con pendientes de 5 a 10° asociadas a la presencia de sedimento grueso constituido de fragmentos de coral porites.

Es importante destacar que a lo largo del borde costero occidental de la ciudad se tiene previsto en los próximos años la construcción de la Avenida del Bicentenario que se extendería según diseño inicial a partir de la finalización del Túnel de Crespo por toda la Avenida Santander hasta la entrada a Bocagrande, recorriendo toda la Avenida 1ª de Bocagrande y El Laguito hasta el Hotel Hilton. Se tiene proyectado la construcción de obras de protección costera, ampliación de playas, áreas verdes, paseo peatonal, ciclo ruta, vía vehicular, drenajes pluviales, plazas y plazoletas.

Deltas de flujo de marea (Df): Los deltas de flujo de marea son bancos o lóbulos en forma de pata de pato (en planta) o abanico, constituidos de arena, limos y abundantes conchas y localmente colonizado de manglar, que se localizan en la parte interna de las bocas que comunican el mar con las lagunas costeras. Se forman por efecto del flujo de marea y eventos de máxima energía concentrados en las bocananas. En Cartagena, estos lóbulos se constituyen de material arenoso, localmente arcilloso, localizados en las bocas de la ciénaga de la Virgen en La Boquilla y hacia el sector suroriental de la misma según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Los deltas de flujo se presentan en zonas de planicies asociadas con flujos y reflujos de marea, cuya carga de sedimentos es significativa, se caracterizan por su baja altura sobre el nivel del mar y están relacionadas con la interacción del oleaje, la marea y las corrientes litorales. Según Gómez et al. (2012), la forma de los deltas está determinada por el tipo de energía predominante en la zona de desembocadura, siendo esta energía la encargada del transporte y redistribución de los sedimentos.

Es importante destacar que los deltas de flujo de marea de La Boquilla, formados de lóbulos en forma de pata de pato de aproximadamente 500 m² de extensión, según Ingeominas (2001a) están constituidos de arenas finas a gruesas de color gris y localmente lodosas, y a nivel local alcanzan elevaciones de 80 cm. Los deltas del sector se encuentran altamente colonizados de manglar, especialmente en zonas aledañas a la vía al mar que une Cartagena con Barranquilla. En la parte interna de los deltas subactuales y asociado con el canal principal se ha formado un delta de flujo de marea de forma lobular, producto de los últimos eventos de alta energía. En general, los deltas colonizados de manglar presentan según Ingeominas (2001a) formas lobuladas con un drenaje interno asociado a los flujos y reflujos de la marea, sus elevaciones sobre el nivel del mar son del orden de 10 a 50 cm, aunque a nivel local pueden tener más altura.



Según SGC (2010) en el sector de La Boquilla igualmente se presentan deltas de reflujo de marea constituidos por lóbulos a manera de barras longitudinales de arena con presencia de conchas y materia orgánica, de 7000 a 10000 m² de extensión, cuyo origen se asocia al efecto de reflujo de marea a lado y lado de la boca que comunica la ciénaga de la Virgen con el mar (ver fig. 78). Su forma varía de acuerdo a la acción de dispersión de sedimentos por el oleaje, conformando verdaderos micro deltas en zonas protegidas.



Figura 78. Delta de flujo en La Boquilla

Fuente: Tomado de Google Earth (2012) y modificado por el autor (2015)

De acuerdo con Ingeominas (2001a), en el sector suroriental de la ciénaga de la Virgen, se presenta un antiguo delta de marea en forma de abanico, de constitución predominantemente arcillosa, cubre un área cercana a 0.7 Km² y está colonizado por manglar, por lo tanto es característico el desarrollo de un drenaje interno muy irregular.

En la parte intermedia de la barra espiga de La Boquilla, sector punta Zapatero, se presentan abanicos de aproximadamente 0.4 a 0.5 Km² de extensión, en forma festoneada y cubiertas de manglar que pueden estar relacionados a antiguas bocas de la barra espiga de La Boquilla. Igualmente pueden tener influencia de abanicos de sobrelavado, relacionados con mares de leva antiguos (Ingeominas 2001a).

Plataformas y bajos arrecifales (Ba): Las plataformas y bajos arrecifales son cuerpos rocosos someros, sumergidos en el mar, de constitución calcárea construidos por corales y otras especies formadoras de arrecifes (Ingeominas 2001a). Según Gómez et al. (2012) la composición de estos fondos someros consta de especies formadoras de arrecifes en un porcentaje predominante mayor que 70 % y otras coberturas como macroalgas, praderas de pastos marinos, fondos de arena y cascajos, que representan un porcentaje menor que 30 %.

Estas geofomas se presentan a manera de planos parches en la parte oriental de la bahía de Cartagena, y como pináculos de poca extensión (Ingeominas 2001a), de constitución coralina no viva y fragmentos de concha, dispersos en la parte interna de la bahía. Según SGC (2010), los bajos arrecifales subactuales predominan en la bahía y representan remanentes de coral destruido probablemente por el efecto de alta cantidad



de sedimentos que ha ingresado a la bahía, a través del canal del Dique y caños que bordean la misma.

Los cuerpos someros de mayor extensión se encuentran en el borde oriental de la bahía de Cartagena frente a Mamonal, donde se encuentran parcialmente cubiertos de manglar. Se trata de arrecifes franjeantes en forma de abanico, que al unirse forman barreras (arrecifes franjeantes coalescentes), y dejan unas lagunas traseras de una amplitud de 200 a 500 m y de una profundidad de 2 a 10 m, según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Debido al efecto de barrera de estos arrecifes, en su parte trasera se constituyen en trampas de sedimentos provenientes de las lomas y playones vecinos. De acuerdo con Urbano et al. (1992) en Ingeominas (2001a), igualmente se presentan allí sedimentos provenientes del canal del Dique.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), algunos arrecifes franjeantes que se presentan bordeando las islas de Manga y Manzanillo han dejado tras de sí una laguna interna de una amplitud de 50 a 200 m. En estos sectores no se presenta desarrollo del manglar y los arrecifes se encuentran a una distancia de 1 a 2 m de la superficie del agua.

En la parte interna de la bahía se presentan bajos arrecifales asociados a pináculos arrecifales antiguos que se constituyen en bajos problemáticos para la navegación, puesto que se encuentran a profundidades del orden de 2 a 4 m de la superficie y a nivel local es característico su aspecto plano en la parte superior. Tal situación es indicativa de antiguos procesos de abrasión marina asociados probablemente a niveles marinos subrecientes más bajos que el actual, según lo planteado por Ingeominas (2001a).

Dunas costeras (D): Las dunas costeras son geoformas de origen eólico, sin embargo por presentarse en ambientes marinos se han agrupado como tal en el presente documento. De acuerdo con Ingeominas (2001a), corresponden a montículos o lóbulos de formas alargadas en la dirección del viento, conformadas por sedimentos de tamaño grueso y dispuestas paralelas a la línea de costa. Su origen se debe al arrastre y acumulación de arena por la energía del viento prevaleciente. Según Gómez et al. (2012) las dunas presentan usualmente forma de crestas de arena, más o menos paralelas entre sí, que se acumulan cuando la velocidad del viento disminuye o cuando los granos chocan con un obstáculo que impide su transporte.

Siguiendo a Gómez et al. (2012), las dunas pueden agruparse en dunas activas, cuando están desprovistas de vegetación, y dunas estabilizadas o inactivas, cuando están cubiertas de vegetación o aquellas que tienen un obstáculo al frente que impide su desarrollo (p.e. acantilado antiguo) denominadas dunas rampantes o remontantes. De acuerdo con la forma, posición y disposición respecto a la dirección predominante del viento, se han diferenciado dunas tipo barjanas, parabólicas, longitudinales, transversales y dunas de sombra.

En general, las dunas barjanas, según SGC (2010), son de morfología alomada de laderas cóncavas hacia barlovento y en forma de media luna con cuernos en dirección del viento predominante. Las dunas parabólicas están conformadas por dos puntas o cuernos en forma de crestas dirigidas en dirección de barlovento. Las dunas longitudinales son alargadas y estrechas, de crestas redondeadas o agudas, extendidas paralelas a la dirección del viento. Finalmente las dunas de sombra son elongadas en la



dirección del viento prevaleciente, de 0.5 a 2 m de altura y 2 a 3 m de largo, formadas por el obstáculo ejercido por vegetación herbácea o arbustiva, y desarrolladas en grandes playones asociados con espigas y tómbolos.

Las dunas presentes en la ciudad son incipientes y se disponen a lo largo de la línea de costa, especialmente en la barra de La Boquilla, Marbella y Bocagrande. Las dunas más desarrolladas se encuentran en las playas de Marbella, donde alcanzan alturas de 2 m, son dunas de sombra y están estabilizadas por vegetación rastrera y palmeras (Carvajal y Pérez 1993 en Ingeominas 2001a).

Según Ingeominas (2001a), en el sector de La Boquilla y en Bocagrande, las dunas se encuentran igualmente estabilizadas ya sea por cercas o por la base de las edificaciones, sin embargo, a nivel local es común la generación de capas de arena de 5 a 50 cm de alto que son especialmente móviles en época de los vientos alisios.

□ **Geoformas de origen fluvial**

Estas geoformas deben su origen a la actividad de procesos morfogénicos específicos de acumulación y erosión en los cauces y llanuras aluviales (SGC 2010), y según Gómez et al. (2012) generalmente están asociadas a sistemas deltaicos. De acuerdo con SGC (2010), corresponden a las unidades generadas como producto de la dinámica fluvial y lacustre desarrolladas sobre extensas llanuras aluviales ocupadas por los cauces naturales y artificiales que permanecen activos, o aquellas llanuras, que por diversas razones han sido abandonados (tectónica, cambios en el nivel de base por tectónica o cambios eustáticos del mar en tiempos subactuales a subrecientes), dejando los remanentes sedimentarios o erosivos en alturas alejadas de los cauces mayores actuales.

Entre las unidades geomorfológicas de origen fluvial identificadas en la ciudad de Cartagena, según lo planteado por Ingeominas (2001a) están los planos aluviales y los abanicos aluviales.

Planos aluviales (Pa): Los planos aluviales son lóbulos de sedimentos arcillosos o arenosos formados por la depositación fluvial a lo largo de los cauces y la desembocadura de las corrientes de agua (Ingeominas 2001a). Según Gómez et al. (2012) este tipo de superficie de forma plano-cóncava se inunda estacionalmente como consecuencia del aumento en el nivel del drenaje en la temporada de lluvias; representan antiguas llanuras de inundación de diferentes grados de disección y de altura variable.

Siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001a), las terrazas y llanuras de inundación fluvial se incluyen como planos aluviales. Según SGC (2010), se conforman a través de franjas de terreno, planas y bajas, de morfología ondulada, eventualmente inundables, que bordean los cauces fluviales, limitados localmente por escarpes de terraza. Se constituyen de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial.

Según Ingeominas (2001a), las llanuras de inundación asociadas a los arroyos de Ternera, Cacao y Limón, al sureste de la ciénaga de La Virgen, se destacan por su relativa mayor extensión; presentan forma de artesa muy suave de 300 m de amplitud, especialmente en los barrios Villa Rosita y Las Palmeras.



En el barrio Bellavista y al norte del barrio 20 de Julio (Sur), sector suroriental de la ciudad, se presentan llanuras de características similares a las antes mencionadas, cuya amplitud es del orden de 150 a 250 m, respectivamente, y la morfología que se exhibe es plana y cruzada por un drenaje de aspecto trenzado, localmente no bien definido (Ingeominas 2001a).

En el sector de Villa Lorena, al nororiente de la bahía de Cartagena, igualmente se presentan según Ingeominas (2001a) llanuras de inundación de 200 m de ancho, donde se desarrolla un drenaje sinuoso, actualmente canalizado. Así mismo, en el sector sureste de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Rafael Núñez se encuentra una llanura de inundación de 100 a 150 m de ancho, donde se evidencian cubetas de decantación (depresión cerrada de estancamiento prolongado de aguas de inundación que decanta el material que conforma las cubetas) de 10000 a 15000 m² de extensión, hoy parcialmente colmatadas o rellenadas.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), es característico, hacia el sector sur de la ciénaga de la Virgen, el desarrollo de deltas fluviales antiguos en los canales de María Auxiliadora, Amador, Limón y Tabú, este último con la mayor extensión en el sector de la ciénaga. Igualmente, con base en el análisis de fotografías aéreas antiguas, hecho por Ingeominas (2001a) se evidencia un delta fluvial de 60000 m² en el sector de Frigopesca. Estos deltas, hoy cubiertos por rellenos, son indicadores de un antiguo nivel de ciénaga o laguna costera.

Otros sectores de la ciudad donde se presentan planos aluviales se localizan en los barrios Daniel Lemaitre (Sector 20 de Julio), Nariño, La Candelaria, Altos de San Isidro, Nuevo Bosque, Olaya Herrera, Escallón Villa, Los Alpes, La Victoria, Villas de la Victoria, en terrenos del Antiguo basurero de Henequén y en algunas zonas de la variante Mamonal - Turbaco.

Abanicos aluviales (A): Los abanicos aluviales son acumulaciones en forma de cono (vista de planta), de suave pendiente y constituidos de fragmentos de rocas y sedimentos. Su origen está asociado a la erosión y posterior acumulación hecha por una corriente de agua en la base de una zona escarpada (Ingeominas 2001a) o en el punto donde dicha corriente llega a zonas amplias. Según Gómez et al. (2012) estos conos aluviales presentan forma lobulada o de abanico, producida por el proceso de acumulación de los materiales depositados, usualmente como consecuencia de un cambio abrupto en la pendiente de una corriente de agua. En algunos casos la ubicación de los abanicos se extiende entre las zonas de colinas y lomas, y de llanura aluvial.

Para SGC (2010) estos conos de deyección se extienden por decenas de metros según la zona, presentan pendientes que varían de 5 a 10° y se constituyen de tierra, arena y grava en espesores de 3 a 5 m. En su génesis influye la pérdida de energía de los cauces con una importante carga de sedimentos que son depositados al disminuir la pendiente a lo largo del abanico aluvial. Su forma cónica hace que funcionen como barrera natural en los cauces y la desembocadura de las corrientes de agua, obligando a desviar su curso y adaptarse al relieve.

En el costado sur del cerro de La Popa se ubican particularmente los abanicos aluviales identificados, los cuales se presentan en forma de cono y con pendientes del orden de 3 a 7°. En general, cubren áreas del orden de 10000 m² y, como característica principal,



son coalescentes como consecuencia del paralelismo de los canales que descienden del cerro de La Popa, en el barrio La Quinta, según lo consignado en Ingeominas (2001a).

Los abanicos aluviales de los barrios de Lo Amador y Las Delicias son destacados por Ingeominas (2001a) por su tamaño, cubren un área aproximada de 30000 y 22000 m² respectivamente, y su origen se encuentra asociado en parte a la ocurrencia periódica de deslizamientos rotacionales, cuyos sedimentos han sido distribuidos por los canales que descienden por el sector.

De acuerdo con Ingeominas (2001a), la constitución de estos conos es predominantemente areno-arcillosa con bloques de arenisca calcárea y calizas de tamaño entre 5 y 20 cm. Es probable que el hecho particular de la presencia de abanicos aluviales en el sector sur de La Popa, esté relacionado con un fallamiento en el sector.

A continuación en las figuras 79, 80, 81 y 82 se muestra el Mapa de geomorfología de la ciudad de Cartagena elaborado por Ingeominas (20001a), el cual ha sido dividido en cuatro planchas para su mejor visualización.



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

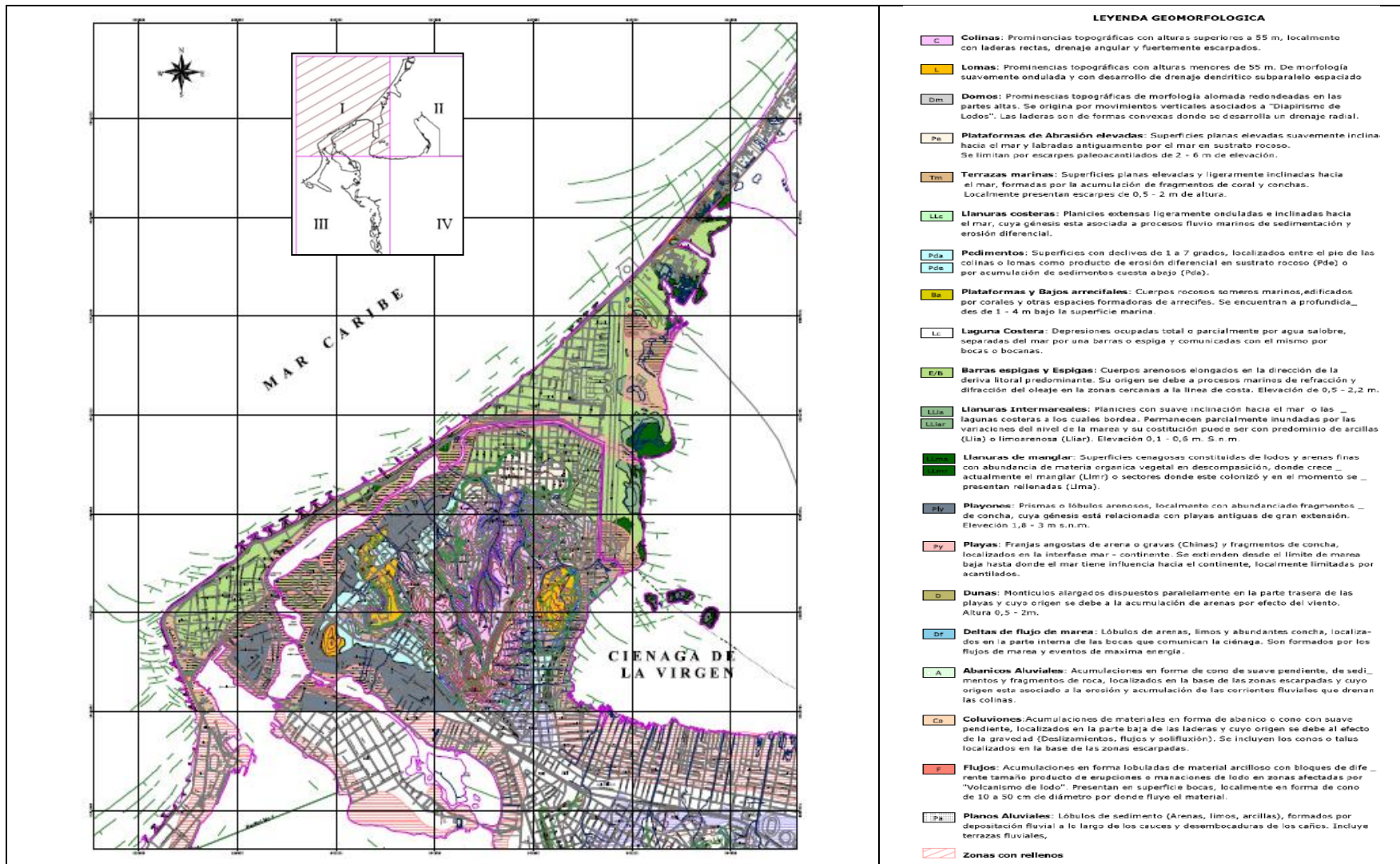


Figura 79. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha I de IV
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

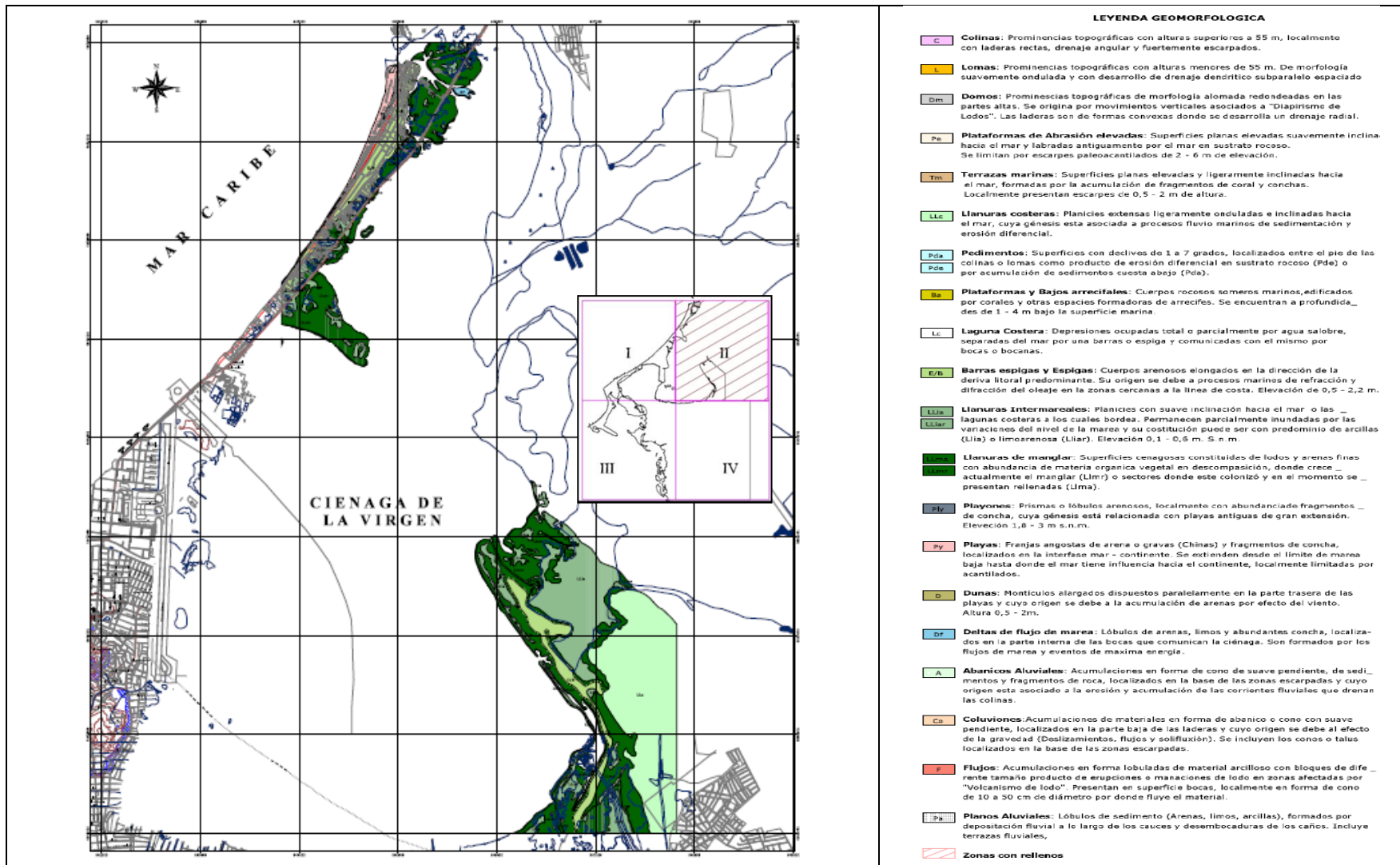


Figura 80. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha II de IV
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

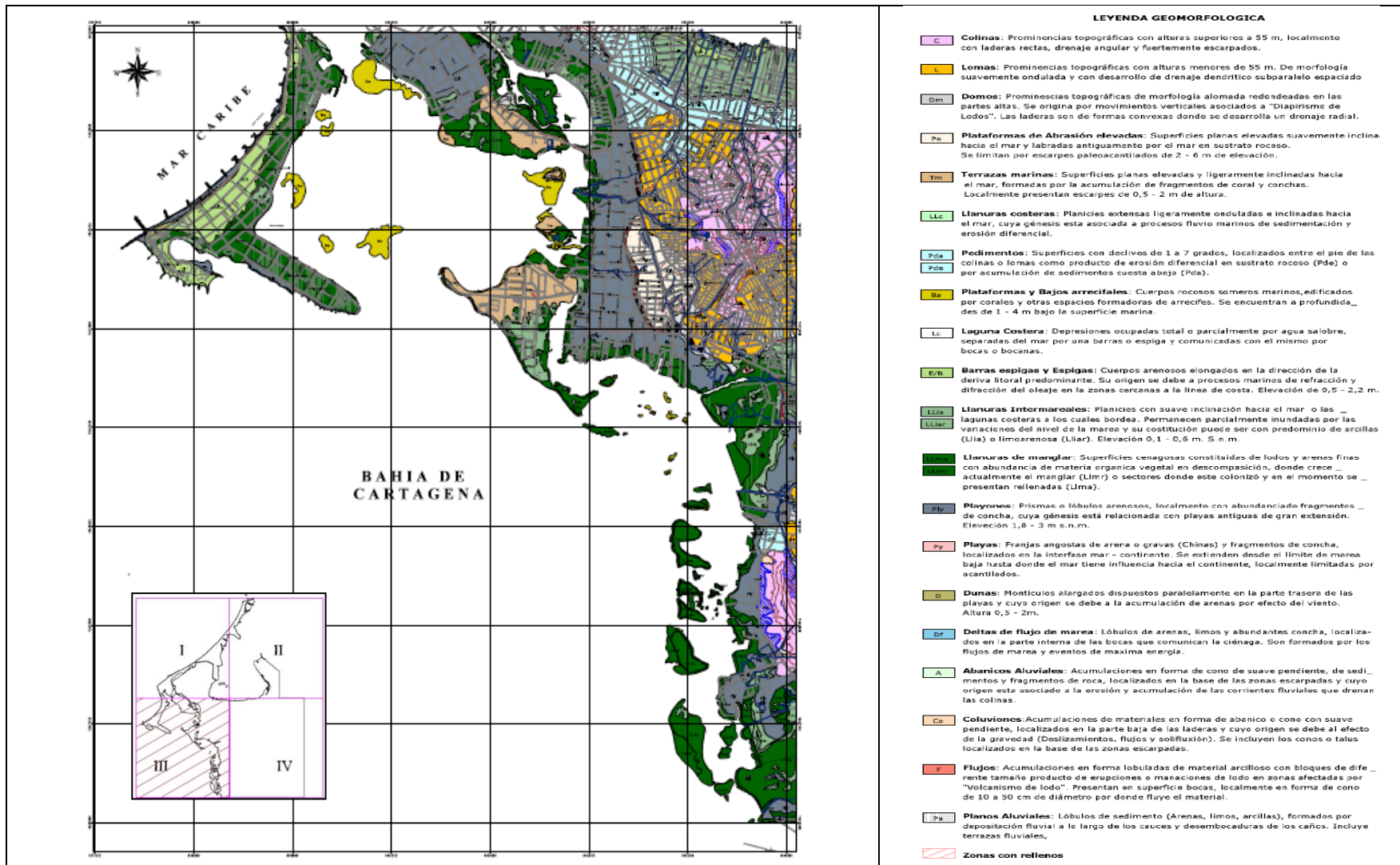


Figura 81. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha III de IV
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

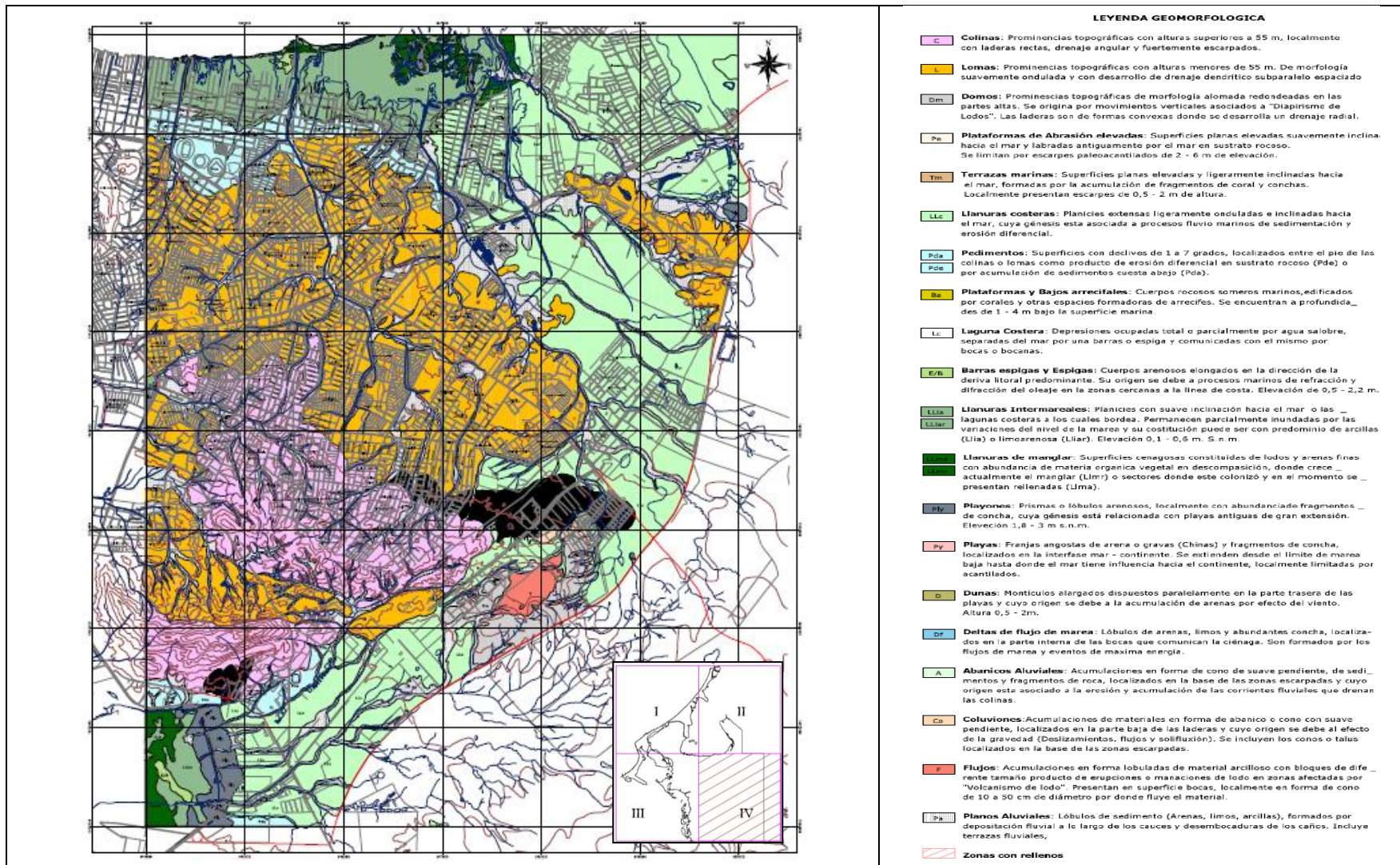


Figura 82. Mapa de Geomorfología local de Cartagena - Plancha IV de IV
 Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Capítulo 4. Aplicación de la metodología del sistema semicuantitativo de evaluación de estabilidad en Cartagena

El capítulo 4 tiene por objeto principal mostrar los resultados de la aplicación de la metodología SES en la ciudad de Cartagena, de acuerdo con los objetivos del presente trabajo académico. En primer lugar se hace una breve descripción de los parámetros intrínsecos de la metodología, a partir de lo consignado en el documento de Ingeominas (2001a) para el caso de Cartagena, teniendo en cuenta la valoración definida para los parámetros materiales, relieve, drenaje y vegetación, y la variabilidad de cada uno acorde con su influencia en la estabilidad de las laderas. A partir del alcance de este trabajo, se utiliza la misma calificación de los parámetros intrínsecos definida por Ingeominas (2001a).

Posteriormente se hace énfasis en la calibración de los parámetros detonantes de la metodología SES, teniendo en cuenta las características particulares de la ciudad de Cartagena, en relación a las precipitaciones, los procesos erosivos que se generan, la sismicidad del área y la intervención antrópica a partir de los cambios en la cobertura vegetal (deforestación). A cada parámetro detonante se le asigna una calificación, una vez obtenida las ecuaciones respectivas, según la metodología SES.

La ciudad de Cartagena presenta puntos críticos dentro de su geografía, que en los últimos años han incrementado su actividad de inestabilidad, siendo afectados periódicamente por procesos de erosión y movimientos en masa, por lo tanto en este capítulo se describen los más relevantes, entre ellos se citan loma del Diamante, Lo Amador, loma del Peyé, San Francisco, Nueva Granada - Manzanares y Salto del Cabrón, teniendo en cuenta aspectos de morfología, litología, tipo de movimiento, posibles causas, consecuencias sobre la comunidad e infraestructura y alternativas de remediación.

En la última parte del capítulo 4 se muestra el mapa final de un escenario de amenaza relativa por deslizamientos en la ciudad de Cartagena, el cual se obtiene de la suma ponderada de la calificación de cada parámetro intrínseco y detonante. Este mapa se compara con el obtenido por Ingeominas (2001a) con el propósito de identificar aquellas zonas en las cuales el nivel de amenaza relativa se ha incrementado desde el año 2001 y las posibles causas de la evolución.

El documento de trabajo de grado final se cierra con las conclusiones y recomendaciones generales derivadas del mismo, de acuerdo con los análisis y resultados obtenidos del ejercicio académico.



4.1. Descripción de parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos controlan la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa de un área dada, en este caso del casco urbano de Cartagena y pueden generar una situación potencialmente inestable, debido principalmente a los siguientes parámetros, los cuales son descritos a continuación según lo planteado en la metodología SES y los puntajes definidos por Ingeominas (2001a) para cada uno de ellos.

4.1.1. Parámetro Tipo de Materiales (M)

De acuerdo con el comportamiento geomecánico de las rocas, material intermedio y suelos que conforman las laderas de la ciudad de Cartagena, Ingeominas (2001a) asignó puntajes de materiales entre 4 y 50 para cada unidad de litología establecida por ellos, teniendo en cuenta el tipo de depósito y material constituyente (composición y granulometría), densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad; la geología del material rocoso, su resistencia y condición de fracturamiento.

Los puntajes asignados por Ingeominas (2001a) han sido revisados y redefinidos en la presente evaluación del Parámetro Materiales (M), de acuerdo con los lineamientos planteados por la metodología SES, puesto que en su momento Ingeominas (2001a) asignó calificación máxima de 50 a algunos suelos de Cartagena, lo cual no es del todo preciso, si se tiene en cuenta que este puntaje es exclusivo para materiales rocosos dentro de la metodología SES.

Dicho lo anterior, se asignaron puntajes entre 5 y 16 a los materiales sedimentarios pertenecientes a la Formación Popa y Bayunca, en razón de sus características litológicas. De igual forma se asignó puntaje máximo de 25 a los depósitos cuaternarios de origen aluvial, definidos como suelos de composición predominantemente arcillosa con intercalaciones de arena. Los depósitos coluviales constituidos predominantemente de materiales arcillosos se les asignó puntaje de 5, mientras que a los lodos producto de la acción diapírica se le colocó puntaje de 3.

A continuación en el cuadro 25 se relacionan los puntajes de materiales asignados siguiendo lo planteado en la metodología SES. La columna Clase hace referencia a las unidades litológicas similares.



Zona	Descripción	Clase	Puntaje
Ba	Bajos arrecifales subrecientes	1	25
Da	Depósitos de origen arrecifal	2	25
Dar	Depósitos aluviales recientes	3	25
Dcal	Depósitos coluvio-aluviales	4	5
Dcl	Depósitos coluviales	5	5
Dma	Depósitos marino-aluviales	6	19
Dima	Depósitos intermareales (arcillas)	7	19
Dimar	Depósitos intermareales (arenas y limos)	7	19
Dp	Depósitos de playa	8	19
Dpy	Depósitos de playón	9	12
L	Lodos	10	3
Sma	Sustrato de manglar antiguo	11	18
Smr	Sustrato de manglar reciente	11	18
T1-1	Conjunto superior de la formación calcárea de la Popa	12	10
T1-2	Conjunto intermedio de la formación calcárea de la Popa	13	5
T1-3	Conjunto inferior de la formación calcárea de la Popa	14	5
T2-1	Conjunto superior de la formación detrítica de Bayunca	15	7
T2-2	Conjunto superior de la formación detrítica de Bayunca	16	3
T2-3	Conjunto superior de la formación detrítica de Bayunca	17	5

Cuadro 25. Puntajes del parámetro Material (M)

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a) y ajustado por el autor (2015)

El Mapa de Litología se trazó de acuerdo con lo planteado en la cartografía de Ingeominas (2001a) utilizando SIG y se aprecia en la figura 83. El mapa de calificación del parámetro Material (ver figura 84) también se elaboró utilizando la misma herramienta.

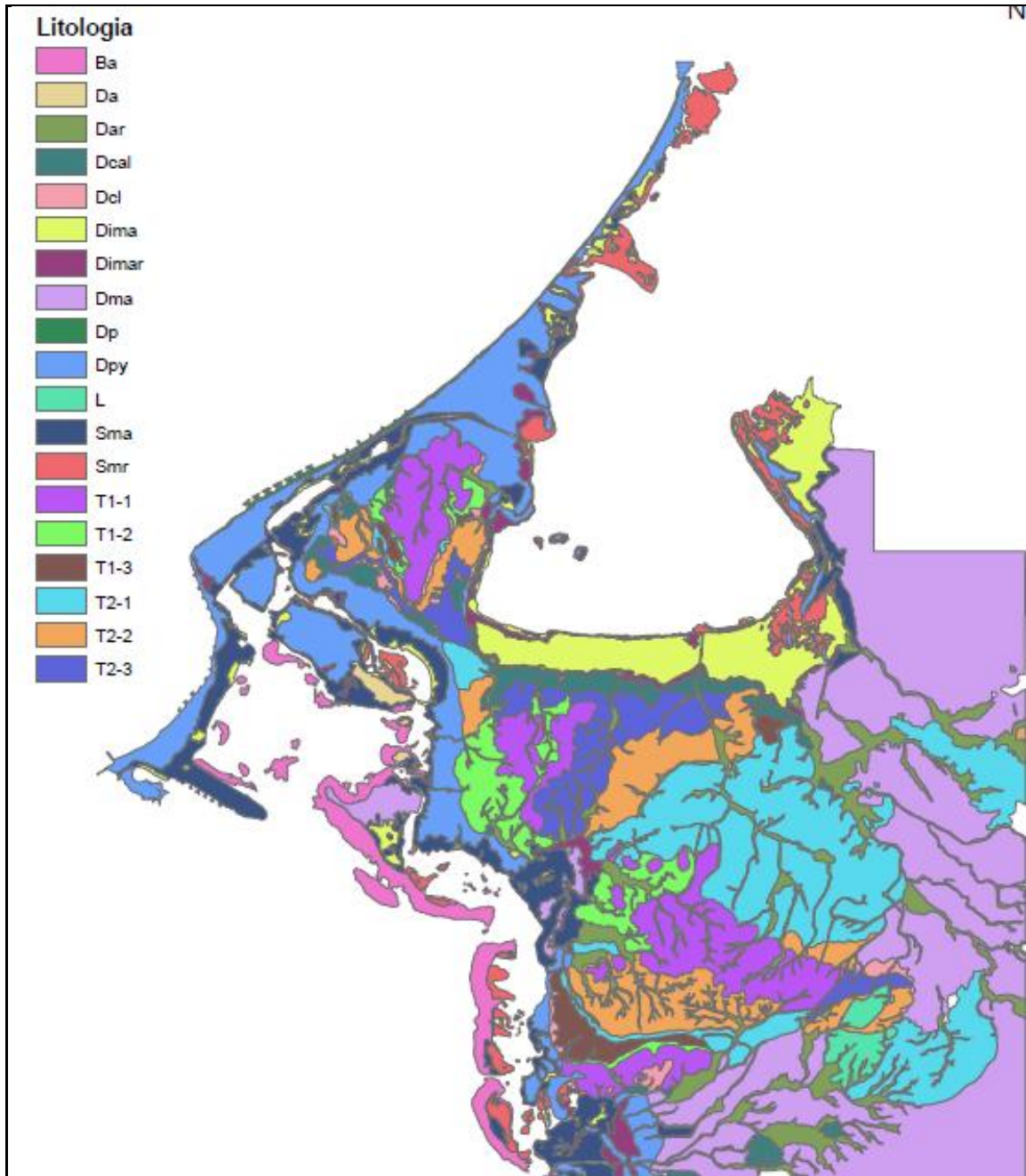


Figura 83. Mapa de litología de Cartagena

Fuente: Cartografía de Ingeominas (2001a) y editado por el autor (2015)

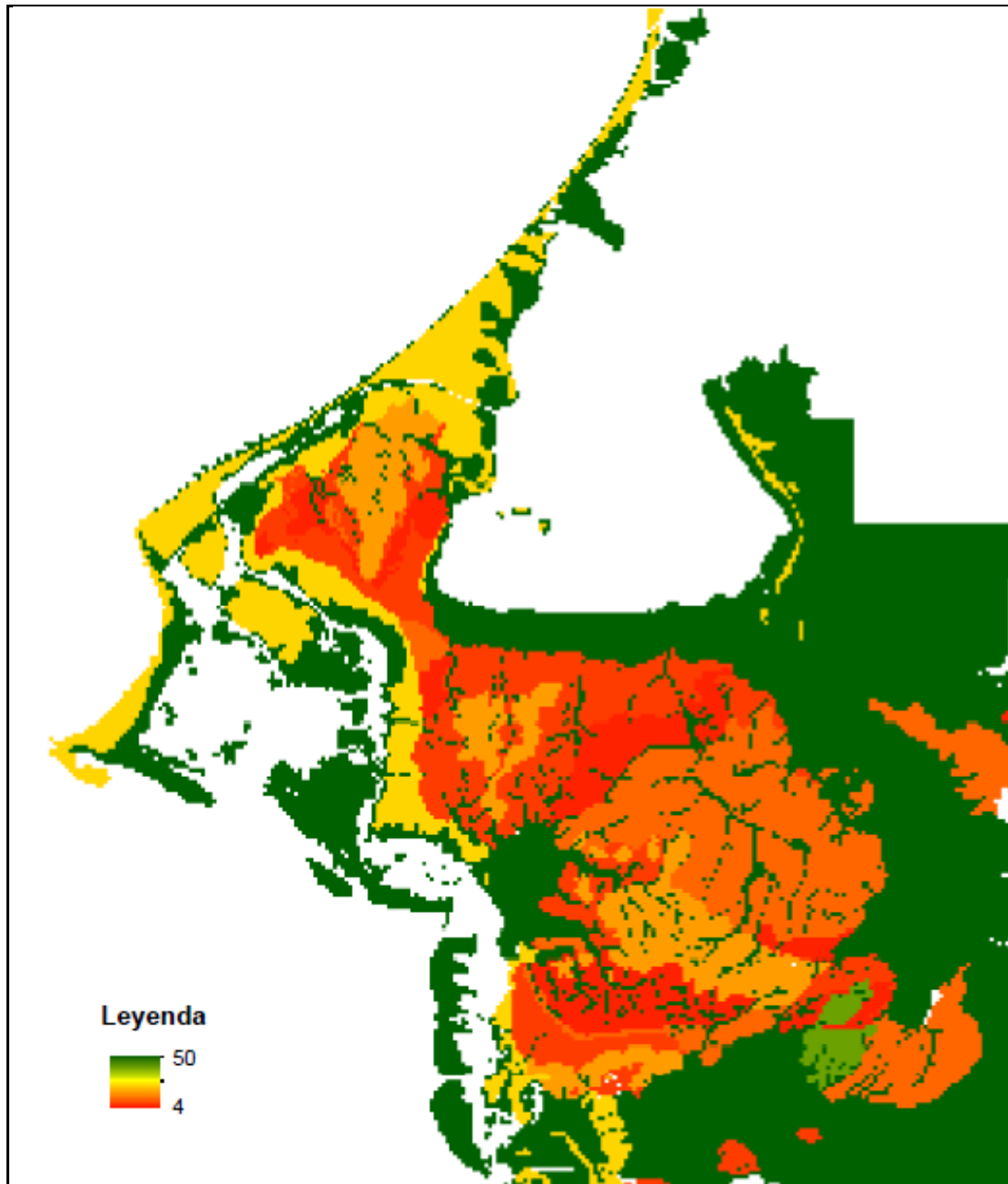


Figura 84. Mapa de calificación del Parámetro Material (M)

Fuente: El autor (2015)



4.1.2. Parámetro Relieve (R)

Este parámetro de relieve fue evaluado por Ingeominas (2001a), asignando puntajes de para cada unidad geomorfológica establecida por ellos, teniendo en cuenta la pendiente promedio y la forma característica del perfil longitudinal según lo planteado en el perfil de Dalrymple. Es importante destacar que a partir de la geomorfología de un área dada, en este caso de Cartagena, se pueden cuantificar las pendientes, cambios en la misma, orientación, definición de su perfil y clasificación de las geoformas según su génesis.

Se asignaron puntajes de relieve sobre las unidades geomorfológicas de Cartagena, destacándose laderas estables tipo interfluvio con pendientes entre 0 y 1° (puntaje de 30) y una forma cóncava (puntaje de 14) para un puntaje total de 44. Del mismo modo se presentan laderas inestables tipo "intermedia de transporte" con pendientes entre 20 y 30° (puntaje de 6) y una forma convexa (puntaje de 9) para un puntaje total de 15, así como laderas inestables tipo coluvión con pendientes entre 5 y 20° (puntaje de 6) de distinta forma de perfil.

Una vez evaluado los tipos de ladera por subzonas y la forma del perfil, Ingeominas (2001a) obtuvo como resultado para las zonas de colinas un puntaje de 18, mientras que para los sistemas de lomeríos, flujos, domos volcánicos, planos aluviales y coluviones un puntaje de 15. En relación a las zonas de llanuras intermareal y de manglar, playas, espigas y barras se obtuvo un puntaje máximo de 44. A continuación en el cuadro 26 se relacionan los puntajes totales de relieve asignados por Ingeominas (2001a) para las unidades geomorfológicas establecidas.

Zona	Descripción	Clase	Puntaje
B	Barras	1	44
Ba	Plataformas y Bajos arrecifales	2	44
C	Colinas	3	18
Co	Coluviones	4	15
Df	Depósitos de flujos	5	33
Dm	Domo volcánico	6	15
E/B	Espigas y barras	1	44
F	Flujos	7	15
L	Lomas	8	15
Lc	Lagunas costeras	9	44
Llc	Llanuras costeras	10	42
Llia	Llanuras intermareales (arcillas)	11	44
Lliar	Llanuras intermareales (arenas y limos)	11	44
Llma	Llanuras de manglar antiguas	12	44
Llmr	Llanuras de manglar recientes	12	44
Py	Playas	13	44
A	Abanicos aluviales	14	20
Pa	Planos aluviales	14	15
Pda	Pedimentos por acumulación	15	20
Pde	Pedimentos por erosión	15	20
Pe	Plataforma de abrasión elevada	16	31
Ply	Playones	17	33
Tm	Terrazas marinas	18	31
D	Dunas	19	44

Cuadro 26. Puntajes del parámetro Relieve (R)

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



El Mapa de Relieve se trazó de acuerdo con lo planteado en la cartografía de Ingeominas (2001a) utilizando SIG y se aprecia en la figura 85. El mapa de calificación del parámetro Relieve (ver figura 86) también se elaboró utilizando la misma herramienta.

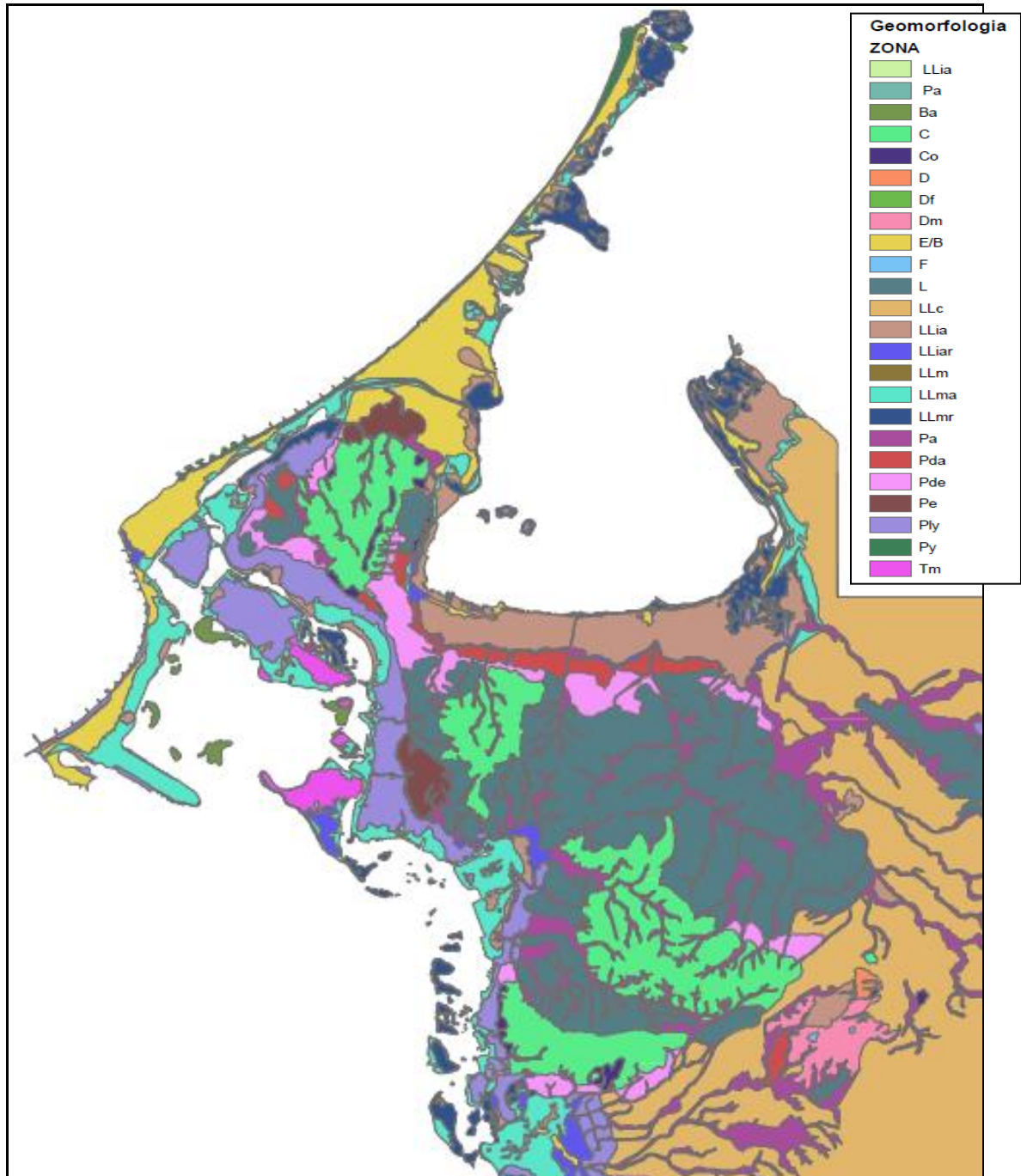


Figura 85. Mapa de geomorfología de Cartagena

Fuente: Cartografía de Ingeominas (2001a) y editado por el autor (2015)

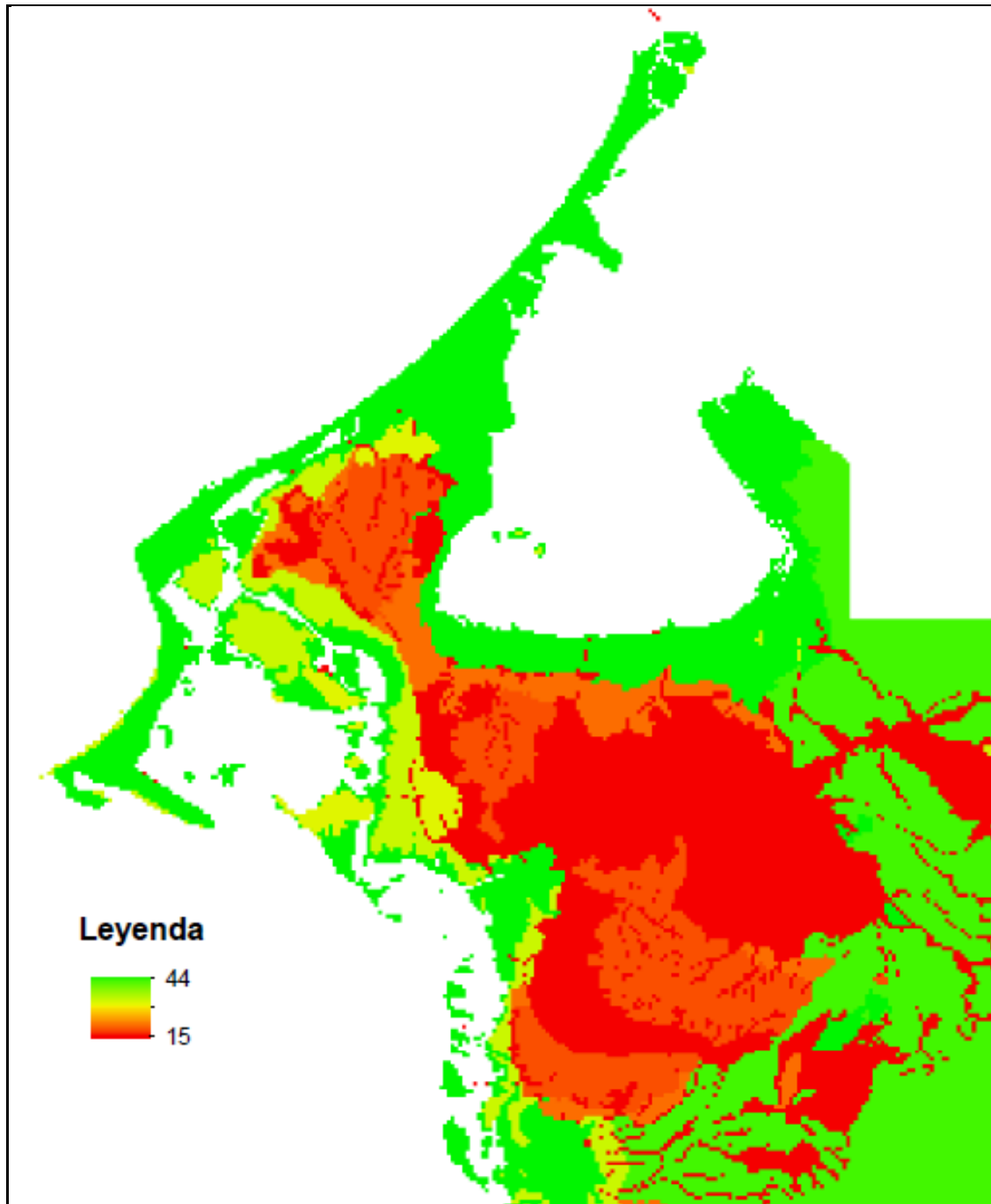


Figura 86. Mapa de calificación del Parámetro Relieve (R)

Fuente: El autor (2015)



4.1.3. Parámetro Drenaje (D)

De acuerdo con el modelo de disección (drenaje) que depende de las características litológicas, climáticas y topográficas, Ingeominas (2001a) evaluó el parámetro de Drenaje teniendo en cuenta la densidad del drenaje y la pendiente promedio del cauce.

Los rangos de valores para las condiciones de densidad del drenaje de Cartagena se definieron de la siguiente forma.

Categoría	Densidad de drenaje (m/ha)
Densidad baja	0 - 25
Densidad media	25 - 45
Densidad alta	> 45

Las pendientes del cauce consideradas como el promedio ponderado para cada microcuenca se agruparon por rangos de inclinación de la siguiente manera.

Categoría	Pendiente (grados)
Baja	0 - 5
Media	5 - 15
Alta	> 15

Ingeominas (2001a) asignó puntajes de drenaje a cada microcuenca establecida, teniendo en cuenta factores hidrológicos que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa, al estar directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos. A continuación en el cuadro 27 se relacionan los puntajes de drenaje asignados por Ingeominas (2001a).

N°	N° cuenca	Puntaje
1	Popa Este	6
2	Loma fresca	10
3	Pablo VI	10
4	Nariño	6
5	La Salle	6
6	Popa Oeste - Sur	6
7	María Auxiliadora	25
8	Barcelona	30
9	Amador y Cortes	10
10	Salim Bechara	35
11	Tabú	10
12	Ricaurte	23
13	Chapundún	23
14	Siete Leguas	23
15	Paraguay	10
16	El Bosque	19
17	Santa Clara	19
18	Albornoiz Norte	10
19	Policarpa	10
20	Limón	10

Cuadro 27. Puntajes del parámetro Drenaje (D)

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Se asignaron puntajes de 6 a las sub-cuencas de mayor aportación a los procesos de inestabilidad, entre ellas se citan Popa Este, Nariño, La Salle y Popa Oeste - Sur, seguido de las sub-cuencas Loma Fresca, Pablo VI, Amador y Cortes, Tabú, Paraguay, Albornoz Norte, Policarpa y Limón que se les asignó un puntaje de 10.

En las zonas de topografía plana (pendientes de 0° a 5°), correspondiente a los sectores de Crespo, Daniel Lemaitre, Marbella, El Cabrero, Sector amurallado, Bocagrande, El Laguito, Castillogrande, Manga, Manzanillo y al sur de la Ciénaga de la virgen se asignó un puntaje de 35, acorde con una densidad de drenaje baja, pues estas zonas usualmente son susceptibles de retener aguas de escorrentía.

El Mapa de Drenaje se trazó de acuerdo con lo planteado en la cartografía de Ingeominas (2001a) utilizando SIG y se aprecia en la figura 87. El mapa de calificación del parámetro Drenaje (ver figura 88) también se elaboró utilizando la misma herramienta.

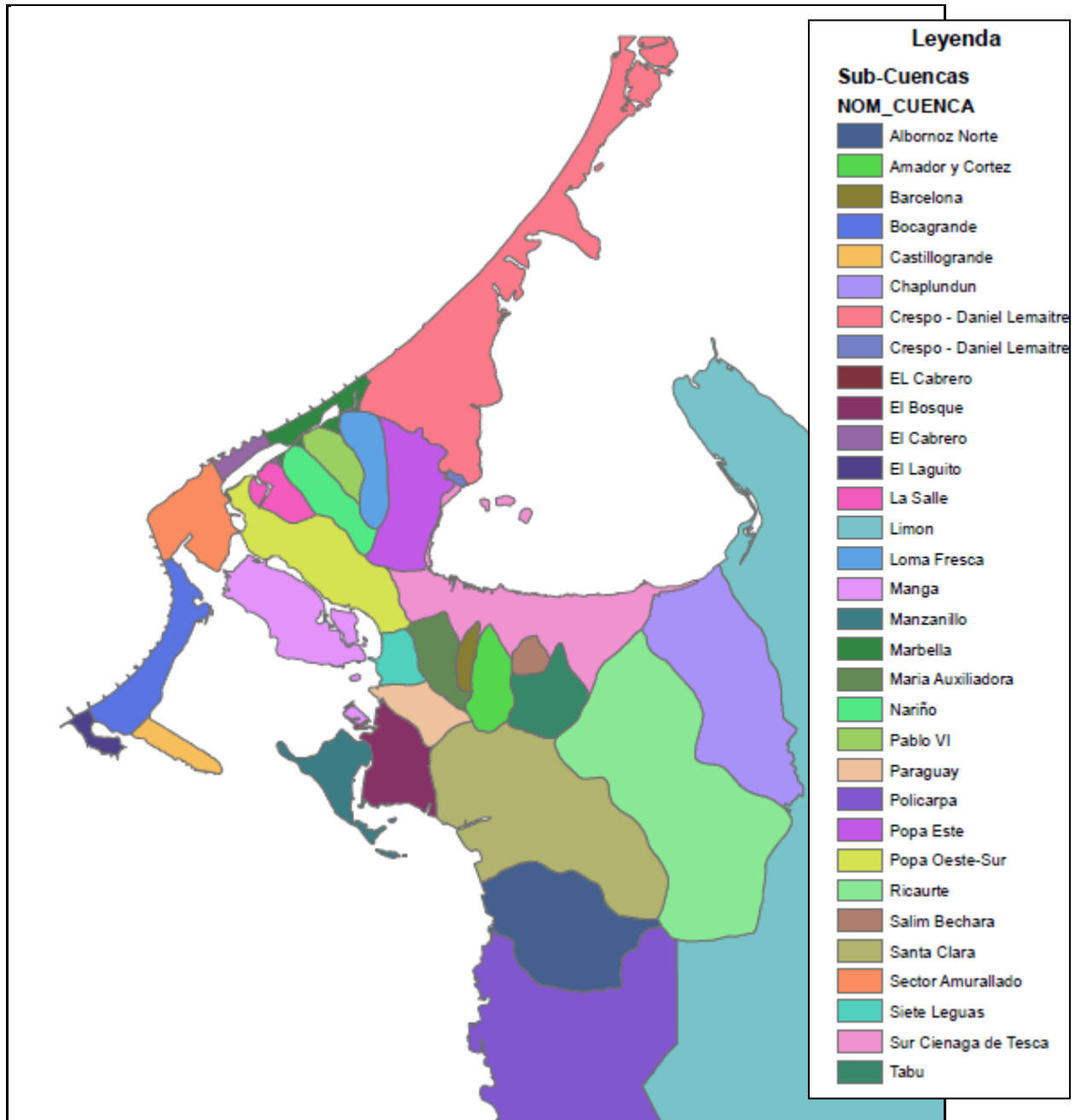


Figura 87. Mapa de Subcuencas de Cartagena

Fuente: Cartografía de Ingeominas (2001a) y editado por el autor (2015)

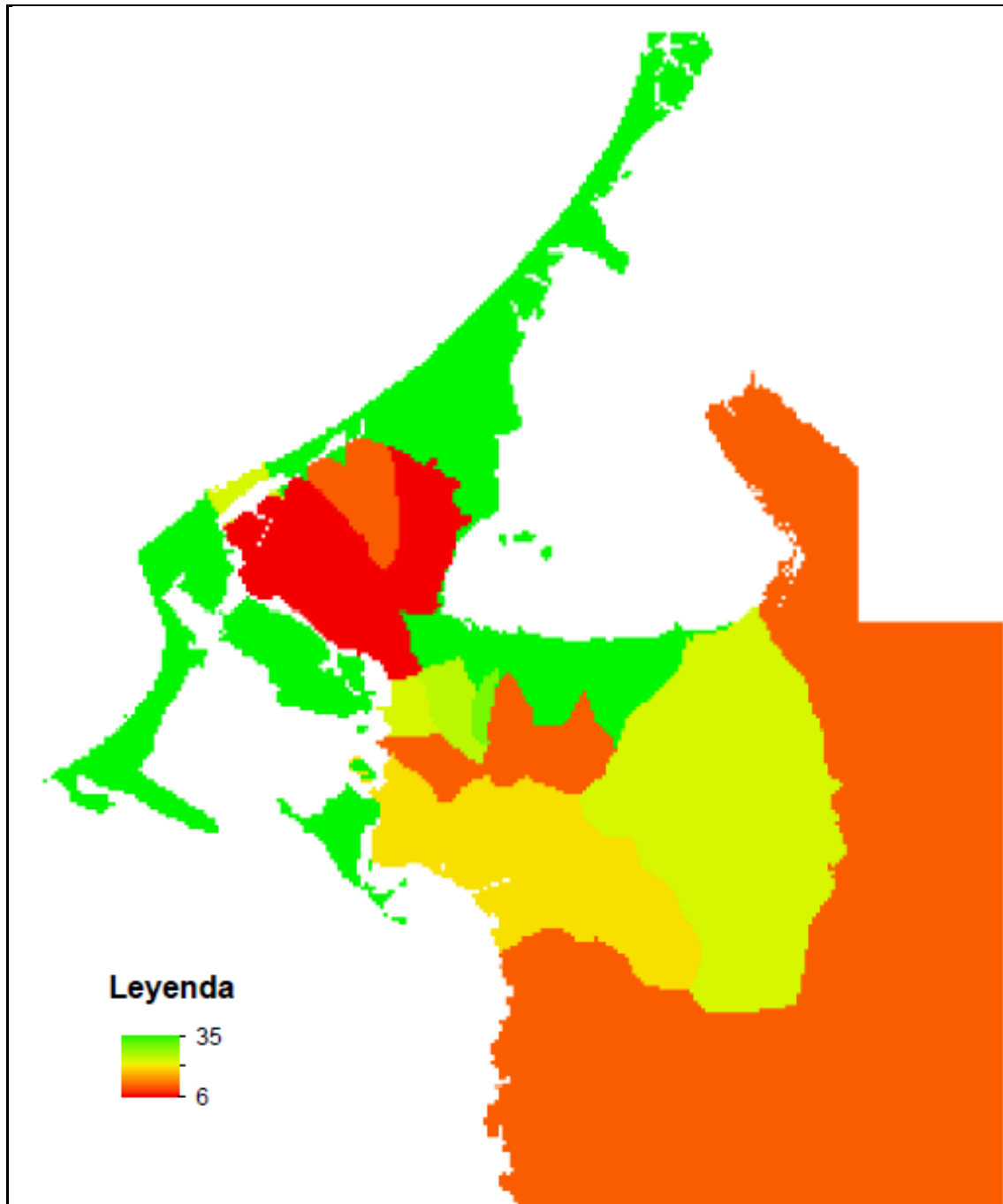


Figura 88. Mapa de calificación del Parámetro Drenaje (D)

Fuente: El autor (2015)



4.1.4. Parámetro Vegetación (V)

Este parámetro de vegetación fue evaluado por Ingeominas (2001a), asignando puntajes a la cobertura vegetal natural, la cual se categorizó mediante el análisis de su dosel (hábitat que comprende la región de las copas y regiones superiores de la vegetación) con base en fotografías aéreas. En la elaboración del mapa de cobertura vegetal se adoptó el siguiente rango en función de la altura de la vegetación:

Tipo de Cobertura	Altura (m)
Pastos	0 - 0.5
Herbáceas	0.5 - 2
Arbustivas	2 - 10
Arbóreas	> 10

Dentro de los rangos establecidos Ingeominas (2001a) incluyó todo tipo de cobertura vegetal sin hacer especificaciones sobre las especies o clases de cultivos. Es importante destacar que la cobertura vegetal es un elemento fundamental en lo referente al control de erosión para mitigar procesos de inestabilidad de laderas.

Se asignaron puntajes de vegetación sobre las unidades de cobertura vegetal establecidas por Ingeominas (2001a), destacándose la mayor concentración de vegetación en los cerros de La Popa y Albornoz, especialmente del tipo arbustiva y herbácea, presencia de vegetación arbórea en los sectores de Manga, Crespo y Castillogrande, existencia de manglar en los bordes de las ciénagas y lagunas, y la baja densidad de cobertura vegetal en el resto de la ciudad, por efecto de la actividad urbanizadora.

Aquellas áreas donde se han construido edificios, viviendas, urbanizaciones y otro tipo de infraestructura se denominaron "zonas urbanas" y también hacen parte del mapa de cobertura vegetal, en razón al uso del suelo. Es importante mencionar que aunque en el análisis de cobertura vegetal se incluyen "zonas de erosión", en la evaluación del parámetro Erosión se hace un análisis detallado. A continuación en el cuadro 28 se relacionan los puntajes de vegetación asignados por Ingeominas (2001a).

Zona	Descripción	Clase	Puntaje
Ab	Arbustiva	1	19-32
Ar	Arbórea	2	32
Hb	Herbácea	3	17
Pt	Pasto	4	15
Zu	Zona urbana	5	20
Ze	Zona de erosión	6	2

Cuadro 28. Puntajes del parámetro Vegetación (V)

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)

El puntaje asignado a la vegetación arbustiva varía entre 19 y 32, según la pendiente promedio del terreno.

El Mapa de Vegetación se trazó de acuerdo con lo planteado en la cartografía de Ingeominas (2001a) utilizando SIG y se aprecia en la figura 83. El mapa de calificación del parámetro Vegetación (ver figura 84) también se elaboró utilizando la misma herramienta.

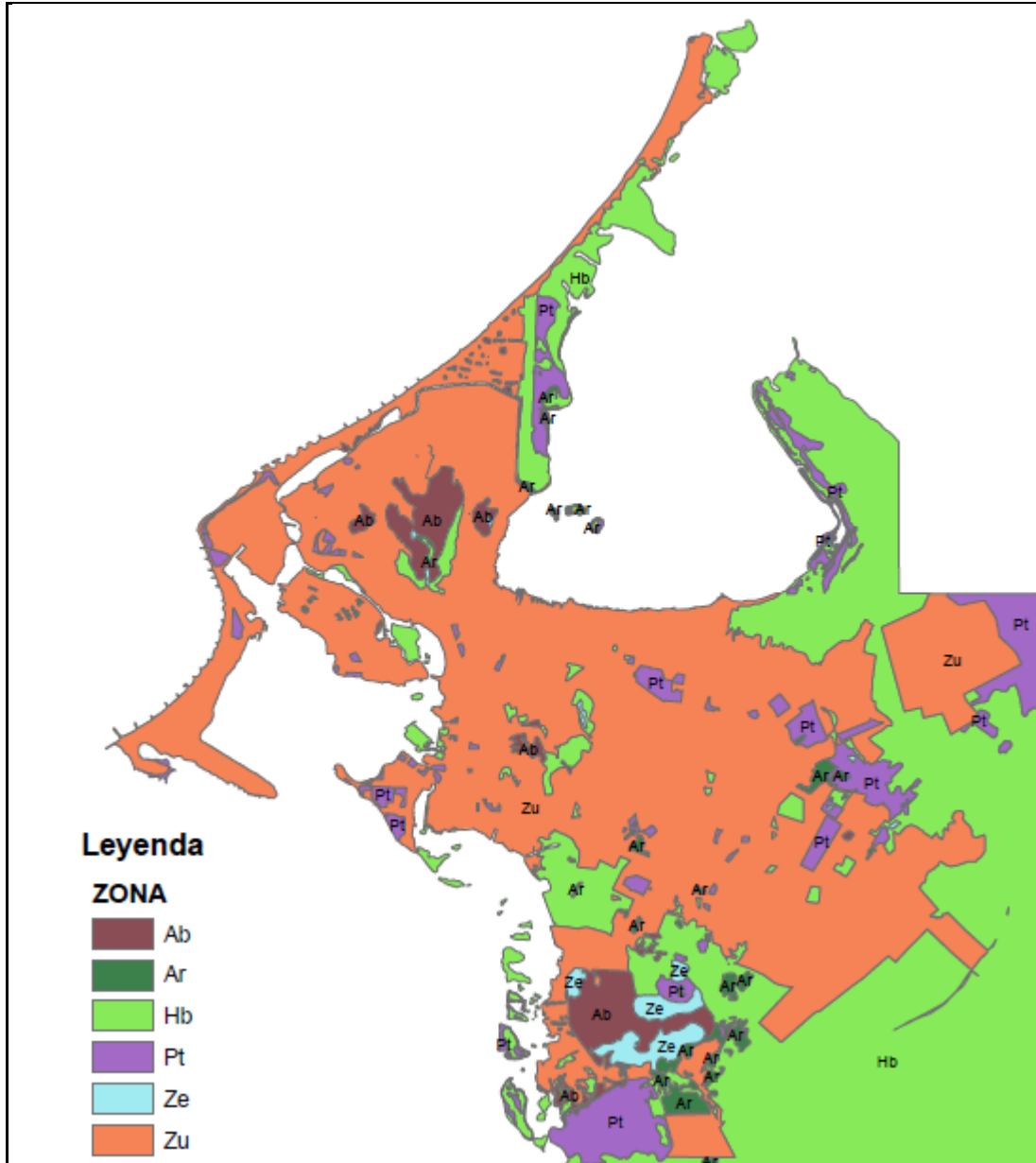


Figura 89. Mapa de Cobertura Vegetal de Cartagena

Fuente: Cartografía de Ingeominas (2001a) y editado por el autor (2015)

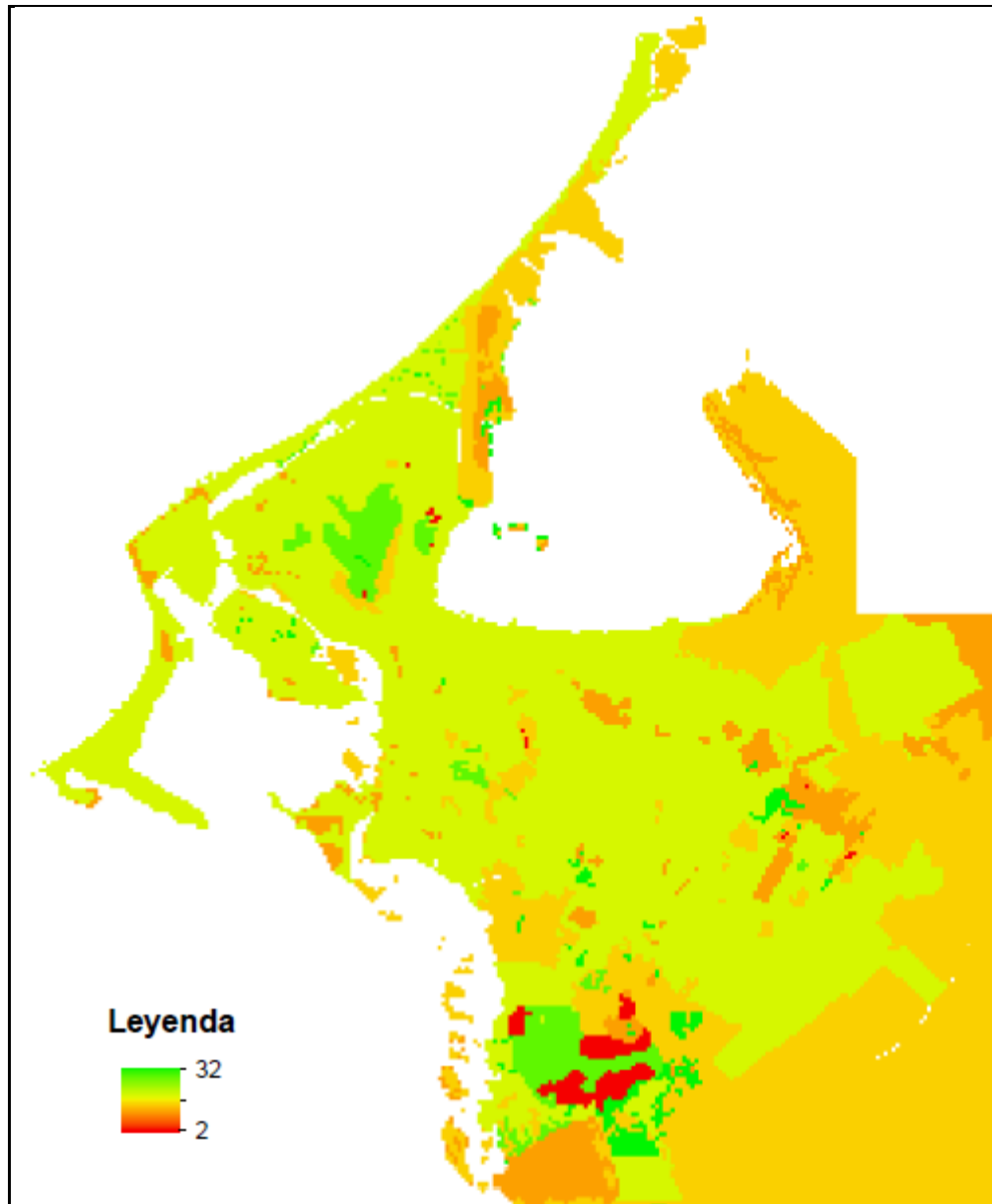


Figura 90. Mapa de calificación del Parámetro Vegetación (V)

Fuente: El autor (2015)

4.2. Calibración de Parámetros Detonantes

Los parámetros detonantes controlan la amenaza relativa a los procesos de remoción en masa de un área dada, en este caso del casco urbano de Cartagena y pueden detonar a través de un factor externo una respuesta traducida en un movimiento en masa, debido principalmente a los siguientes parámetros, los cuales son evaluados a continuación según lo planteado en la metodología SES. Es importante mencionar que la calibración de los parámetros detonantes se realizó con base en la información de los procesos actuales de la zona de estudio, los cuales se describen en el capítulo 5.



4.2.1. Parámetro Clima (C)

El parámetro Clima (C) se evaluó a través de la precipitación antecedente, la cual es un factor externo desencadenante de los movimientos en masa. Es importante destacar que la precipitación produce procesos de infiltración en el suelo que pueden crear condiciones críticas para la ladera o talud, pues al aumentar la humedad del suelo y la posición del nivel freático, se generan incrementos en las presiones de poros y disminución de los esfuerzos efectivos y la resistencia al esfuerzo de corte, lo cual puede conllevar a un estado de falla sobre parte de la ladera o talud.

A continuación se describe la metodología utilizada para el análisis de este parámetro.

Metodología Clima

Inicialmente se obtuvo la información hidrometeorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, entidad que se encarga de la recopilación de datos, procesamiento y en general del manejo de la misma. Esta información fue suministrada por la firma cartagenera de Ingeniería Hidroconsultores Ltda. Se obtuvieron registros disponibles de los valores totales mensuales de precipitación expresados en milímetros (mm) de 6 estaciones ubicadas dentro del área de estudio y en zonas vecinas (ver cuadro 29). Se aclara que la información obtenida no abarca en su totalidad a la ciudad de Cartagena, sin embargo por efectos académicos ha sido utilizada en el presente documento.

N°	Tipo	Código	Nombre	Latitud	Longitud	Municipio	Elevación msnm	Fecha de instalación
1	SP	14015020	Aeropuerto Rafael Núñez	10° 26' 50" N	75° 30' 58" W	Cartagena	2	15/03/1941
2	PM	14010030	Bayunca	10° 32' 00" N	75° 24' 11" W	Cartagena	75	15/05/1974
3	PM	14010050	Cañaveral	10° 24' 18" N	75° 20' 15" W	Turbaco	75	15/05/1974
4	CP	14015030	Escuela Naval CIOH	10° 23' 23" N	75° 32' 09" W	Cartagena	1	15/03/1947
5	CP	14015010	Galerazamba	10° 47' 42" N	75° 15' 42" W	Santa Catalina	20	15/12/1945
6	PM	29030370	Santa Ana	10° 14' 03" N	75° 33' 04" W	Cartagena	1	15/04/1974
Convenciones:								
SP:	Sinóptica principal			CP:	Climatológica principal			
PM:	Pluviométrica							

Cuadro 29. Estaciones hidrometeorológicas utilizadas

Fuente: El autor (2015)

Las estaciones hidrometeorológicas utilizadas para el presente análisis son (ver figura 91):

- Aeropuerto Rafael Núñez
- Bayunca
- Cañaveral
- Escuela Naval CIOH*
- Galerazamba
- Santa Ana

* CIOH: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe

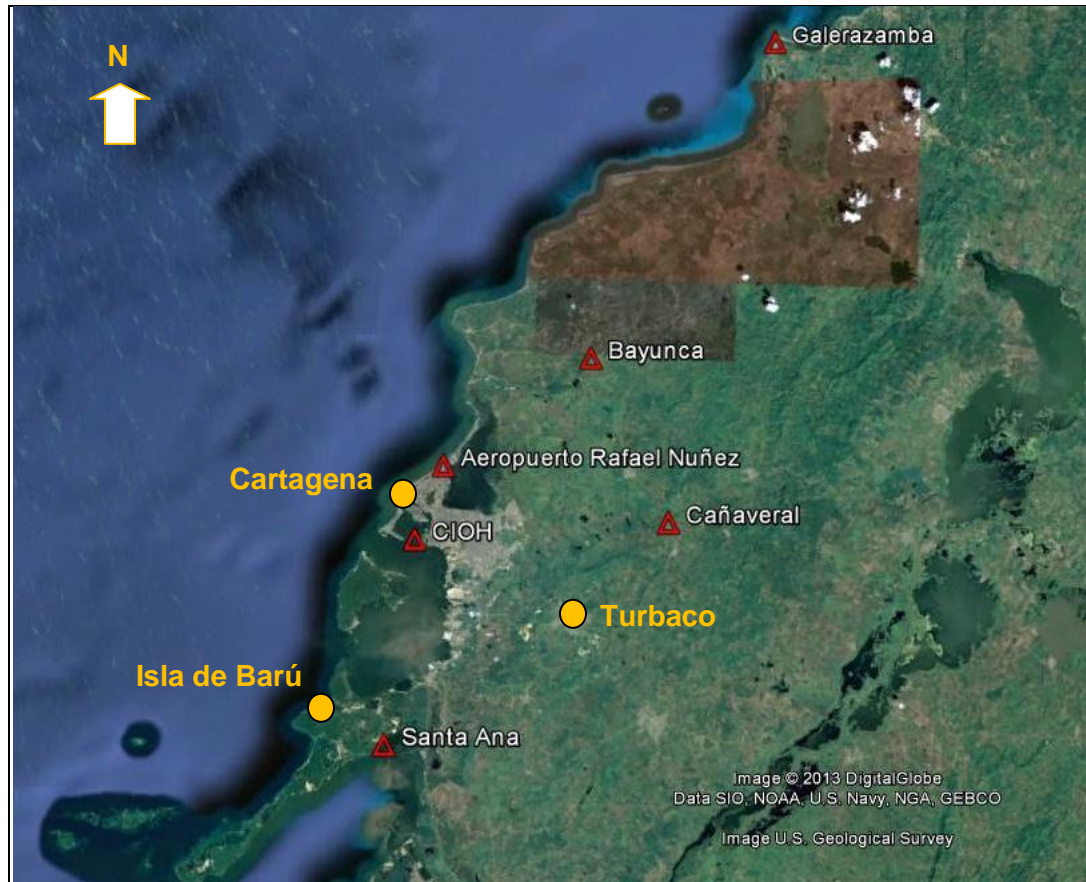


Figura 91. Localización geográfica de las estaciones hidrometeorológicas

Fuente: Tomado de Google Earth (2013) y modificado por el autor (2015)

Los registros de las estaciones tienen fechas de instalación diferentes como se aprecia en el cuadro 29. La estación del Aeropuerto Rafael Núñez es la más antigua y opera desde 1941; en esa misma década entraron en operación las estaciones de Galerazamba (1945) y de la Escuela Naval CIOH (1947). Las estaciones de Bayunca, Cañaveral y Santa Ana son más recientes y empezaron a funcionar en el año 1974.

Con el fin de lograr uniformidad en el período de tiempo en estudio, se descartaron los registros anteriores al año 1974 y se realizó el análisis de los datos hasta el año 2007 según información disponible, abarcando un lapso de 34 años.

Datos faltantes

En todas las estaciones utilizadas existen datos faltantes de precipitación en sus registros, lo cual es usual en este tipo de mediciones, en razón de la imposibilidad de realizar la medición (p.e. ausencia del aparato durante determinado tiempo) o por mediciones que no han sido consignadas en la planilla de registro de la estación respectiva (p.e. negligencia del operador). Según Monsalve (1995) en hidrología se trabaja con series continuas, por lo tanto se deben completar los datos faltantes.

En estos casos existen criterios para obtener el dato buscado conociendo los valores registrados en estaciones vecinas que tienen influencia sobre la zona de ubicación del dato faltante.



De acuerdo con UNNE (2007), el criterio general consiste en tomar un número de estaciones cercanas que posean datos confiables y comparar la precipitación media anual en cada una de las estaciones mencionadas (estaciones base), con la precipitación media anual de la estación incógnita. En ese caso, se pueden presentar dos situaciones:

- Si la precipitación media anual en la estación incógnita difiere en menos de un 10% con la precipitación media anual de cada una de las estaciones base, entonces el dato faltante se obtiene como el promedio aritmético de los datos registrados de las estaciones base, correspondientes al período que se está tratando.
- Si la precipitación media anual de la estación incógnita difiere en más de un 10% con la precipitación media anual de alguna de las estaciones base, para obtener el dato faltante se usa la siguiente ecuación:

$$h_{px} = \frac{1}{n} \left[\frac{P_x}{P_1} h_{p1} + \frac{P_x}{P_2} h_{p2} + \dots + \frac{P_x}{P_n} h_{pn} \right] \quad [4.1]$$

Donde (h_{px}) es la precipitación buscada en la estación incógnita, (n) es el número de estaciones con datos de registros continuos que están cercanas, ($h_{p1}, h_{p2} \dots h_{pn}$) son las precipitaciones conocidas en las estaciones base, ($P_1, P_2 \dots P_n$) son las precipitaciones medias anuales en las estaciones base y (P_x) es la precipitación media anual de la estación incógnita.

En el caso de estudio de Cartagena, la precipitación media anual de cualquiera de las estaciones seleccionadas circundantes difiere en más de 10% de la estación incógnita de turno, por ello se utilizó la ecuación [4.1] siguiendo la metodología.

□ Análisis de dobles masas

Una vez se completaron los datos faltantes en los registros de las estaciones, se realizó la verificación de la homogeneidad de la totalidad de los datos de cada estación utilizando el análisis de dobles masas. Según Monsalve (1995) con este análisis se busca comprobar si hubo alguna anomalía en la estación durante algún período, tal como el cambio de lugar de dicha estación, cambio de las condiciones del aparato registrador o modificaciones en su método de construcción.

De acuerdo con Monsalve (1995), el método consiste en construir una curva doble acumulativa, en la cual se relacionan los valores totales anuales acumulados de precipitación de un determinado lugar y la media acumulada de los valores totales anuales de todos los puestos de la región (ver figura 92), considerada climatológicamente homogénea y por consiguiente homogénea desde el punto de vista de datos.

Para UNNE (2007) los valores de precipitación que ocurren en diferentes lugares de esta zona homogénea en períodos anuales o estacionales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente.

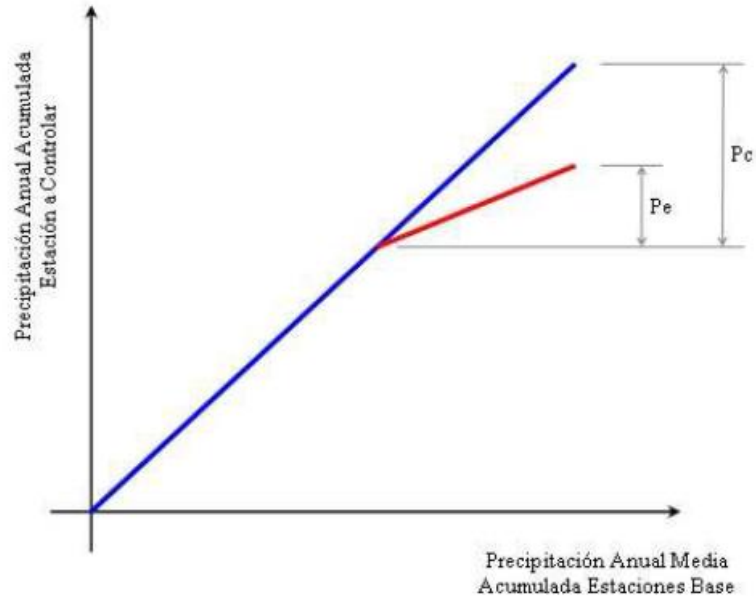
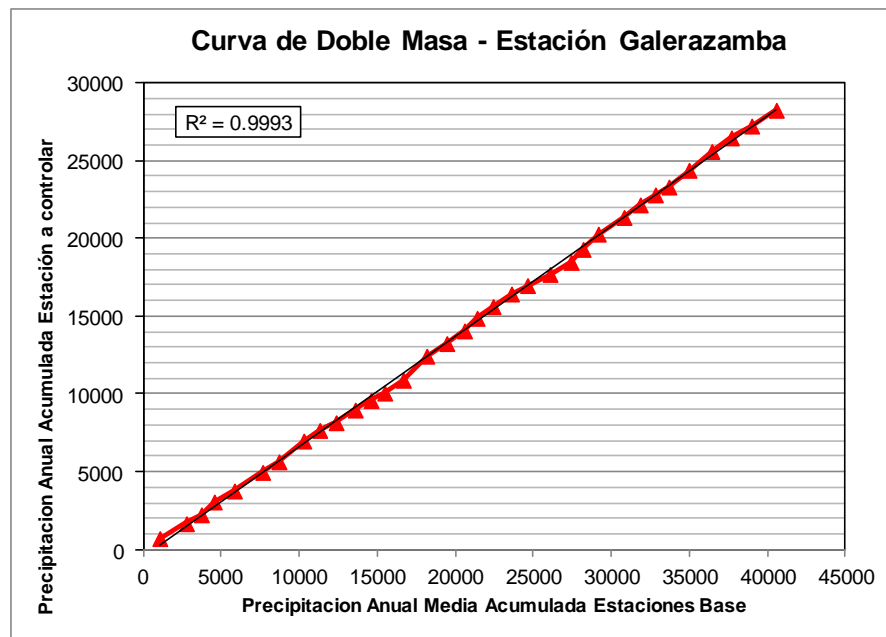


Figura 92. Verificación de homogeneidad de datos por análisis de dobles masas

Fuente: Tomado de UNNE (2007)

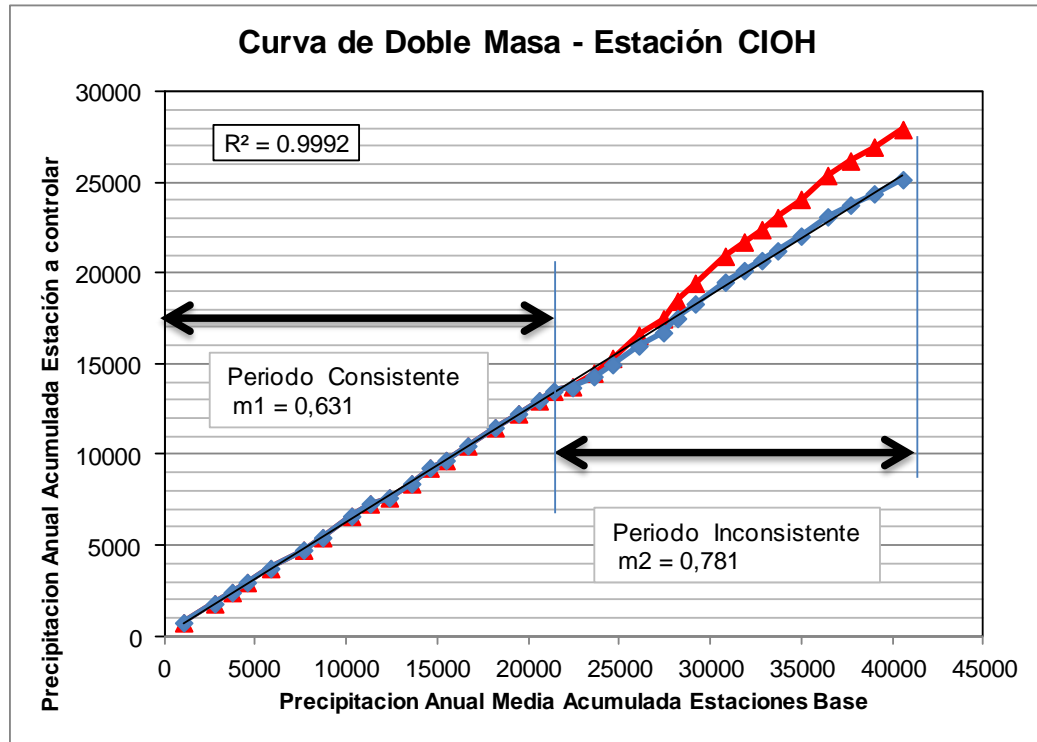
Se encontró que las estaciones Galerazamba, CIOH y Santa Ana presentan el mayor número de datos faltantes, por lo tanto se consideran las "estaciones a controlar" y a ellas se les realizó análisis de dobles masas para verificar la homogeneidad de sus datos. Las estaciones Bayunca, Cañaveral y Aeropuerto Rafael Núñez se consideraron las estaciones confiables o base.

A continuación en las gráficas 1, 2 y 3 se muestran las curvas de doble masa obtenidas y sus respectivos coeficientes de correlación (R^2).

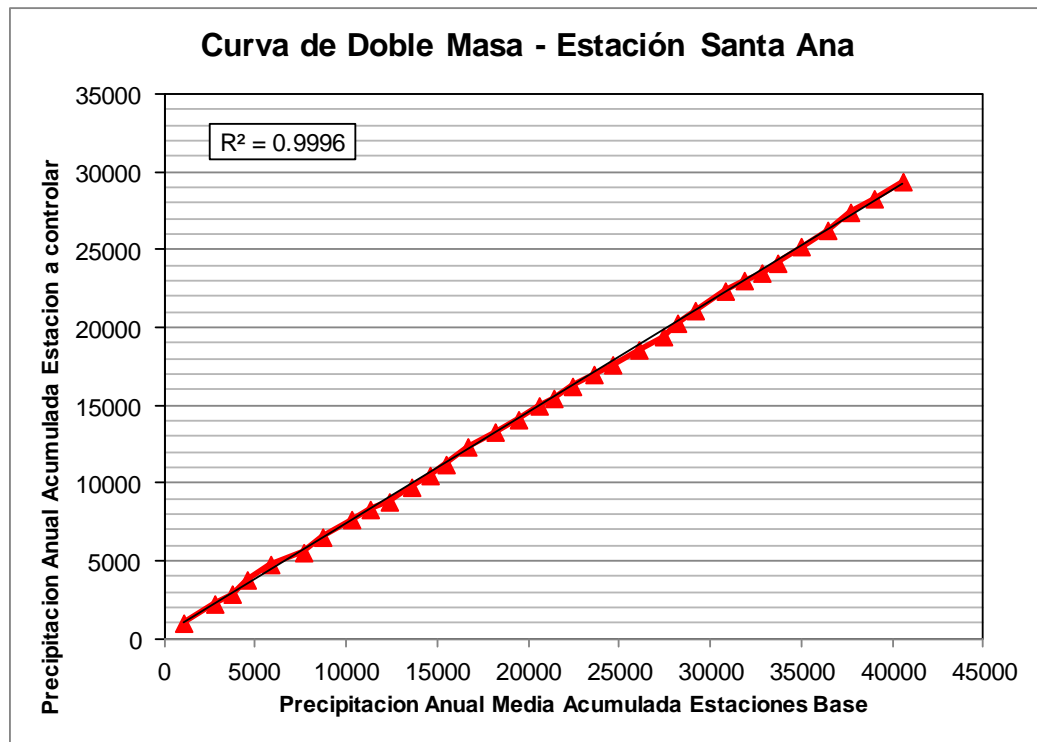


Gráfica 1. Curva de doble masa de la Estación Galerazamba

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 2. Curva de doble masa de la Estación CIOH
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 3. Curva de doble masa de la Estación Santa Ana
Fuente: El autor (2015)



En la curva de la estación CIOH (ver gráfica 2), se encontraron datos inconsistentes, que fue necesario ajustar mediante factor de corrección de 0.808 obtenido de la relación de las pendientes del período consistente (m_1) e inconsistente (m_2). En cuanto a las curvas de la estación Galerazamba y Santa Ana (ver gráficas 1 y 3) presentan un alto nivel de correlación del orden 0.999 y por ende los datos se consideran consistentes.

Al realizar la verificación o consistencia de los datos hidrometeorológicos quedaron definidos los valores totales mensuales de precipitación ya revisados de cada estación y por consiguiente la precipitación media anual (P anual), para realizar el posterior cálculo del período de retorno a partir de los valores de precipitación acumulada para una duración específica. En el cuadro 30 se muestran los datos de precipitación obtenidos.

N°	Nombre estación	Latitud	Longitud	Elevación msnm	P anual mm
1	Aeropuerto Rafael Núñez	10° 26' 50" N	75° 30' 58" W	2	1034
2	Bayunca	10° 32' 00" N	75° 24' 11" W	75	1325
3	Cañaveral	10° 24' 18" N	75° 20' 15" W	75	1221
4	Escuela Naval CIOH	10° 23' 23" N	75° 32' 09" W	1	740
5	Galerazamba	10° 47' 42" N	75° 15' 42" W	20	831
6	Santa Ana	10° 14' 03" N	75° 33' 04" W	1	865

Cuadro 30. Precipitación media anual obtenida de cada estación

Fuente: El autor (2015)

□ **Calculo de período de retorno**

Se analizaron las duraciones correspondientes a 30, 60 y 90 días haciéndolas equivalentes a 1, 2 y 3 meses respectivamente, teniendo en cuenta que los registros históricos disponibles de precipitación corresponden a valores totales mensuales. Se calcularon los valores de precipitación acumulada en cada estación para las duraciones especificadas y se seleccionaron los valores máximos de precipitación para cada año, los cuales se agruparon en series continuas por estación.

Estos valores máximos de precipitación anual se ajustaron mediante análisis estadístico, utilizando la ley de distribución de probabilidades de Gumbel o de valores extremos, dado que se ha demostrado al usarla, una adecuada capacidad de ajuste, especialmente sobre series continuas de valores de precipitación en distintos períodos de tiempo.

Distribución de Gumbel: De acuerdo con Monsalve (1995) se trata de una función de probabilidades usualmente utilizada para valores máximos aleatorios sacados de poblaciones de datos suficientemente grandes. La ley de distribución establece que la probabilidad (P) de que un evento tenga una magnitud menor o igual que un cierto valor (x_i), es:

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^{-y_i}} \quad [4.2]$$

Según Monsalve (1995), (e) es la base de los logaritmos neperianos, (y_i) es la variable reducida, tal que:

$$y_i = a(x_i - x_f) \quad [4.3]$$

De la ecuación anterior, se tiene que:



$$a = \frac{S_n}{S} \quad [4.4]$$

$$x_f = \bar{X} - S \frac{Y_n}{S_n} \quad [4.5]$$

Donde (\bar{X}) es el promedio de los datos de la muestra, (S) es la desviación estándar de los datos de la muestra, (x_i) son los datos de la muestra, desde i igual a 1 hasta n , (Y_n) y (S_n) dependen del número de años de registros de la muestra n , y son respectivamente la media y desviación estándar de la variable reducida (y_i).

Según Monsalve (1995), la función de probabilidades teórica de Gumbel posee un coeficiente de oblicuidad (C_s) dado por la siguiente expresión:

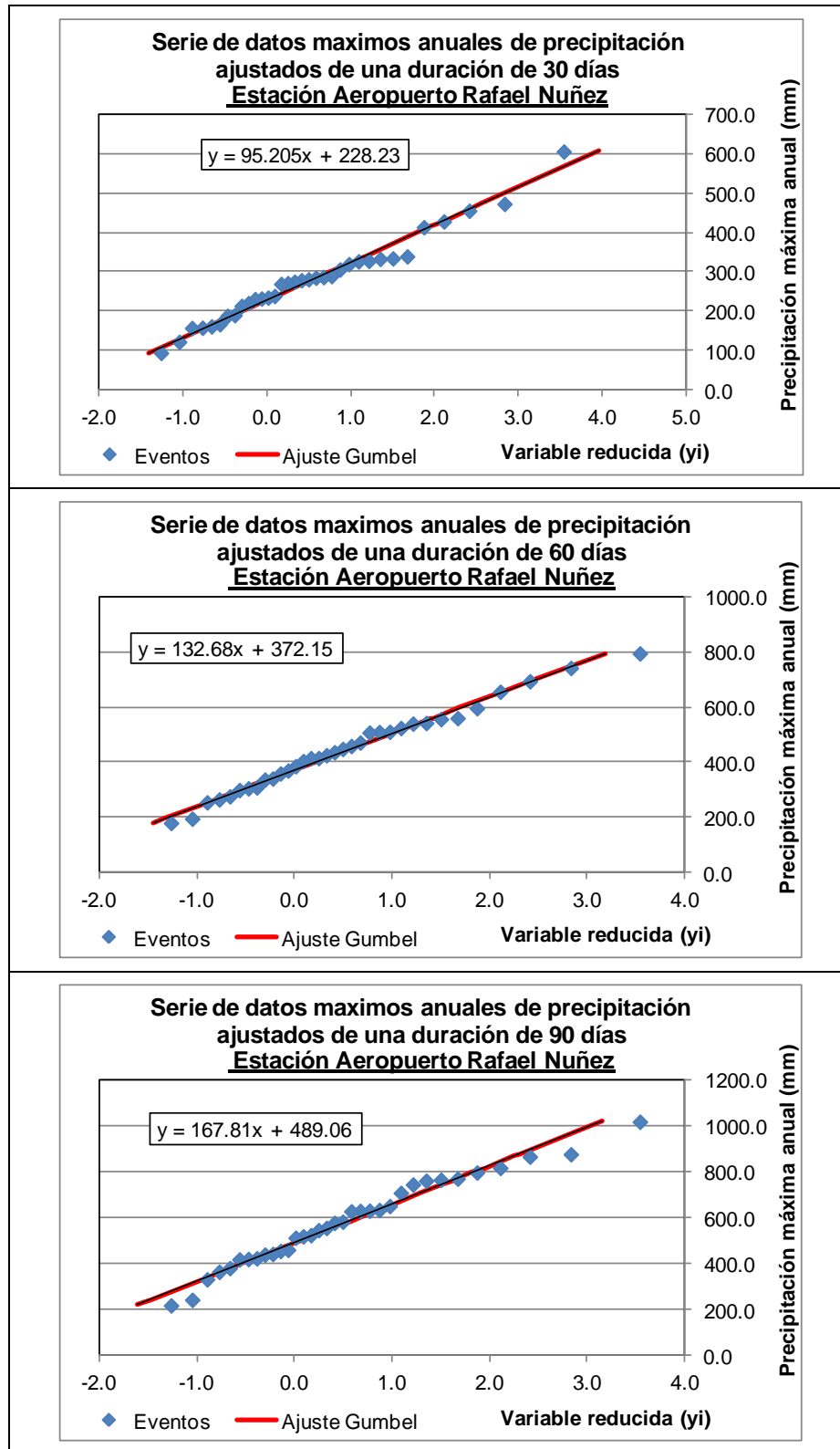
$$C_s = \frac{a_1}{S^3} \quad [4.6]$$

Donde (a_1) se expresa de la siguiente forma:

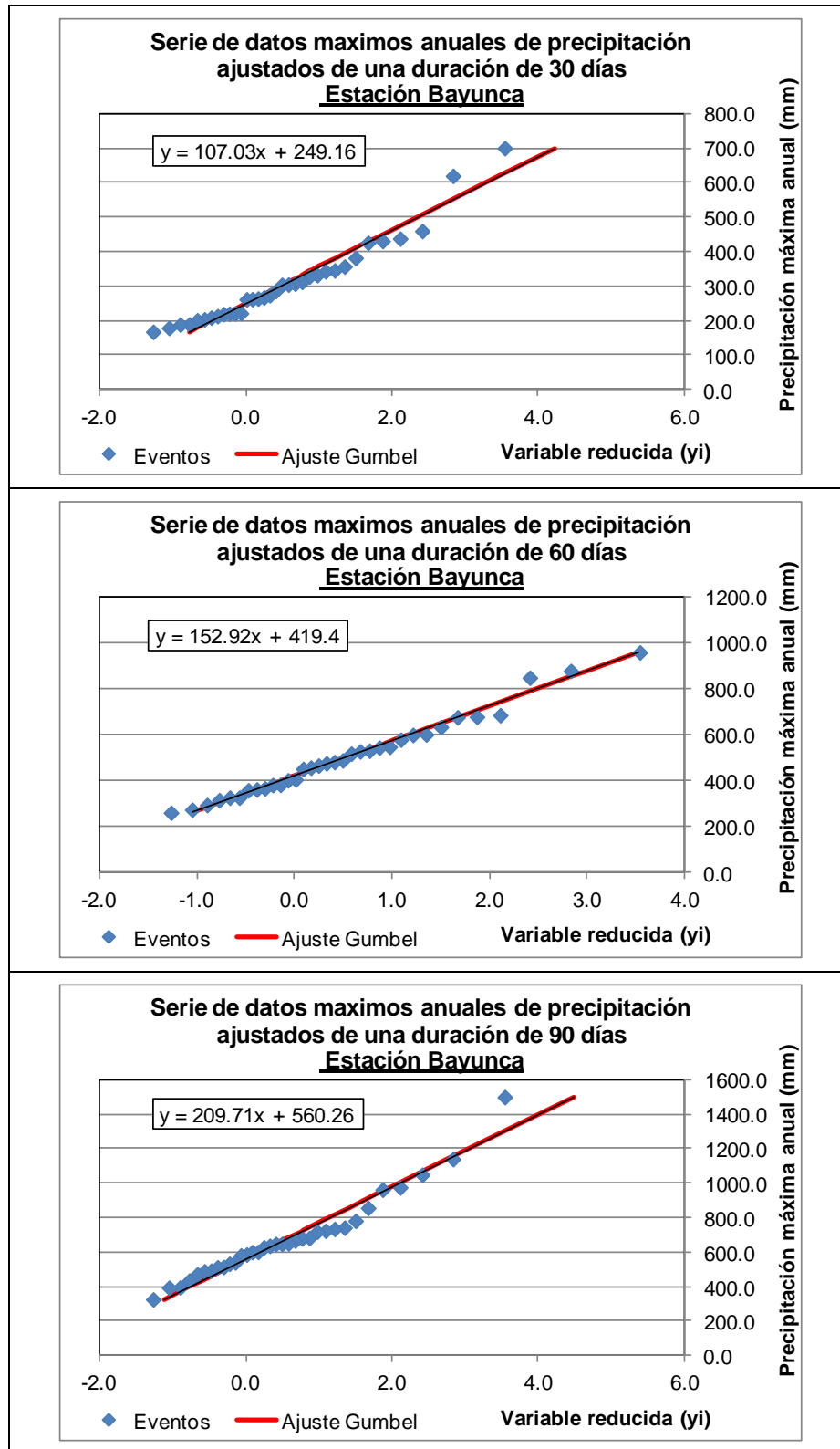
$$a_1 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3 \quad [4.7]$$

Para el ajuste de la serie de datos observados (función de frecuencia acumulada) a partir de la ley de Gumbel, se utilizó el método de mínimos cuadrados.

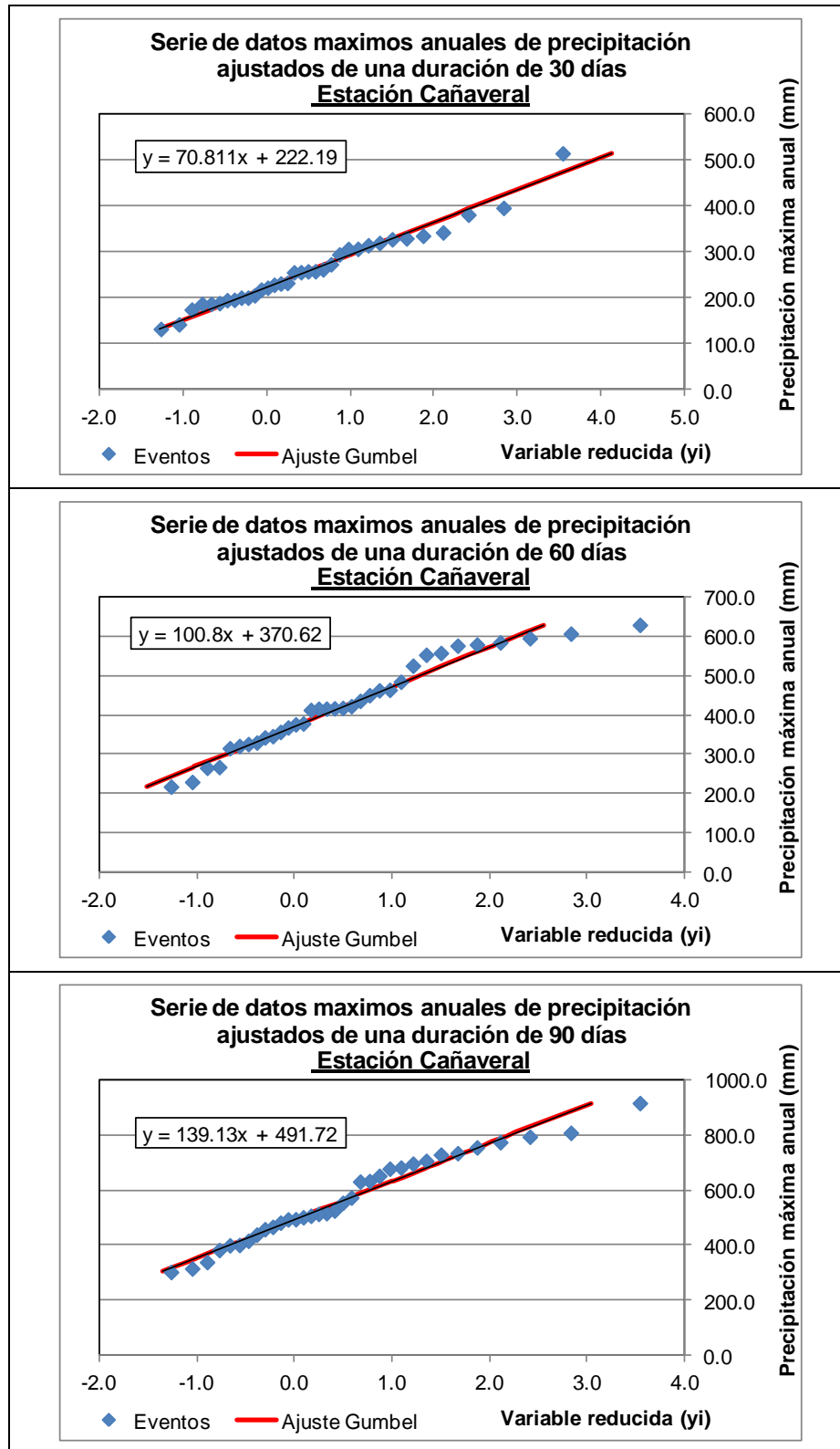
A continuación se presentan las graficas del ajuste realizado por la ley de Gumbel y las ecuaciones lineales obtenidas para cada estación evaluada (ver gráficas 4, 5, 6, 7, 8 y 9).



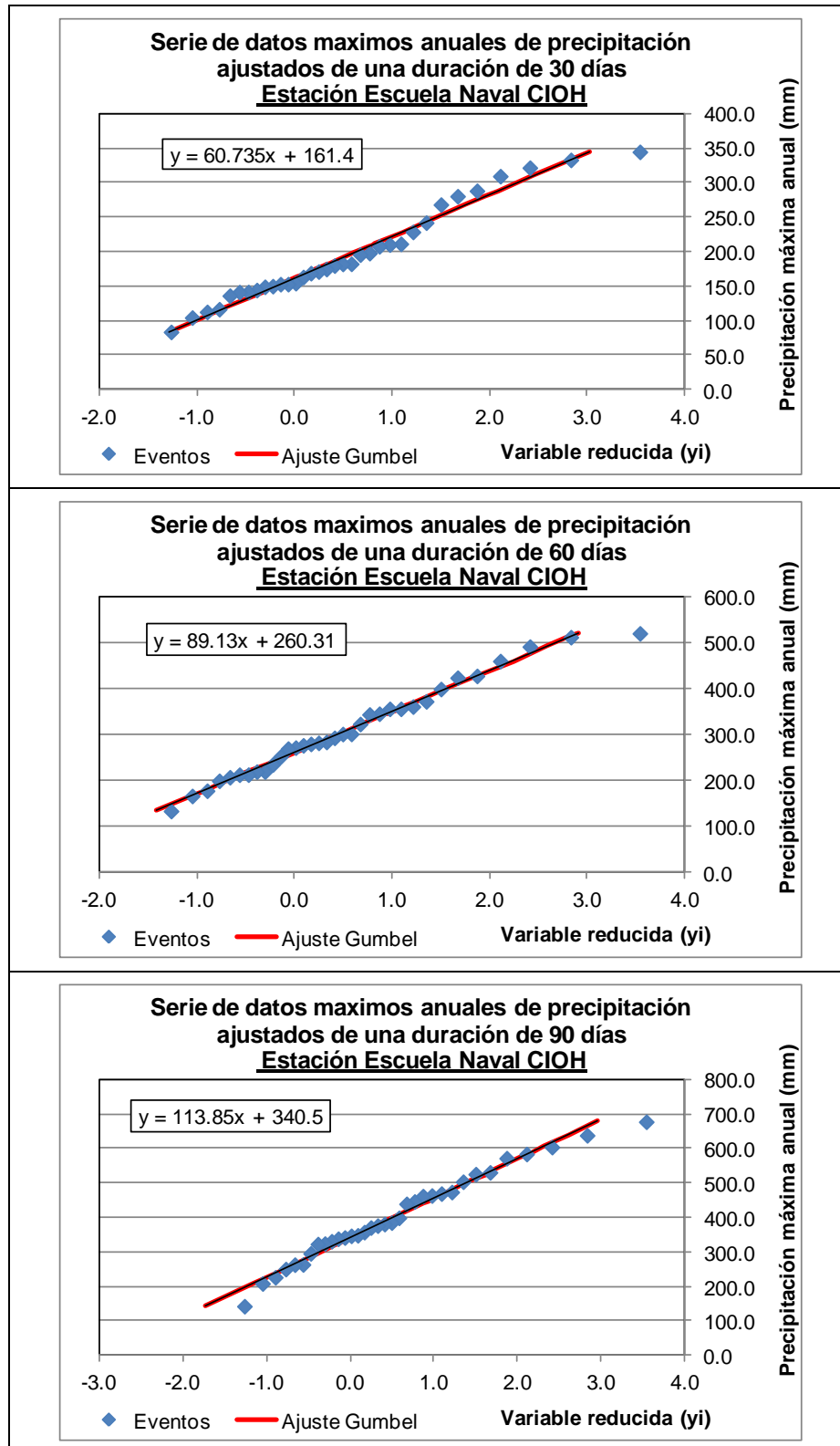
Gráfica 4. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación A. Rafael Nuñez
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 5. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Bayunca
Fuente: El autor (2015)

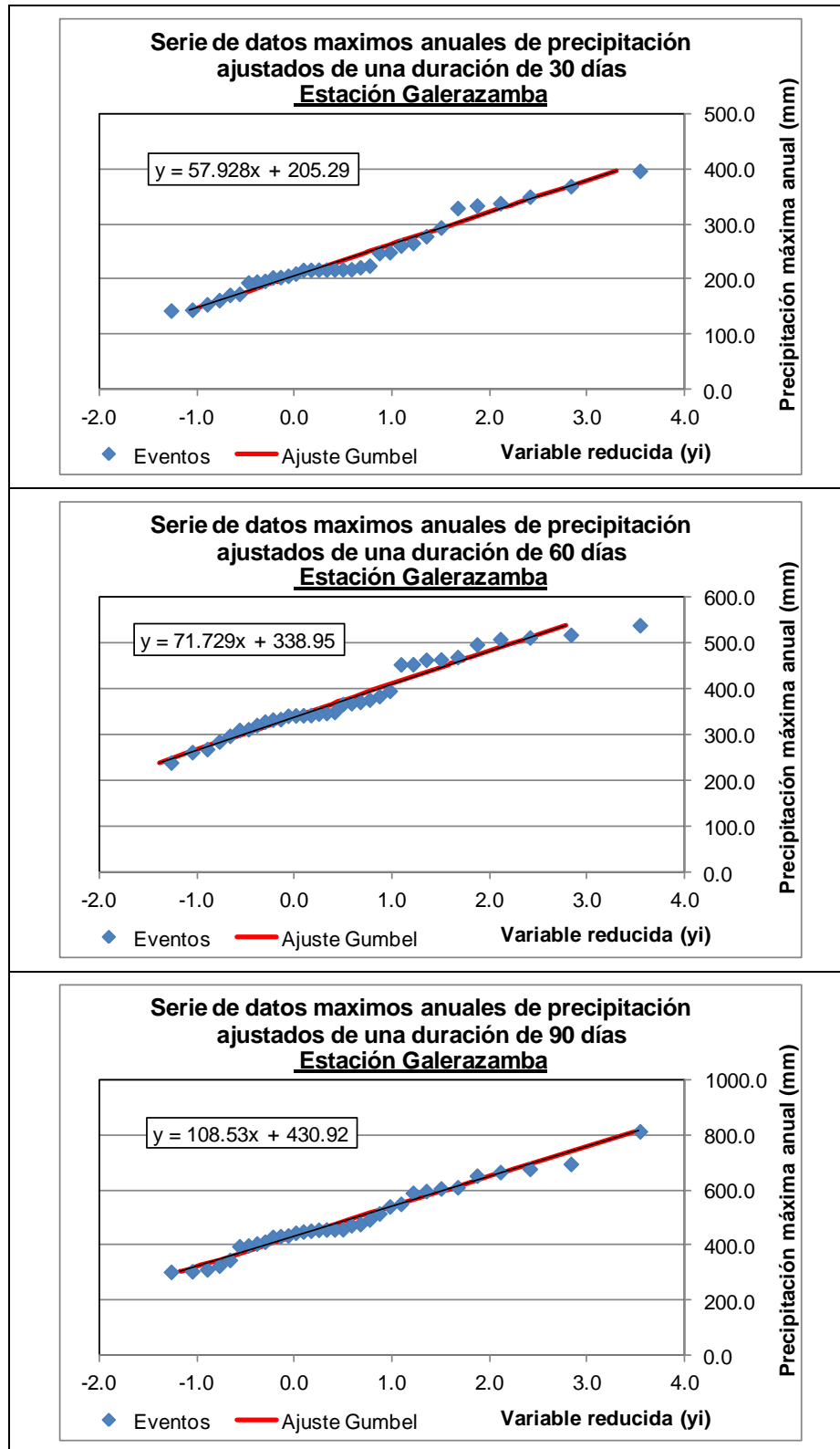


Gráfica 6. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Cañaveral
Fuente: El autor (2015)



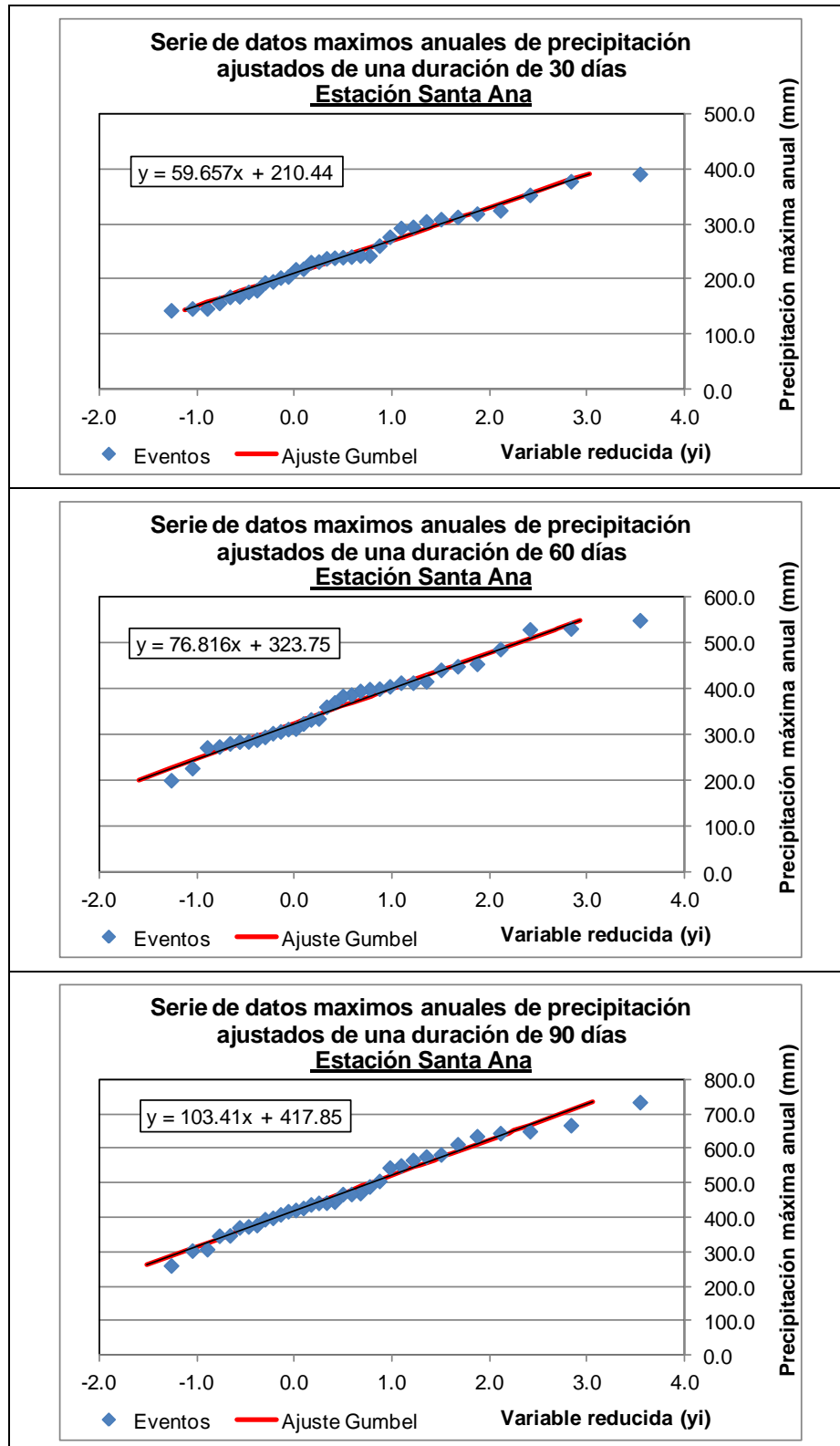
Gráfica 7. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación CIOH

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 8. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Galerazamba

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 9. Ajuste Gumbel de los datos de precipitación de la estación Santa Ana
Fuente: El autor (2015)



En el cuadro 31 se muestra el resumen de las ecuaciones lineales obtenidas del ajuste Gumbel, las cuales presentan un buen nivel de correlación. Estas ecuaciones poseen la forma general de la ecuación [4.3].

Estación	Duración		
	30 días (1 mes)	60 días (2 mes)	90 días (3 mes)
Aeropuerto Rafael Núñez	$y = 95.20x + 228.23$	$y = 132.68x + 372.15$	$y = 167.81x + 489.06$
Bayunca	$y = 107.03x + 249.16$	$y = 152.92x + 419.4$	$y = 209.71x + 560.26$
Cañaveral	$y = 70.81x + 222.19$	$y = 100.8x + 370.62$	$y = 139.13x + 491.72$
Escuela Naval CIOH	$y = 60.735x + 161.4$	$y = 89.13x + 260.31$	$y = 113.85x + 340.5$
Galerazamba	$y = 57.928x + 205.29$	$y = 71.729x + 338.95$	$y = 108.53x + 430.92$
Santa Ana	$y = 59.657x + 210.44$	$y = 76.816x + 323.75$	$y = 103.41x + 417.85$

Cuadro 31. Ecuaciones lineales obtenidas del ajuste Gumbel

Nota: En cada ecuación obtenida, la precipitación acumulada mensual máxima en un año se representa en la variable (x) y la variable reducida yi en (y).

Fuente: El autor (2015)

Las precipitaciones acumuladas mensuales máximas en un año se calcularon para periodos de retorno dados y las duraciones propuestas a 30, 60 y 90 días, usando las ecuaciones obtenidas a partir del ajuste Gumbel (ver cuadros 32, 33, 34, 35, 36 y 37). Una vez calculadas, se generaron las curvas de precipitación máxima acumulada (mm) vs duración (días) para periodos de retorno de 2.33, 3, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, las cuales se presentan más adelante.

Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	283.3	314.2	371.0	442.5	511.0	599.7	666.2	732.4
60	448.9	491.9	571.2	670.7	766.2	889.9	982.5	1074.8
90	586.1	640.5	740.8	866.7	987.5	1143.8	1261.0	1377.7
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 32. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Aeropuerto Rafael Núñez

Fuente: El autor (2015)

Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	311.1	345.8	409.7	490.0	567.1	666.8	741.5	816.0
60	507.9	557.4	648.8	763.5	873.6	1016.1	1122.8	1229.2
90	681.6	749.6	874.8	1032.2	1183.1	1378.5	1525.0	1670.9
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 33. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Bayunca

Fuente: El autor (2015)



Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	263.2	286.1	328.4	381.5	432.5	498.5	547.9	597.2
60	428.9	461.6	521.8	597.5	670.0	763.9	834.3	904.4
90	572.2	617.3	700.4	804.8	905.0	1034.6	1131.7	1228.5
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 34. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Cañaveral

Fuente: El autor (2015)

Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	196.5	216.2	252.5	298.1	341.8	398.4	440.8	483.0
60	311.9	340.8	394.0	460.9	525.0	608.1	670.3	732.3
90	406.4	443.3	511.3	596.7	678.7	784.7	864.2	943.4
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 35. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación CIOH

Fuente: El autor (2015)

Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	238.8	257.6	292.2	335.7	377.3	431.3	471.8	512.1
60	380.4	403.7	446.5	500.4	552.0	618.8	668.9	718.8
90	493.7	528.9	593.7	675.2	753.3	854.4	930.2	1005.7
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 36. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Galerazamba

Fuente: El autor (2015)

Precipitación acumulada mensual máxima en un año (mm)								
Duraciones (días)	Periodo de retorno en años (Tr)							
	2.33	3	5	10	20	50	100	200
30	245.0	264.3	299.9	344.7	387.6	443.2	484.9	526.4
60	368.2	393.1	439.0	496.6	551.9	623.5	677.1	730.5
90	477.7	511.2	573.0	650.6	725.0	821.4	893.6	965.5
P(x ≤ xi)	0.571	0.667	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995
(yi)	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.9	4.6	5.3

Cuadro 37. Precipitación acumulada mensual máxima en un año - Estación Santa Ana

Fuente: El autor (2015)



Se aclara que la probabilidad (P) obtenida se expresa en función del período de retorno $P(x \leq x_i) = 1 - 1/T$ y la variable reducida (y_i) en función de dicha probabilidad $y_i = -\ln\{-\ln[P(x \leq x_i)]\}$ según lo planteado por Monsalve (1995).

La relación lluvia-deslizamiento se incluye en el presente análisis, utilizando las ecuaciones propuestas por Castellanos (1996), a partir de correlaciones totalmente empíricas. Se determinaron la lluvia crítica y su duración. La relación entre la lluvia crítica y las condiciones medias de la precipitación media anual es expresada por Castellanos (1996) así:

$$Ll_{crit} = 51.42 + P_{anual} \times 0.4035 \quad [4.8]$$

Donde (Ll_{crit}) es la lluvia crítica en milímetros y (P_{anual}) es la precipitación media anual en milímetros. La relación entre duración y lluvia acumulada es:

$$D_{crit} = 3.2829 \times (Ll_{crit})^{0.4035} \quad [4.9]$$

Donde (D_{crit}) es la duración crítica en días.

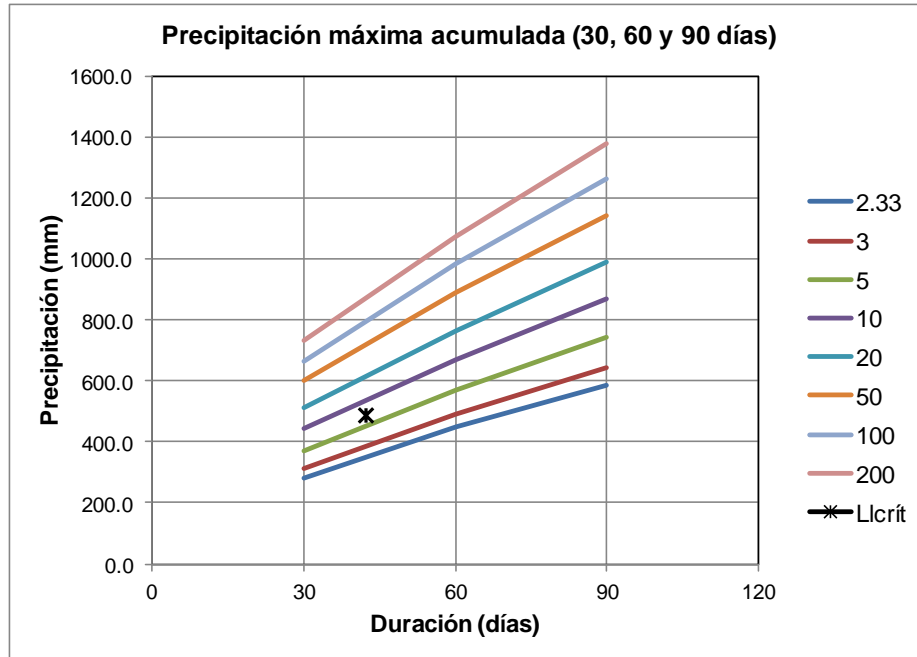
Se determinaron la lluvia crítica y su duración según lo planteado por Castellanos (1996) para cada estación (ver cuadro 38) y estos datos también se graficaron en cada una de las curvas de precipitación máxima acumulada (mm) vs duración (días) generadas para determinar posteriormente el período de retorno de la lluvia crítica (Tr_{crit}).

N°	Nombre Estación	P _{anual} (mm)	Ll _{crit} (mm)	D _{crit} (días)
1	Aeropuerto Rafael Nuñez	1034	469	42
2	Bayunca	1325	586	46
3	Cañaveral	1221	544	45
4	Escuela Naval CIOH	740	350	37
5	Galerazamba	831	387	39
6	Santa Ana	865	400	40

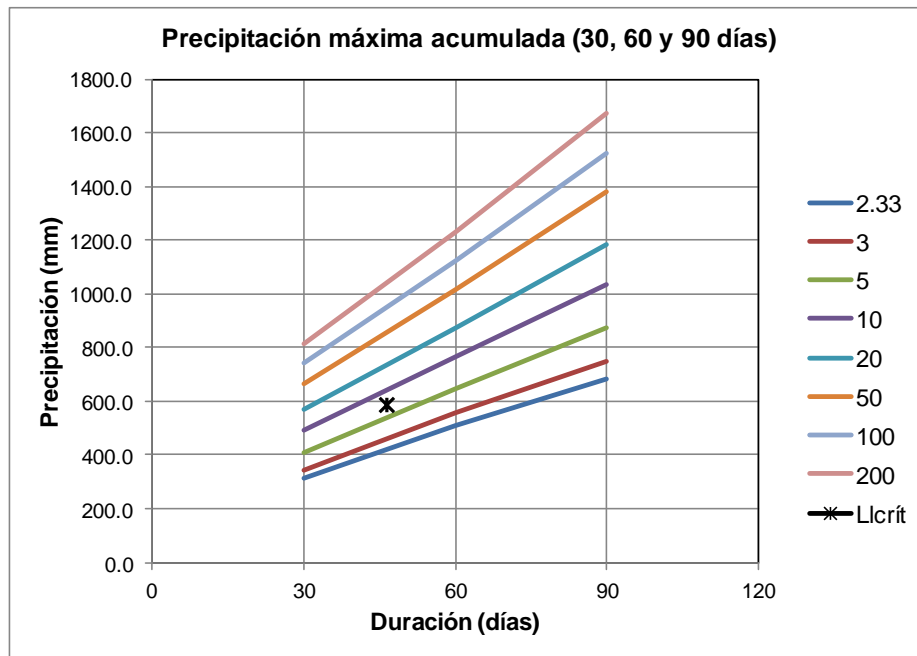
Cuadro 38. Magnitud de la lluvia y duración crítica de las estaciones hidrometeorológicas

Fuente: El autor (2015)

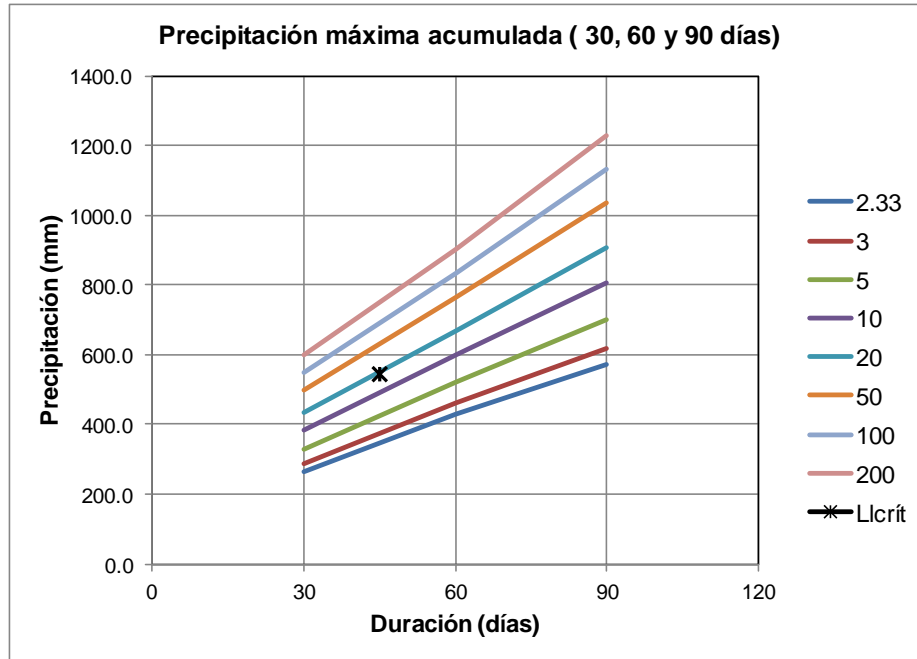
A continuación se muestran las gráficas 10, 11, 12, 13, 14 y 15 de las curvas de precipitación máxima acumulada que se generaron para cada estación.



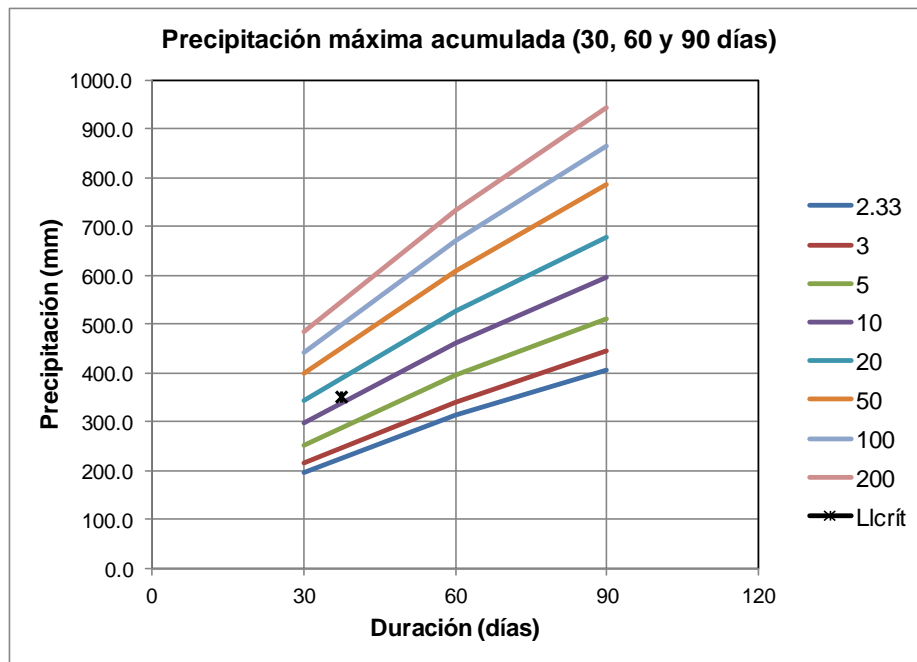
Gráfica 10. Precipitación máxima acumulada - Estación Aeropuerto Rafael Núñez
Fuente: El autor (2015)



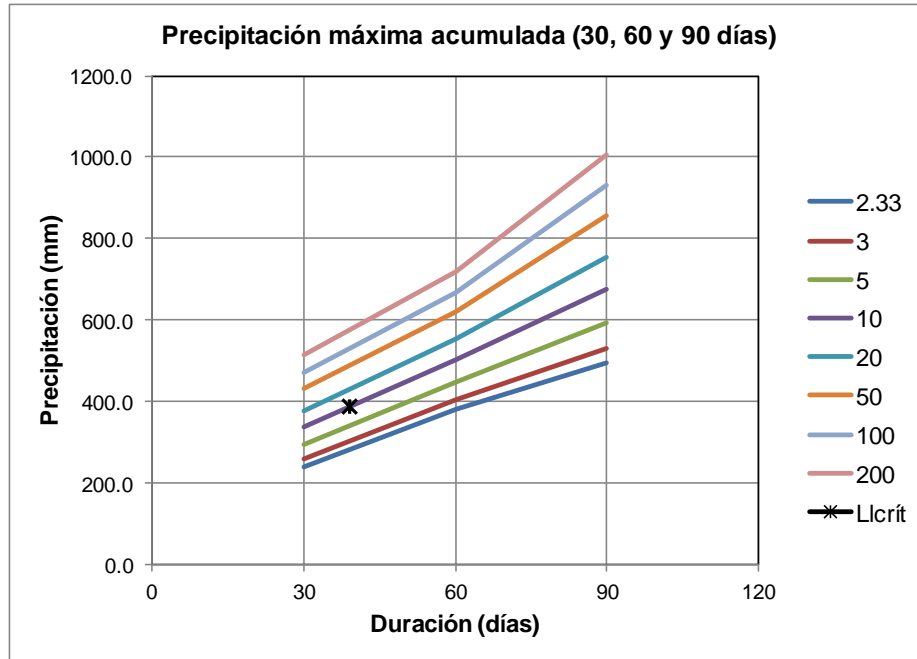
Gráfica 11. Precipitación máxima acumulada - Estación Bayunca
Fuente: El autor (2015)



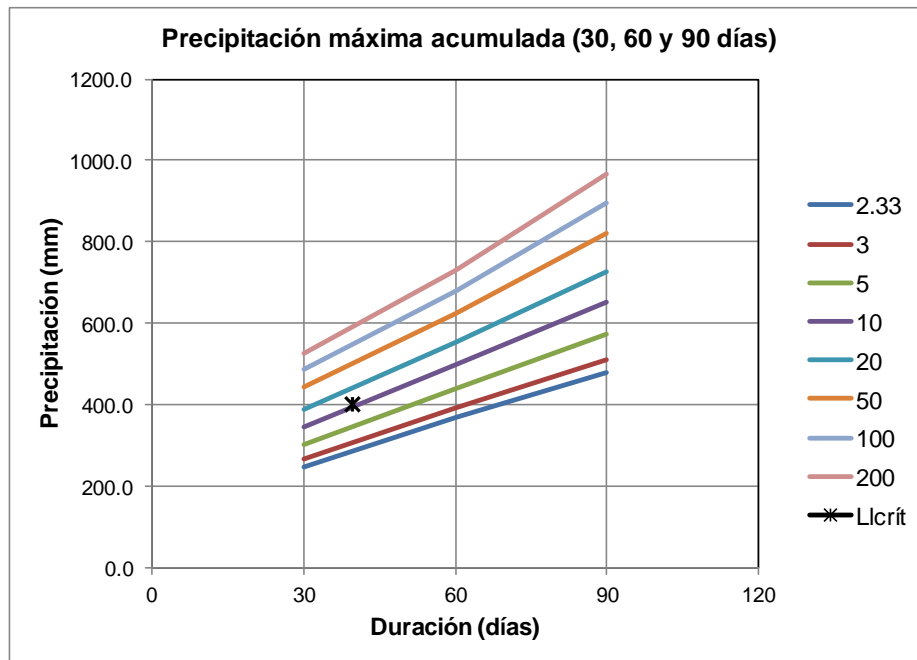
Gráfica 12. Precipitación máxima acumulada - Estación Cañaveral
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 13. Precipitación máxima acumulada - Estación CIOH
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 14. Precipitación máxima acumulada - Estación Galerazamba
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 15. Precipitación máxima acumulada - Estación Santa Ana
Fuente: El autor (2015)



Los períodos de retorno de la lluvia crítica (Tr_{crit}) determinados para cada estación son los relacionados a continuación en el cuadro 39.

N°	Nombre Estación	Tr_{crit} (años)
1	Aeropuerto Rafael Nuñez	7
2	Bayunca	7
3	Cañaveral	19
4	Escuela Naval CIOH	11
5	Galerazamba	10
6	Santa Ana	10

Cuadro 39. Períodos de retorno de la lluvia crítica de cada estación

Fuente: El autor (2015)

Con el propósito de definir algunos puntos adicionales en el área de estudio y utilizando información obtenida de las todas las estaciones, se realizaron correlaciones lineales entre la precipitación media anual y la elevación y entre la precipitación media anual y el período de retorno, con el objeto de poder asignar una lluvia crítica y su duración a cinco (5) puntos adicionales, para posteriormente determinar un mapa de isoperíodos de retorno del área de estudio.

Los puntos adicionales que se definieron dentro del área de estudio son:

N°	Nombre estación	Latitud	Longitud	Elevación msnm
1	P. Tierra Bomba	10° 21' 21.18" N	75° 34' 21.00" W	42
2	P. Cerro La Popa	10° 25' 06.34" N	75° 31' 37.13" W	60
3	P. Cerro Albornoz	10° 21' 34.51" N	75° 30' 01.18" W	45
4	P. Lomas del Marión	10° 23' 48.74" N	75° 30' 27.08" W	47
5	P. Villas de la Candelaria	10° 24' 16.38" N	75° 27' 35.97" W	6

Estos puntos adicionales se definieron distribuidos espacialmente dentro del casco urbano de la ciudad de Cartagena y de preferencia en puntos elevados (ver figura 93), pues actualmente hay pocas estaciones funcionando en esta zona (p.e. Aeropuerto Rafael Núñez y Escuela Naval CIOH).

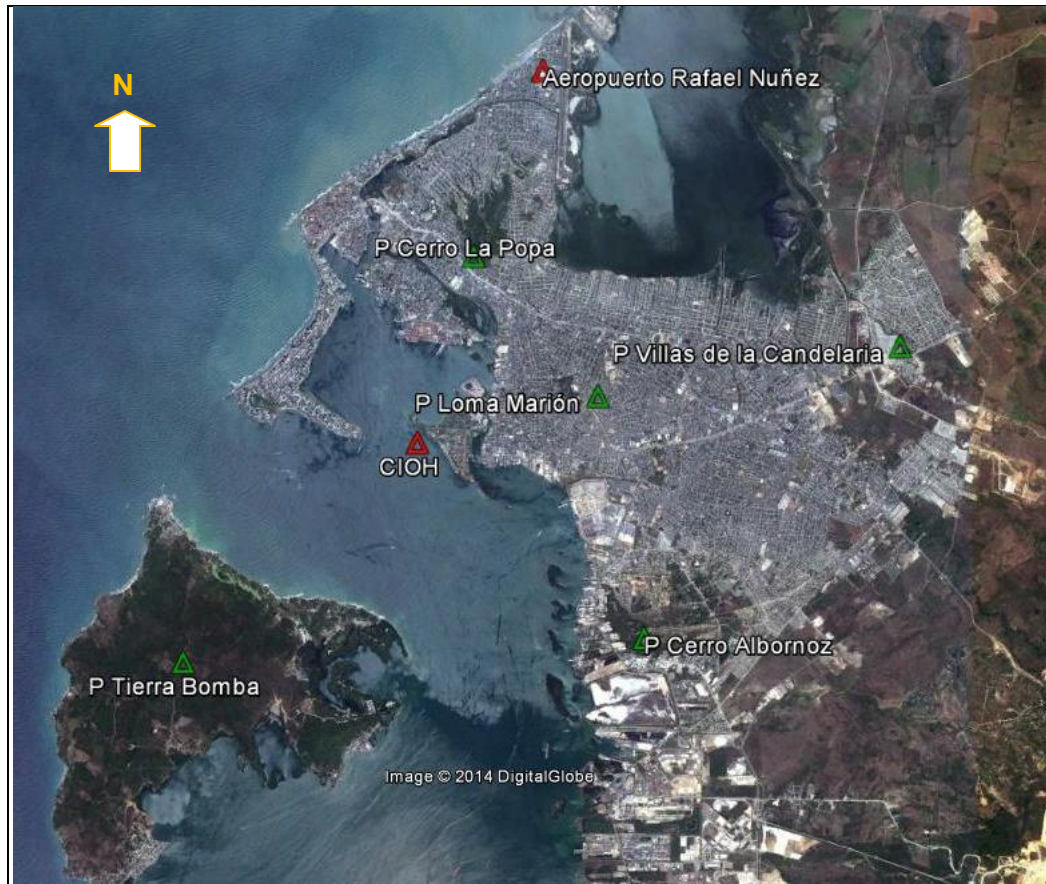


Figura 93. Localización geográfica de los puntos sintéticos

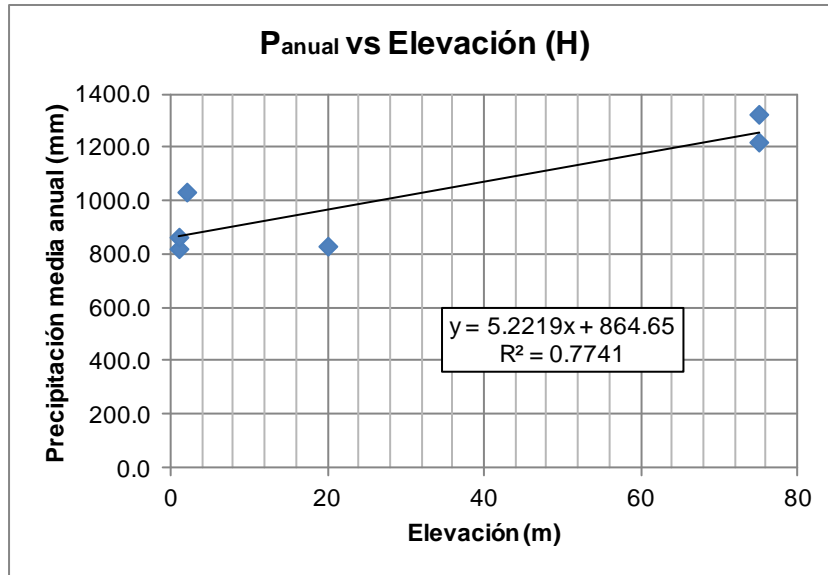
Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y modificado por el autor (2015)

Las correlaciones lineales efectuadas utilizan los parámetros del cuadro 40 y los resultados se muestran en las gráficas 16 y 17.

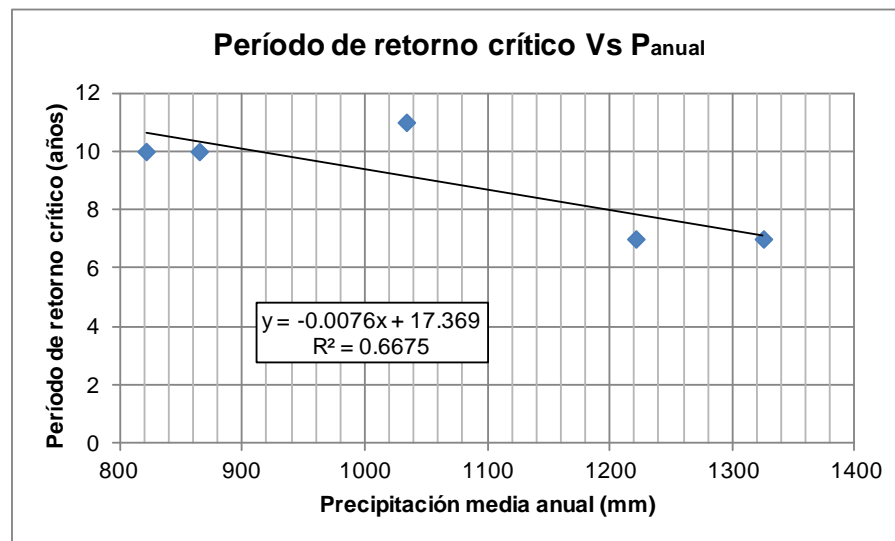
Nombre Estación	Elevación (msnm)	P _{anual} (mm)	Tr _{crit} (años)
Aeropuerto Rafael Nuñez	2	1034	7
Bayunca	75	1325	7
Cañaveral	75	1221	19
Escuela Naval CIOH	1	740	11
Galerazamba	20	831	10
Santa Ana	1	865	10

Cuadro 40. Elevación, precipitación anual y período de retorno de las estaciones

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 16. Precipitación media anual vs Elevación
Fuente: El autor (2015)



Gráfica 17. Período de retorno crítico vs Precipitación media anual
Fuente: El autor (2015)

De las correlaciones planteadas se obtuvieron las siguientes ecuaciones lineales:

$$P_{anual} = 5,2219 (H) + 864,65 \quad , \quad R^2 = 0,7741 \quad [4.10]$$

$$Tr_{crit} = -0,0076 (P_{anual}) + 17,369 \quad , \quad R^2 = 0,6675 \quad [4.11]$$

A partir de estas ecuaciones se determinaron los valores de precipitación media anual, lluvia crítica, duración y período de retorno crítico de los puntos adicionales propuestos, los cuales se consignan en el cuadro 41.



Nombre Puntos	Elevación (msnm)	P _{anual} (mm)	Tr _{crít} (años)
P Tierra Bomba	42	1084.0	10
P Cerro La Popa	60	1178.0	9
P Cerro Albornoz	45	1099.6	10
P Loma Marión	47	1110.1	9
P Villas de la Candelaria	6	896.0	11

Cuadro 41. Elevación, precipitación anual y período de retorno de los puntos adicionales

Fuente: El autor (2015)

En el cuadro 42 se presenta un resumen de las estaciones hidrometeorológicas y puntos adicionales con los parámetros calculados de precipitación media anual, precipitación crítica, duración y período de retorno de la lluvia crítica.

N°	Nombre Estación	Elevación (msnm)	P _{anual} (mm)	P _{crít} (mm)	D _{crít} (días)	Tr _{crít} (años)
1	Aeropuerto Rafael Nuñez	2	1033.7	468.5	42.3	11
2	Bayunca	75	1325.0	586.1	46.4	7
3	Cañaveral	75	1220.92	544.1	45.0	7
4	Escuela Naval CIOH	1	821.3	382.8	38.9	10
5	Galerazamba	20	830.9	386.7	39.1	19
6	Santa Ana	1	864.7	400.3	39.6	10
7	P Tierra Bomba *	42	1084.0	488.8	43.1	10
8	P Cerro La Popa *	60	1178.0	526.7	44.4	9
9	P Cerro Albornoz *	45	1099.6	495.1	43.3	10
10	P Lomas del Marión *	47	1110.1	499.3	43.4	9
11	P Villas de la Candelaria *	6	896.0	412.9	40.2	11

Cuadro 42. Precipitación media anual, precipitación crítica y período de retorno

Fuente: El autor (2015)

Con base en los parámetros calculados con anterioridad se elaboró un mapa de isoperíodos de retorno de la lluvia crítica, el cual se muestra en la figura 94.

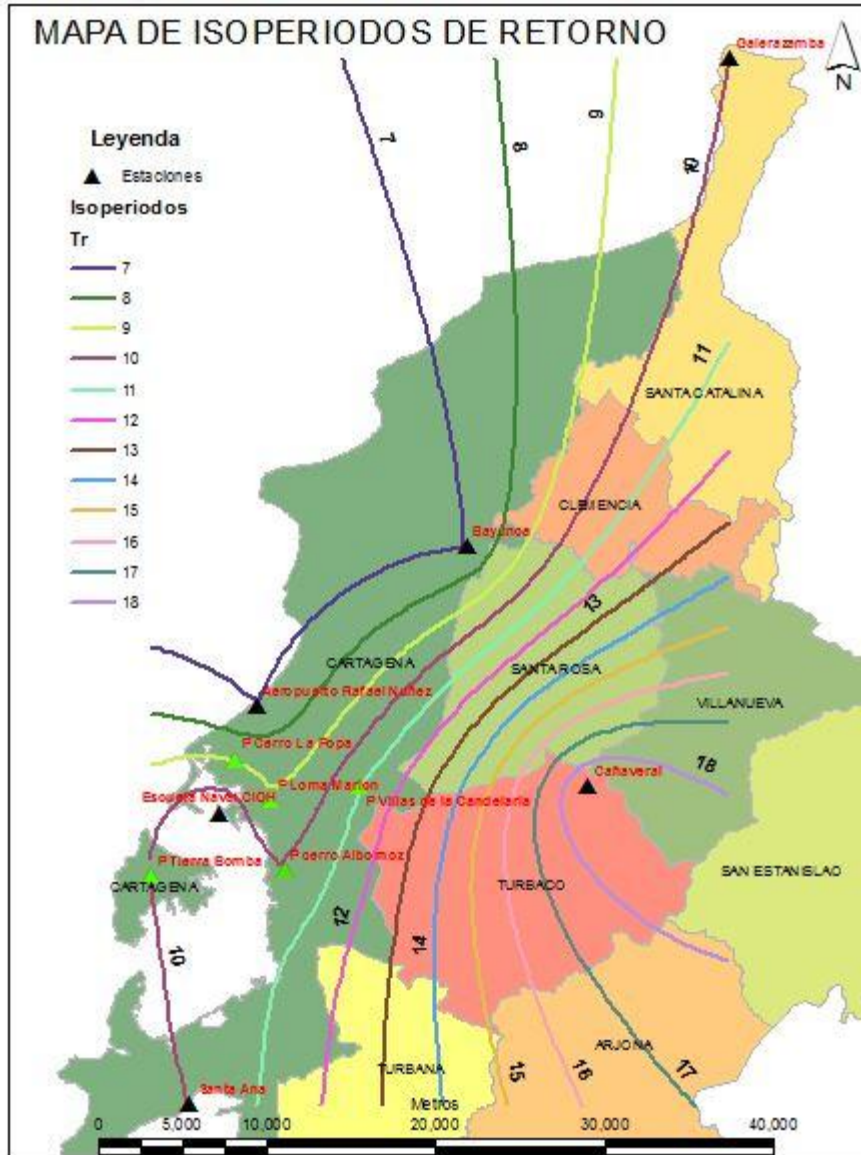


Figura 94. Mapa regional de isoperíodos de retorno

Fuente: El autor (2015)

Se destaca que el rango de los tiempos de retorno para el análisis varía entre 6 y 19 años según lo determinado para la elaboración del mapa de isoperíodos. Es importante mencionar que aunque el mapa de isoperíodos de retorno se obtuvo para un marco más regional (ver figura 94), este se enmarcó para un entorno de ciudad (ver figura 95), teniendo en cuenta el objeto de este trabajo para la calificación de este parámetro.

Relación puntaje vs período de retorno lluvia crítica: Se correlacionaron puntajes definidos por Ramírez (1988) para el parámetro clima con los períodos de retorno obtenidos con origen en 7 años (ver cuadro 43), mediante una gráfica de regresión potencial (ver gráfica 18), teniendo en cuenta una maximización razonable de la precipitación que puede esperarse en la ciudad de Cartagena, para una duración determinada.

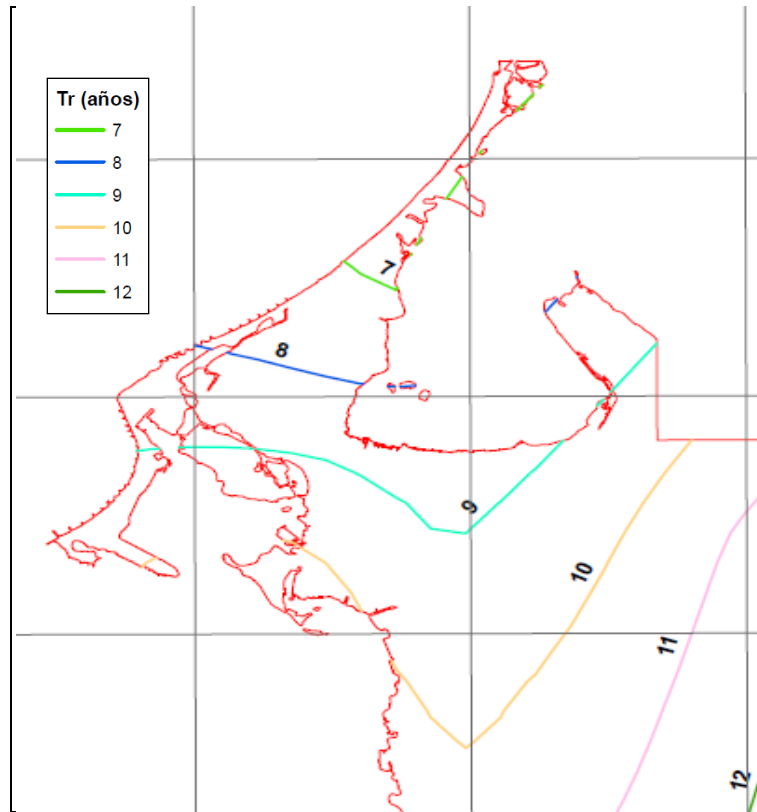


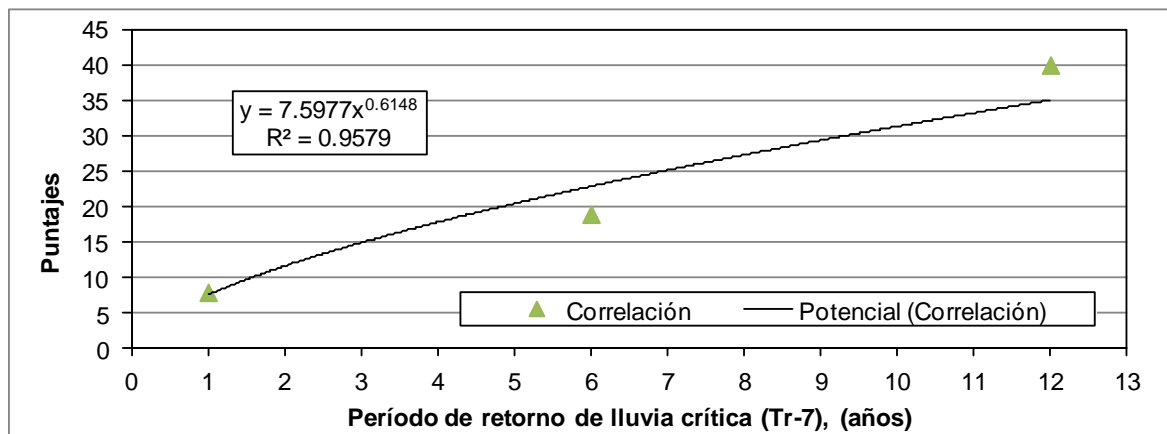
Figura 95. Mapa de isoperíodos de retorno de Cartagena

Fuente: El autor (2015)

Lluvia	Puntaje	Tr (años)	(Tr-7)
Baja	40	19	12
Media	19	13	6
Alta	8	8	1

Cuadro 43. Relación de puntajes de Ramírez (1988) y períodos de retorno críticos

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 18. Correlación de puntajes y períodos de retorno críticos (Tr-7)

Fuente: El autor (2015)



De la gráfica 18 se obtuvo la ecuación [4.12], la cual presenta para este caso un coeficiente de correlación del orden de 0,9579 y un exponente de 0,6148 que se redondea a 0,62.

$$Puntaje = 7,6 \times (Tr - 7)^{0,62} \leq 40 \quad [4.12]$$

La ecuación muestra que para un período de retorno $Tr \geq 21.6$ años se tienen 40 puntos, lo cual indica un nivel de pluviosidad muy bajo. En el casco urbano de Cartagena no se presentaron períodos de retorno de igual o mayor magnitud a la citada. Los períodos de retorno obtenidos para Cartagena (entre 7 y 12 años) corresponden a un puntaje inferior a 23, valor que se enmarca dentro del rango establecido en el parámetro utilizado en la metodología SES.

En la figura 96 se presenta la calificación del parámetro lluvia teniendo en cuenta los puntajes obtenidos para cada área acumulada, donde se puede observar que el comportamiento de la lluvia en esta zona de estudio no es homogéneo.

En el casco urbano de Cartagena un 7.1 % del área estudiada presenta un puntaje entre 0 y 7, un 44.8 % entre 7 y 15, un 41.2 % entre 15 y 20 y un 6.8 % entre 20 y 23 (ver cuadro 44). Es decir que aproximadamente el 51% de la zona obtiene calificaciones de altas a muy altas, para las condiciones más extremas de pluviosidad.

La zona restante hacia el suroriente del casco urbano obtiene calificaciones medias a bajas, razón por la cual se puede decir que esta es una subregión con un comportamiento de lluvia bajo.

Intervalos de puntajes	Calificación	Area (Km ²)	Area en porcentaje (%)
0-7	Muy alta	5.79	7.1
7-15	Alta	36.48	44.8
15-20	Media	33.52	41.2
20-23	Baja	5.56	6.8
>23	Muy baja	0.0	0.0
Total		81.34	100

Cuadro 44. Porcentaje del área de lluvia de Cartagena según el puntaje asignado

Fuente: El autor (2015)

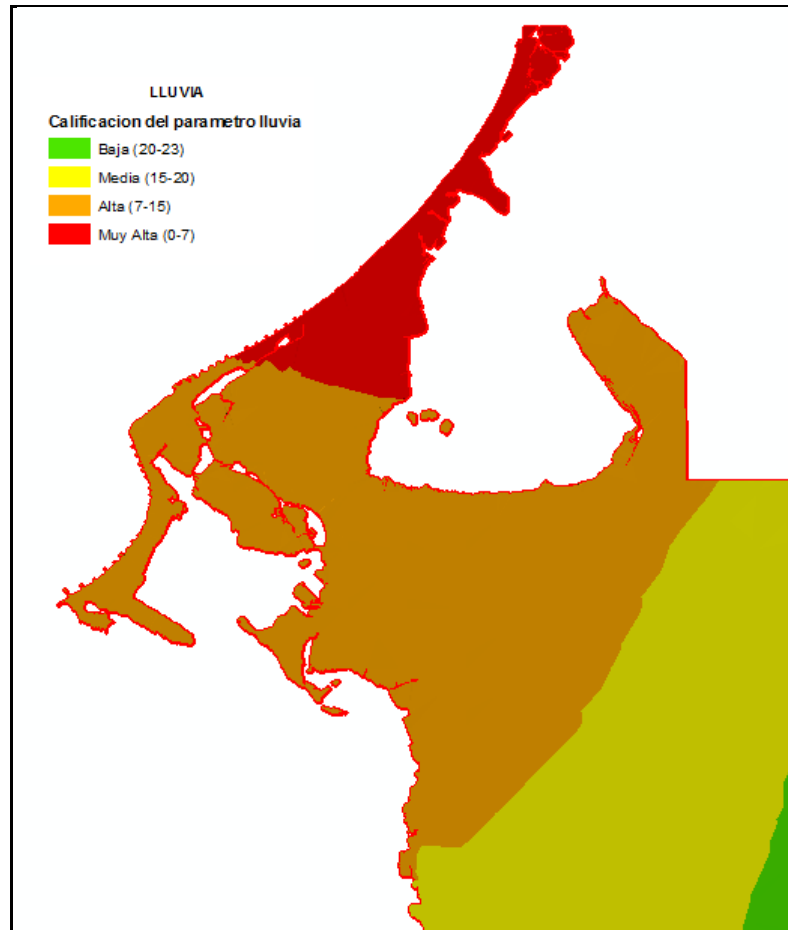


Figura 96. Mapa de calificación del parámetro de lluvia

Fuente: El autor (2015)

4.2.2. Parámetro Sismo (S)

La ocurrencia de sismos produce cargas dinámicas que pueden afectar los taludes mediante un triple efecto: aumento de esfuerzos cortantes, disminución de la resistencia efectiva por aumento de la presión de poros y deformación del medio provocada por la energía sísmica.

Los procesos de remoción en masa durante eventos sísmicos están ligados directamente a la inestabilidad propia de los taludes y adicionalmente a la incidencia del nivel de amenaza sísmica del área de estudio, el comportamiento dinámico del suelo y el efecto de las condiciones topográficas y de los depósitos.

Existen factores externos a las características del sismo que pueden influir en el valor de aceleración que se puede registrar en una zona por la llegada de las ondas sísmicas. Estos factores suelen estar relacionados especialmente con las condiciones geológicas locales que pueden amplificar las vibraciones de las ondas sísmicas. Un ejemplo de esto es la capacidad portante de un depósito de suelo que al variar en profundidad influye en el comportamiento de las ondas sísmicas (ver figura 97).

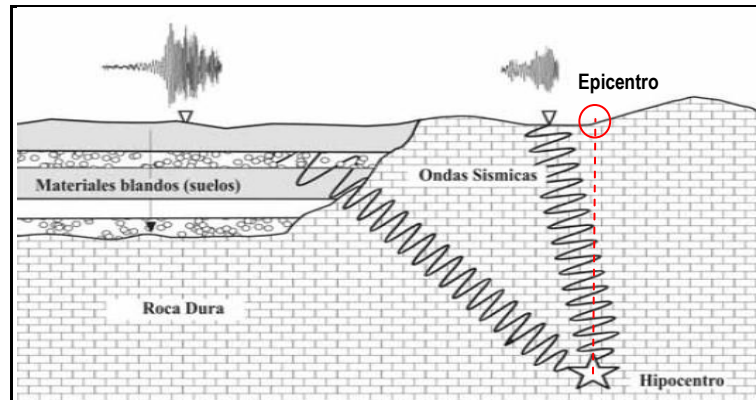


Figura 97. Ondas sísmicas en terrenos con diferente capacidad portante

Fuente: Tomado de Tsige & García- Flórez (2006) y modificado por el autor (2015)

Es importante destacar en este tipo de análisis de índole sísmico el efecto de la resonancia. Según Suarez (2012) la mayor amplificación ocurre a la frecuencia natural más baja, la cual se denomina frecuencia fundamental. El período que corresponde a la frecuencia fundamental se llama período de vibración del suelo ó característico del sitio ($T = 4H/V_s$) y es posible conocerlo, con el fin de relacionarlo con el período de vibración del sismo y detectar los efectos de resonancia por similitud entre ambos períodos y del obstáculo topográfico. Aunque está variable reviste importancia no se incluyó dentro del presente análisis de amplificación sísmica, siguiendo el planteamiento metodológico de Ingeominas (2001-2003).

El parámetro Sismo (C) se evaluó a partir de los efectos de la amplificación sísmica según el tipo de material y la topografía. A continuación se describe la metodología utilizada para el análisis de este parámetro.

Metodología Sismo

Siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001-2003), la evaluación del parámetro sismo se llevo a cabo teniendo en cuenta los siguientes aspectos.

- Amenaza sísmica regional
- Efecto de amplificación sísmica (tipo de material y topografía)

Amenaza sísmica regional

Este tipo de amenaza caracteriza cuantitativamente la probabilidad estadística de la ocurrencia de cierta intensidad sísmica en un determinado sitio, durante un período de tiempo dado. La amenaza sísmica se puede evaluar a nivel regional considerando los parámetros de las fuentes sismogénicas, así como los registros de eventos sísmicos ocurridos en cada zona fuente y la atenuación del movimiento del terreno.

Los movimientos sísmicos de diseño se definen en la NSR-10 por medio de dos parámetros que representan la aceleración (Aa) y la velocidad horizontal pico efectiva (Av). En este caso de estudio solo se tuvo en cuenta el parámetro (Aa) que caracteriza movimientos sísmicos causados por sismos relativamente cercanos en el rango de períodos cortos de vibración entre 0.1 y 0.5 segundos y su influencia en las amplificaciones sísmicas cerca a la fuente.



En el área de estudio la aceleración máxima horizontal en roca (A_a) varía en un rango entre 0.085g y 0.104g según estudio de la AIS (1996). Para el casco urbano de Cartagena y áreas circunvecinas se adoptó un valor de 0.1g (ver figura 99), lo cual indica que el municipio se encuentra en zona de amenaza sísmica baja, siguiendo lo descrito a su vez en la NSR-10.

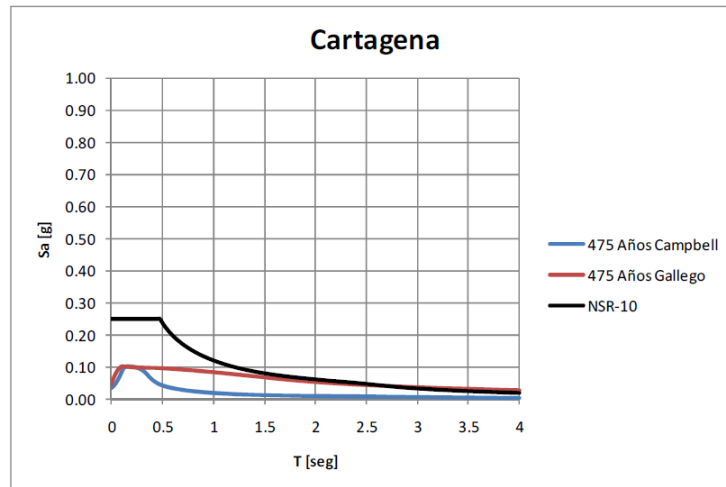


Figura 98. Comparación de espectro de amenaza uniforme con NSR-10 para Cartagena

Fuente: Tomado de AIS (2009)

Nota: El valor del espectro de aceleraciones de diseño para un período de retorno de 475 años se definió con base en las relaciones de atenuación de Campbell (1997) y Gallego (2000).

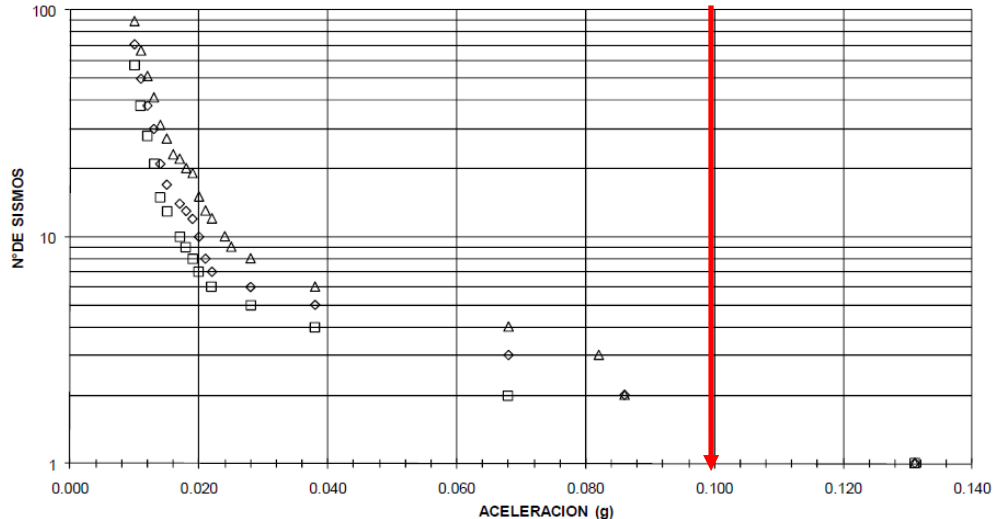


Figura 99. Aceleración máxima inferida de 0,1g para Cartagena

Fuente: Tomado de AIS (2009)

□ Amplificación sísmica

La modificación de una señal sísmica por influencia de las características geológicas, la composición litológica de las formaciones superficiales y topográficas se conoce como efecto de sitio y consiste en la amplificación de dicha señal en varios órdenes de magnitud (Tsige & García-Flórez 2006). La amplificación se puede analizar partiendo de la onda en la roca profunda o partiendo de un afloramiento superficial en roca. El estudio



de la respuesta sísmica del suelo es un campo de interés en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistente.

Las irregularidades topográficas pueden tener un efecto significativo en los movimientos sísmicos. Entre las diferentes formas topográficas se encuentran depresiones en forma de "V" ó "U" y protuberancias en forma triangular, "U" invertida. En general la geometría del talud incide en el proceso de amplificación y se evalúa a partir de la relación entre la longitud de onda del sismo (L_s) y la altura del obstáculo topográfico (H). Según Sauter (1989) en el caso de valles formados entre laderas de ancho (L_v), algunos investigadores han encontrado que cuando $L_s < 2L_v$ se producen elevadas amplificaciones de la aceleración en la superficie del valle.

Cuando se trata de un cerro, las mediciones que registran picos en la cresta, han sido atribuidas a la respuesta dinámica del cerro y la cresta. El efecto corresponde a un complejo campo de ondas, que bajo larga duración produce múltiples reflexiones de difícil predicción (Kramer 1996). Cuando se trata de irregularidades sencillas, pueden encontrarse soluciones a problemas idealizados.

La distancia a la fuente del sismo es otro factor que afecta la amplificación sísmica. Según Faccioli & Resendiz (1975) en Suarez (2012) las amplificaciones cerca a la fuente dependen más de la geología y de la topografía, mientras que a grandes distancias dependen principalmente de la diferencia en la impedancia de la estratificación, del tipo de suelo y del espesor del manto. En este caso de estudio se consideró que las amplificaciones están cerca a la fuente sismogénica y dependen del tipo de material y el efecto topográfico.

Por tipo de material: Se asignaron factores de amplificación (Q) de acuerdo con el tipo de material (M) definido en la metodología SES, siguiendo lo planteado en la NSR-98 y actualizado en la NSR-10 y teniendo en cuenta la pendiente del terreno (θ); todo esto según los lineamientos generales definidos en Ingeominas (2001-2003), así:

Material M	Perfil de suelo NSR-98	Perfil de suelo NSR-10	Factores de amplificación (Q)		
			$\theta \leq 10^\circ$	$10^\circ < \theta \leq 30^\circ$	$\theta > 30^\circ$
Roca de rigidez alta a media	S1	A	0.8	1.0	1.05
		B	1.05	1.1	1.2
Material intermedio: suelo denso a medio o roca blanda y coluvión duro	S2	C	1.2	1.3	1.4
Suelo medianamente rígido (coluvión)	S3	D	1.6	1.7	1.8
Suelo de consistencia blanda a muy susceptible (especial)	S4	E	2.5	2.6	2.7
		F	condición especial		

Cuadro 45. Factores de amplificación (Q) para $A_a \leq 0.1$ (períodos cortos del espectro)

Fuente: Información tomada de Ingeominas (2001-2003), NSR-10 y adaptado por el autor (2015)

En el cuadro 45 se aprecian los factores de amplificación (Q) de los diferentes tipos de material, donde la roca o basamento amplifica muy poco las vibraciones en comparación con los depósitos de suelo blando y suelto (gravas, arenas y limos), que amplifican considerablemente los movimientos sísmicos (ver figura 100), especialmente cuando el tamaño de grano es menor, y por lo tanto aumenta la aceleración en superficie.



Figura 100. Efecto de sitio sísmico
Fuente: Tomado de Guasch (2011)

Según Ingeominas (2001a) en Cartagena se presenta predominantemente el perfil de suelo tipo S2 (C) y en menor medida el perfil tipo S1 (A-B). Se utilizó la zonificación geotécnica de Cartagena hecha por Ingeominas (2001a) para definir la localización espacial de los perfiles de suelo, donde se asume que la zona V constituida predominantemente por material rocoso de origen calcáreo se comportará como un perfil de suelo S1, mientras que el resto de las zonas geotécnicas se comportarán como un perfil de suelo S2 (ver figura 101).

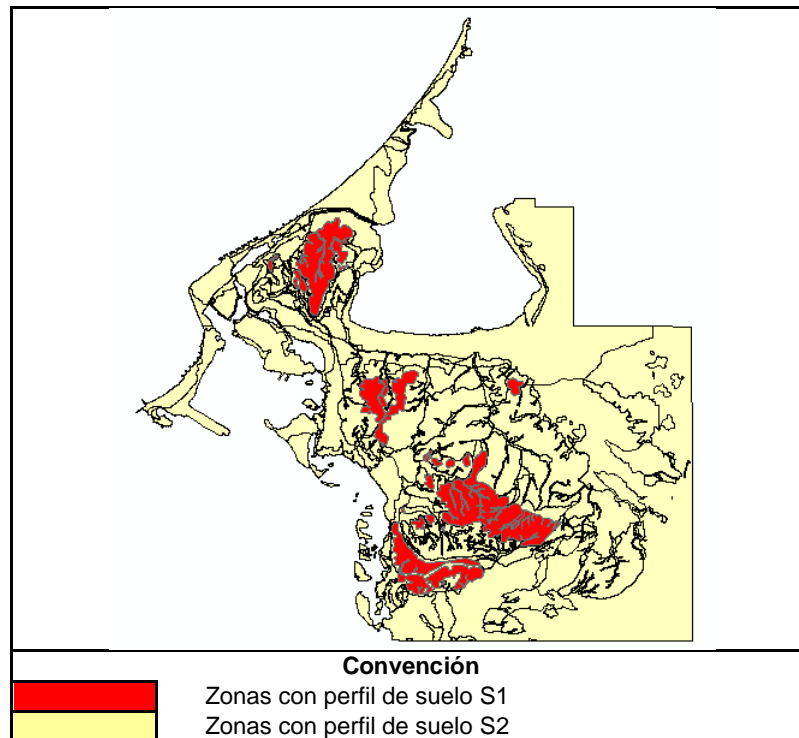


Figura 101. Mapa propuesto de perfiles de suelo (NSR-10) en Cartagena
Fuente: El autor (2015)

Con base en el tipo de material en función del perfil de suelo y la pendiente del terreno (θ) se asignaron los factores de amplificación (Q). A continuación en la figura 102 se muestra el mapa de factores de amplificación (Q) obtenido.

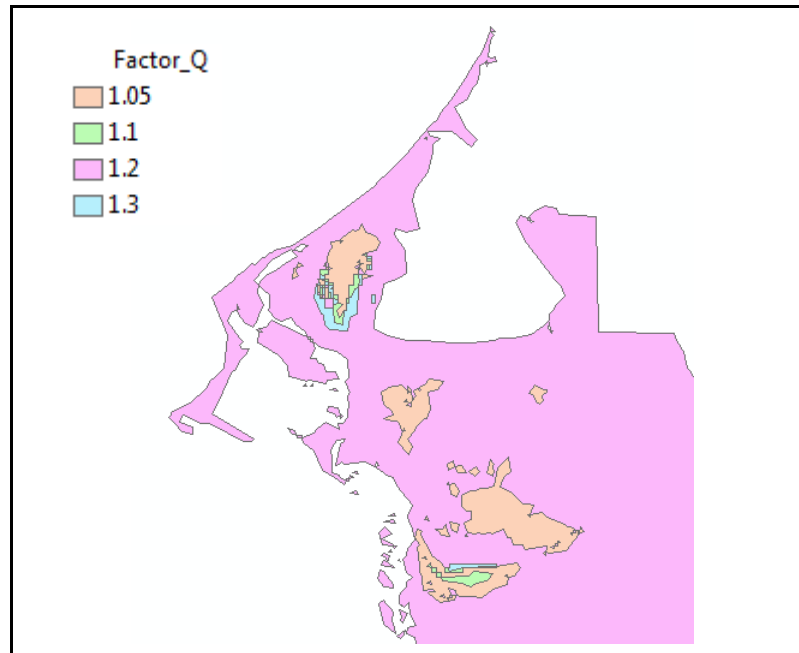


Figura 102. Mapa del factor de amplificación (Q) de Cartagena
Fuente: El autor (2015)

Por efecto topográfico local: De acuerdo con Suarez (2012) el factor de amplificación topográfica es el aumento de la aceleración en la superficie del terreno comparada con la aceleración en la roca a profundidad (aumenta la duración del sismo y se modifican las características del movimiento), es decir:

$$\text{Amplificación topográfica} = \frac{\text{aceleración amplificada}}{\text{aceleración en roca}} \quad [4.13]$$

Para las crestas del área de estudio se emplearon los valores de amplificación topográfica (χ) dados en el código francés por Paz (1994) en Ingeominas (2001-2003):

$$\chi = 1.0 \quad \text{para } \Delta i \leq 0.4 \quad [4.14]$$

$$\chi = 1.0 + 0.8 (\Delta i - 0.4) \quad \text{para } 0.4 \leq \Delta i \leq 0.9 \quad [4.15]$$

$$\chi = 1.4 \quad \text{para } 0.9 \leq \Delta i \quad [4.16]$$

Donde $\Delta i = \text{abs}(I - i)$ y está en función de la pendiente del talud de la ladera (I) y de la pendiente de la parte superior de la ladera o cresta (i). En este caso se tiene que $i \leq (I/3)$.

El comportamiento de los valores de amplificación topográfica (χ) está ligado a la distancia horizontal (x) desde la cresta del talud hacia arriba de la misma, por medio de las siguientes expresiones:



χ crece linealmente de $\chi = 0$ (para $x = -A$) a $\chi = \chi$ (para $x = 0$)
χ es constante en un valor χ para $-A \leq x \leq B$
χ decrece linealmente de $\chi = \chi$ (para $x = B$) a $\chi = 0$ (para $x = B + C$)

Donde (A), (B) y (C) son factores en función de la altura de un talud (H) que se expresan de la siguiente forma:

$$A = 20 \times I \text{ (el menor valor) } \quad \text{ó} \quad A = (H + 10)/4 \quad [4.17]$$

$$B = H/3 \quad [4.18]$$

$$C = H/4 \quad [4.19]$$

□ Cálculo de la aceleración en superficie (As)

El cálculo de la aceleración en superficie (As) se realizó a partir de la aceleración en roca y teniendo en cuenta el tipo de material y la topografía, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_s = A_a \times Q \times \chi \quad [4.20]$$

Al aplicar la ecuación anterior, se obtuvieron valores de aceleración amplificada en superficie entre 0.112g y 0.132g. A continuación se muestran valores obtenidos de (As) en la zona de laderas de la ciudad y el mapa de su distribución en la figura 103.

Zona de laderas	Aa (g)	Q	X	As (g)
Popa Norte	0.1	1.10	1.15	0.127
Popa Sur	0.1	1.20	1.10	0.132
Marión	0.1	1.05	1.08	0.113
Albornoz Sur	0.1	1.10	1.02	0.112
Albornoz Norte	0.1	1.20	1.01	0.121

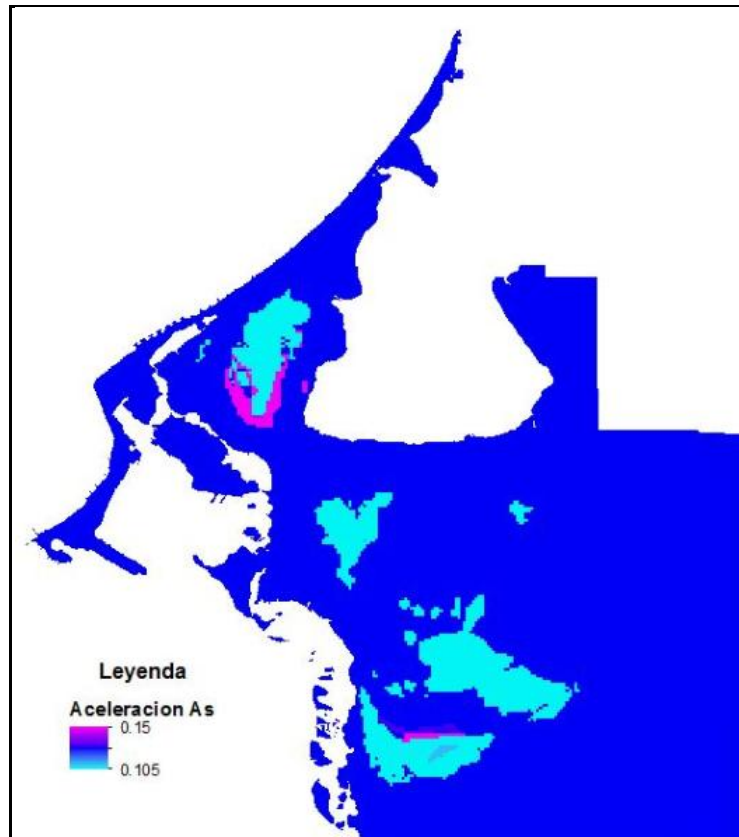
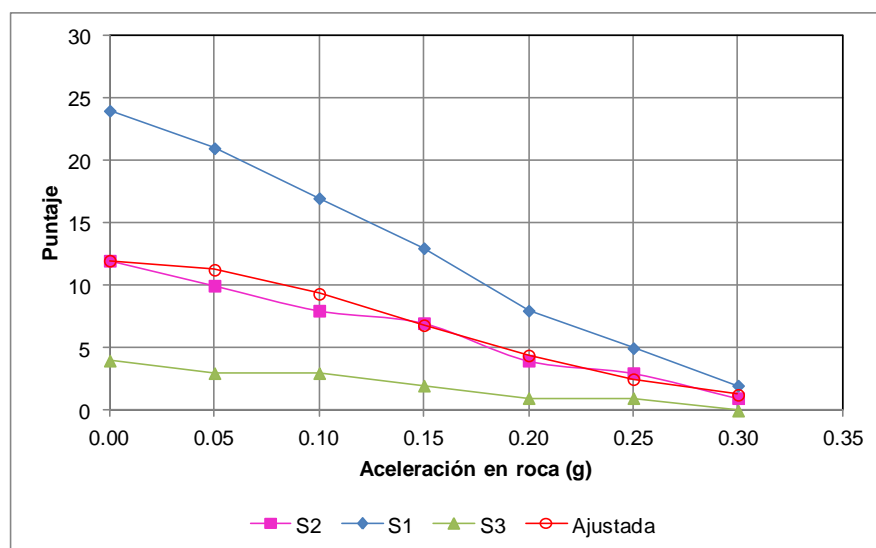


Figura 103. Mapa de distribución de aceleraciones superficiales (As) - Amenaza sísmica
Fuente: El autor (2015)

Relación puntaje vs Aceleración en superficie: Se correlacionaron la distribución de las aceleraciones en superficie (As) con los puntajes definidos por Ramírez (1988) para el parámetro sismo, a través de una representación gráfica (ver gráfica 19).



Gráfica 19. Correlación de puntajes y Aceleración en roca
Fuente: El autor (2015)



La curva del perfil de suelo S2 (C) se ajustó, teniendo en cuenta que en la ciudad de Cartagena predominan este tipo de materiales, según lo descrito por Ingeominas (2001a). Se encontró que la mejor distribución de puntaje ajustada (PS) para la ciudad de Cartagena viene dada por la siguiente expresión:

$$PS = 12 \cdot \exp(-27 \cdot As^2) \quad [4.21]$$

Los puntajes por sismo (PS) asignados a la ciudad de Cartagena varían en el rango de 6.56 a 8.91, según la aceleración en superficie (A_s) y de conformidad con la ecuación obtenida y la metodología SES.

En la figura 104 se presenta la calificación del parámetro sismo en la zona de estudio.

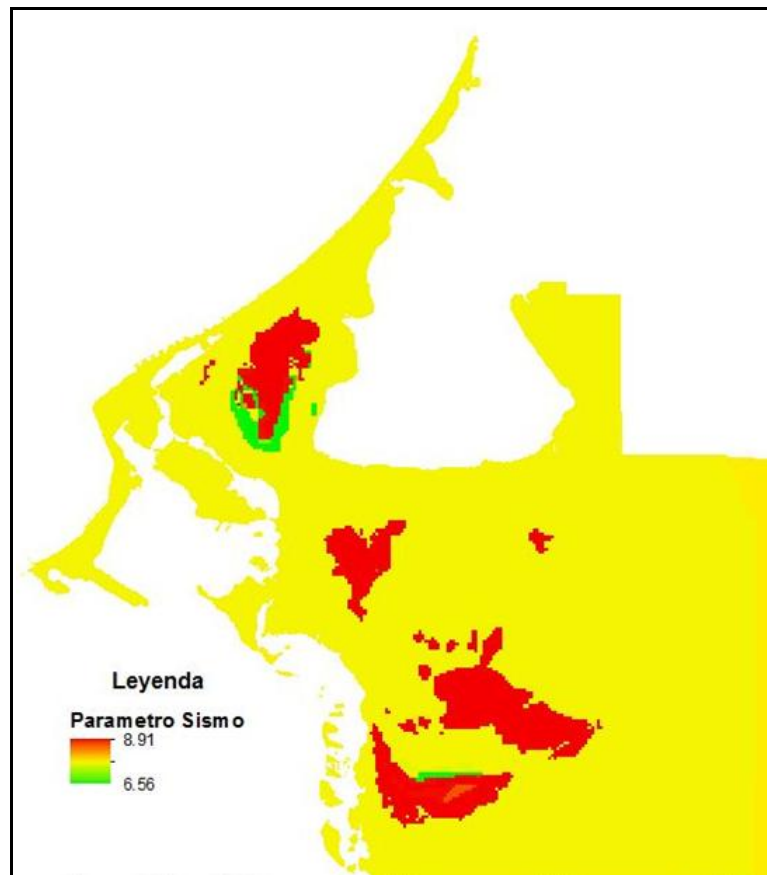


Figura 104. Mapa de calificación del parámetro sismo

Fuente: El autor (2015)



4.2.3. Parámetro Erosión (E)

Los principales procesos de denudación de la corteza terrestre son considerados la erosión y los movimientos en masa, los cuales están interrelacionados entre sí y contribuyen en el modelado transitorio del relieve actual. La erosión se presenta por la remoción y transporte de materiales térreos por efecto de un agente (p.e. agua, aire, animales y/o el hombre). Por su parte, los movimientos en masa constituyen fenómenos de transferencia por gravedad, que son detonados a través de mecanismos como la erosión.

La acción del hombre juega un papel determinante en la generación de procesos de denudación, puesto que el uso de los suelos es inadecuado en relación a sus verdaderas potencialidades.

A continuación se describe la metodología utilizada para el análisis de este parámetro.

Metodología Erosión

La evaluación del Parámetro Erosión se realizó a través del modelo empírico de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE), la cual fue formulada en su forma actual por Wischmeier y Smith (1962) y está expresada de la siguiente manera:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad [4.22]$$

Donde (A) representa el valor promedio de las pérdidas del suelo anuales expresado en (Tm/ha, año) en función de un índice de erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), longitud de pendiente (L), grado de pendiente (S), cobertura vegetal (C) y prácticas de manejo y conservación del suelo (P). Es importante mencionar que el modelo tiene algunas limitaciones para estimar la pérdida de suelo, pues considera los efectos de cada factor de manera independiente, no interrelacionada; está concebido para la erosión laminar y en pendientes de un rango definido, en zonas de cultivos de EE.UU.

□ Cálculo del factor de Erosividad (R)

Este factor es el índice de erosión pluvial de la lluvia que recoge la influencia que sobre la erosión tiene la energía cinética de los aguaceros, disgregando partículas del suelo en un campo desprotegido (González-Del Tánago 1991). Wischmeier & Smith (1958) citado en Pérez & Mesa (2002) observaron que entre los factores de precipitación pluvial que se estudiaron, la energía cinética en combinación con la máxima intensidad de los 30 minutos explicaba la mayor parte de la pérdida de suelo en las parcelas de campo.

La energía cinética de la lluvia es función del tamaño dominante de las gotas de agua, que a su vez está relacionado con la intensidad de la lluvia (González-Del Tánago 1991). Para el cálculo del factor R es necesario calcular el valor de R de cada aguacero de un mismo año, calcular el factor R de ese año como la suma de los R de cada aguacero ocurrido en el año; repetir ese cálculo para un período de años representativos y finalmente calcular el valor promedio anual de R, como media aritmética de los valores de R anuales del período de años considerado. Todos estos cálculos requieren una información detallada de las precipitaciones, con un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante el aguacero suministrado por pluviógrafos (González-Del Tánago 1991).



En el caso de estudio, las estaciones hidrometeorológicas de la zona presentan más registros de información pluviométrica que pluviográfica. Por otro lado no hay disponibilidad de estudios específicos de la distribución espacial de la erosividad. De acuerdo con Ingeominas (2001-2003), no es posible implementar la metodología de Wischmeier & Smith (1960) para el cálculo del factor R, cuando hay carencia de información, en cambio se adopta el "método rápido" de Morgan (1998), que en climas tropicales presenta una expresión en términos generales en función de la precipitación media anual y de la intensidad típica de la lluvia.

$$R = P_{eros} \cdot [0.119 + 0.0873 \cdot \log_{10}(I_{30\ tip})] \quad [4.23]$$

Donde (P_{eros}) es la precipitación media anual erosiva expresada en milímetros, la cual en climas tropicales representa aproximadamente el 40% de la precipitación media anual (Hudson 1995). ($I_{30\ tip}$) es la intensidad típica de la precipitación media anual erosiva.

La escasez de registros pluviográficos de la zona es una limitante para obtener la distribución espacial del factor R, por lo tanto Ingeominas (2001-2003) sugiere en este caso adoptar como distribución espacial la distribución de líneas isoyetas obtenidas de los promedios multianuales de un número suficiente de estaciones.

En este caso se utilizaron las isoyetas de precipitación media anual (mm) para la ciudad de Cartagena obtenidas del Plan Maestro de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena elaborado por el Consorcio Consultores Cartageneros (2007), las cuales se aprecian en la figura 105.

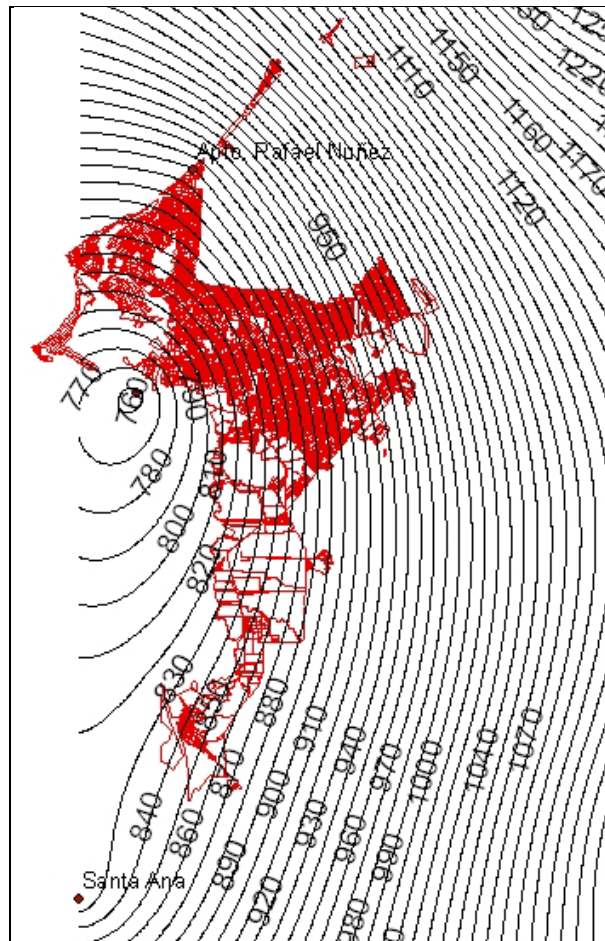


Figura 105. Isoyetas de precipitación media anual en milímetros para Cartagena

Fuente: Consorcio Consultores Cartageneros, Plan de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena (2007)

De acuerdo con lo planteado anteriormente, se empleó la información hidrometeorológica de la estación Aeropuerto Rafael Nuñez, la cual ha registrado en los últimos 34 años una precipitación media anual de 1033.7 mm.

Es importante destacar que en general los registros pluviográficos disponibles son deficientes y no presentan la continuidad requerida para este tipo de análisis, por esta razón se utilizaron los registros de precipitación máxima mensual en 24 horas de la estación Aeropuerto Rafael Nuñez como se mencionó antes y se seleccionaron aquellos registros de alta intensidad de lluvia de 30 minutos siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001-2003).

Para determinar la fracción de precipitación en 24 horas que cae en una duración de la lluvia de tiempo igual a 30 minutos o precipitación máxima acumulada en 30 minutos ($P_{\max 30}$) se utilizó la expresión de Chang & Bolívar (1997) en Arrieta (2004), quienes estudiaron para la estación del Aeropuerto Rafael Nuñez, la relación existente entre la precipitación registrada en 24 horas y la precipitación que cae en una duración t menor (P_t), la cual es importante porque en Colombia existen más estaciones pluviométricas que pluviográficas, puesto que son más abundantes los registros diarios de 24 horas y no se dispone en su gran mayoría de información sobre curvas de intensidad duración frecuencia.



Los resultados de Chang & Bolívar (1997) mostraron que el período de retorno no era significativo en el establecimiento de la relación y propusieron la siguiente expresión para tiempos de duración inferiores a 4 horas y 20 minutos.

$$\%Pt = -0.0067t^4 + 0.0902t^3 - 0.4236t^2 + 0.897t + 0.0026 \quad [4.24]$$

Donde (%Pt) es la fracción de la precipitación en 24 horas caída en una duración (t) de la lluvia y (t) es la duración de la lluvia expresada en horas.

En este caso la duración en tiempo de la precipitación ($P_{\max30}$) es de 0.5 horas, por lo tanto al utilizar la expresión de Chang & Bolívar (1997) los resultados de (%Pt) son del orden de 0.36.

Se seleccionaron para el análisis los aguaceros de mayor intensidad del período comprendido entre los años 2000 a 2006, por existir registros más completos y continuos de precipitación máxima mensual en 24 horas y en razón de que las mediciones recientes son probablemente más confiables.

El cálculo del factor R a través de la ecuación de Morgan (1998) se efectuó para cada precipitación máxima mensual en 24 horas. Inicialmente se determinó la precipitación máxima acumulada en 30 minutos ($P_{\max30}$) para un %Pt igual a 0.36 y posteriormente su respectiva intensidad (I). A partir de la precipitación anual de la estación para el año de ocurrencia de cada aguacero, se obtuvo un valor promedio anual de R en el período seleccionado, que fue relacionado con el promedio de precipitación anual de la estación.

Siguiendo lo planteado por Ingeominas (2001-2003) se supone que el factor R varía con la magnitud de precipitación media anual erosiva, al no tener mayores herramientas para determinar los valores de R de las demás estaciones y siendo muy conveniente para este análisis categorizar este factor. Al suponer que R se distribuye como la precipitación media anual, se determinó un valor de R para cada rango de precipitación dentro del área de estudio.

En los cuadros 46 y 47 se muestran los cálculos hechos en la determinación del factor de erosividad de la lluvia R en el área de estudio según la metodología propuesta con anterioridad.

Los valores del factor R para el período comprendido entre el año 2000 a 2006 varía entre 91 y 153 MJ.mm/ha.h en la estación Aeropuerto Rafael Núñez y se asumen como válidos para la totalidad de la ciudad de Cartagena. El valor promedio del factor R es igual a 108 MJ.mm/ha.h.

En la determinación del índice de erosividad es importante considerar la diferencia entre los valores de precipitación media anual ya que el rango para la ciudad de Cartagena varía aproximadamente entre 760 y 1010 mm, lo cual es consistente con el régimen pluviométrico anual establecido para la Región Caribe que está entre 500 y 1500 mm anuales.



Fecha	P (mm)	P _{max.30} (mm)	I (mm/h)	P _{anual} (mm)	P _{eros} (mm)	R (MJ.mm/ha.h)	R _{promedio}
Julio de 2000	116.2	41.4	82.7	794.5	317.8	91	91
Septiembre de 2001	57.2	20.4	40.7	859.0	343.6	89	92
Octubre de 2001	75.9	27.0	54.0	859.0	343.6	93	
Noviembre de 2001	73.8	26.3	52.6	859.0	343.6	93	
Mayo de 2002	56.9	20.3	40.5	681.5	272.6	71	72
Julio de 2002	71.7	25.5	51.1	681.5	272.6	73	
Junio de 2003	77.8	27.7	55.4	1170.9	468.4	127	132
Noviembre de 2003	161.8	57.6	115.2	1170.9	468.4	140	
Diciembre de 2003	80	28.5	57.0	1170.9	468.4	128	
Agosto de 2004	67	23.9	47.7	1396.5	558.6	148	153
Septiembre de 2004	85.3	30.4	60.7	1396.5	558.6	153	
Octubre de 2004	56.7	20.2	40.4	1396.5	558.6	145	
Noviembre de 2004	148	52.7	105.4	1396.5	558.6	165	105
Mayo de 2005	70.4	25.1	50.1	981.4	392.6	105	
Octubre de 2005	72.3	25.7	51.5	981.4	392.6	105	
Noviembre de 2005	66.2	23.6	47.1	981.4	392.6	104	115
Mayo de 2006	60.3	21.5	42.9	1046.1	418.4	109	
Julio de 2006	65	23.1	46.3	1046.1	418.4	111	
Octubre de 2006	112.9	40.2	80.4	1046.1	418.4	119	115
Noviembre de 2006	122.3	43.5	87.1	1046.1	418.4	121	
Diciembre de 2006	76.2	27.1	54.3	1046.1	418.4	113	
						R (MJ.mm/ha.h) =	108
Convenciones:							
P (mm): Precipitación de 24 horas				P _{max.30} (mm): Precipitación máxima acumulada en 30 minutos			
P _{anual} (mm): Precipitación anual de la estación				I (mm/h): Intensidad de la precipitación máxima acumulada en 30 min			
P _{eros} (mm): Precipitación media anual erosiva				R (MJ.mm/ha.h): Factor de erosividad de la lluvia			

Precipitaciones anuales Apto Rafael Núñez		
Año	P _{anual} (mm)	P _{eros} (mm)
2000	794.5	317.8
2001	859.0	343.6
2002	681.5	272.6
2003	1170.9	468.4
2004	1396.5	558.6
2005	981.4	392.6
2006	1046.1	418.4
Promedio	990.0	396.0

R promedio de 7 años =	$\frac{108}{0.4 \times P_{anual} \text{ de 7 años} = 396.0}$
K =	0.27

Cuadro 46. Determinación del factor potencial erosivo de la lluvia R

Fuente: El autor (2015)



$P_{\text{isoyetas_anual}}$ (mm)	$0.4 \times P_{\text{isoyetas_anual}}$ (mm)	Factor "R" para P_{anual} (MJ.mm/ha.h)
770	308	84.3
780	312	85.4
790	316	86.5
800	320	87.5
810	324	88.6
820	328	89.7
830	332	90.8
840	336	91.9
850	340	93.0
860	344	94.1
870	348	95.2
880	352	96.3
890	356	97.4
900	360	98.5
910	364	99.6
920	368	100.7
930	372	101.8
940	376	102.9
950	380	104.0
960	384	105.1
970	388	106.1
980	392	107.2
990	396	108.3
1000	400	109.4
1010	404	110.5
1020	408	111.6
1030	412	112.7
1040	416	113.8

$P_{\text{anual_Rafael N\u00faez}}$ (mm)	$0.4 \times P_{\text{anual_Rafael N\u00faez}}$ (mm)	Factor "R" para P_{anual} (MJ.mm/ha.h)
1033.7	413.5	113.1

Cuadro 47. Determinación del factor R para cada isoyetas (Distribución espacial)

Fuente: El autor (2015)

A través de las isoyetas planteadas por el Consorcio Consultores Cartageneros (2007) se pudo obtener la distribución espacial de la erosividad en el área de estudio (ver figura 106).

En el mapa de erosividad se aprecia que en general este factor aumenta de modo proporcional con la precipitación media anual, por lo tanto se observa que los valores de la erosividad aumentan de occidente a oriente y de sur a norte, presentándose los mayores valores del factor R hacia el cerro de La Popa y más hacia el norte y hacia el oriente con magnitudes máximas del orden de 113.8 MJ.mm/ha.h.

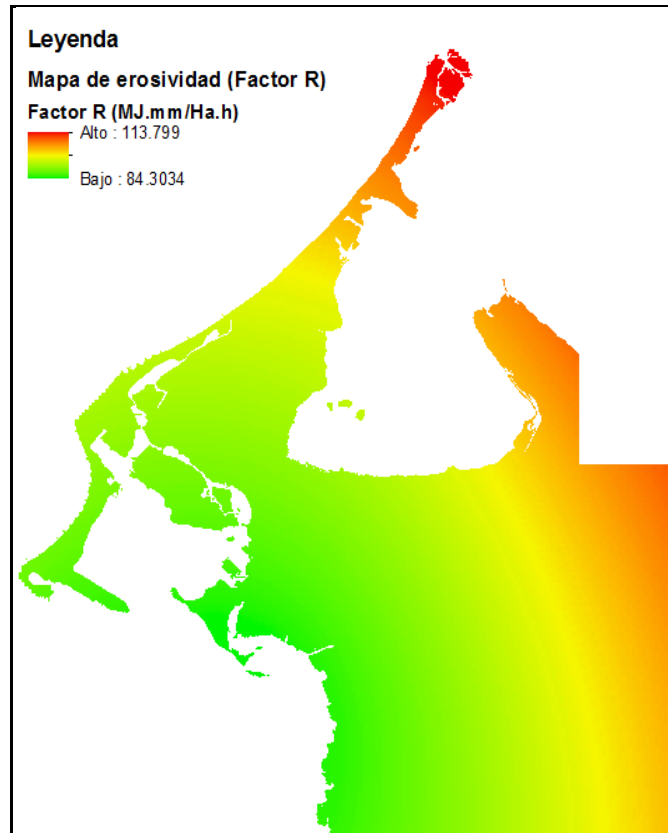


Figura 106. Mapa de erosividad
Fuente: El autor (2015)

❑ Cálculo del factor de Erodabilidad (K)

La erodabilidad o vulnerabilidad del suelo a la erosión, es una característica propia del suelo ligada a su granulometría (% de limo, arena y arena muy fina), materia orgánica, estabilidad estructural, porosidad, permeabilidad, condiciones hidrológicas, entre otras, y distinta a la erosión en sí, la cual es el proceso resultante de esta erodabilidad, expuesta a unas condiciones de clima, relieve y cobertura vegetal (Gonzalez-Del Tánago 1991).

Este factor K es una medida de la susceptibilidad del suelo a ser disgregado, desintegrado o desmoronado, expresado en (T/año) y definido como la pérdida promedio de suelo por unidad de potencial erosivo de la lluvia (R), para un suelo desprovisto.

Siguiendo lo planteado en Ingeominas (2001-2003), el factor K se determinó con base en la ecuación de Paulet (1967), la cual se relaciona a continuación.

$$K = 10^{-3} [10.356 - 3.78082 \cdot A + 2.32882 \cdot L + 323.545 \cdot \rho_a] \quad [4.25]$$

Donde el factor de erodabilidad (K) está expresado en $\{[T/ha] \cdot (1/R)\}$ y es inversamente proporcional al factor de erosividad (R), los valores de (A) y (L) son los porcentajes de arena y limo respectivamente y (ρ_a) es la densidad aparente expresada en (gr/cm^3).



Es importante destacar que los datos de granulometría y densidad aparente se obtuvieron de varios trabajos de consultoría en los que participó el autor en la ciudad de Cartagena en la última década (2005-2014). Utilizando la ecuación de Paulet (1967) se determinaron los valores de erodabilidad para cada unidad de suelo propuesta, los cuales se consignan en el cuadro 48.

Unidad de suelo	A (%)	L (%)	ρ_a (gr/cm ³)	K [T/ha] · (1/R)	Descripción general
Z-I	70.6	18.3	1.5	0.271	Suelos arenosos gruesos, superficiales a profundos, bien drenados
Z-II	12.1	21.6	1.4	0.468	Suelos arcillosos con lentes arenosos, superficiales, de bien a poco drenados
Z-IIIA	6.2	25.3	1.4	0.477	Suelos arcillo-limosos, plásticos, superficiales, poco drenados
Z-IIIB	11.7	24.6	1.4	0.476	Suelos arcillosos, de consistencia media, superficiales, poco drenados
Z-IIIC	4.9	25.7	1.4	0.479	Suelos arcillosos, de consistencia dura, superficiales, poco drenados
Z-IV	17.9	15.8	1.5	0.465	Suelos arcillo-arenosos, superficiales, bien a poco drenados
Z-V	5.9	17.1	1.4	0.481	Suelos compuestos por arcillas calcáreas, con material rocoso matriz-soportado, superficiales a profundos, bien a poco drenados
Z-VI	5.0	23.7	1.4	0.500	Suelos arcillo-limosos relacionados con el fenómeno de diapirismo de lodo
R	80.0	7.0	1.5	0.210	Rellenos antrópicos de material granular, superficiales

Cuadro 48. Determinación del factor de erodabilidad K

Fuente: El autor (2015)

Las unidades de suelo propuestas se definieron con base en la zonificación geotécnica del casco urbano de Cartagena (ver figura 107) llevada a cabo por Ingeominas (2001a). Las unidades de suelo con mayor susceptibilidad a erodarse son Z-V y Z-VI seguidas de las unidades Z-IIIC, Z-IIIA, Z-IIIB, Z-II y Z-IV que presentan en cierta medida una mayor resistencia. Las unidades de menor susceptibilidad o resistentes corresponden a la Z-I y R. Según Ingeominas (2001-2003) los dos primeros grados de susceptibilidad, tienden a ser desintegrados por la acción de cualquier lluvia, práctica agrícola, y/o pastoreo, ya que sus partículas y agregados no se encuentran lo suficientemente cementadas debido a la escasez de materia orgánica y al tamaño de las partículas del suelo.

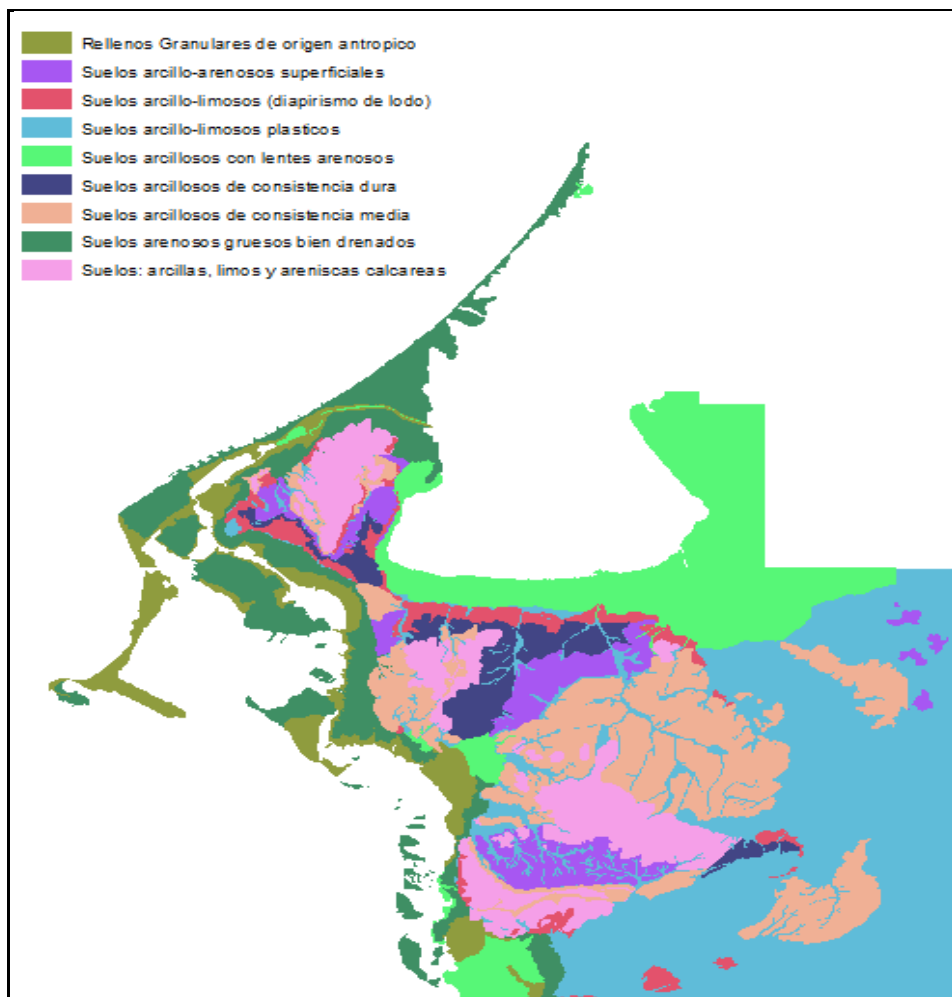


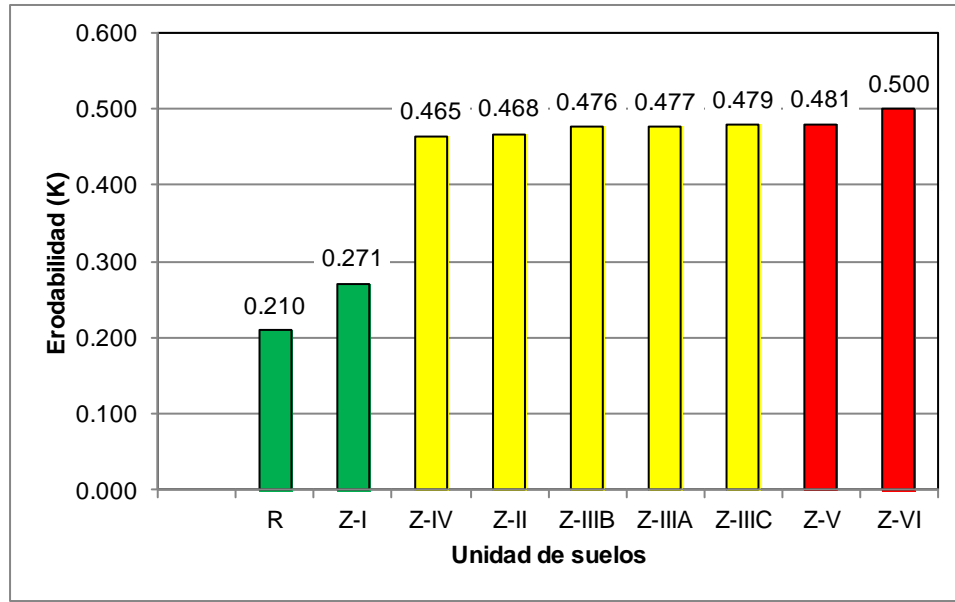
Figura 107. Mapa de zonificación geotécnica utilizado para identificar unidades de suelo
 Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a) y ajustado por el autor (2015)

La clasificación de susceptibilidad fue tomada de Ávila (1996) y ajustada en los intervalos de índices por el autor (2015), teniendo en cuenta las características del área de estudio y los resultados obtenidos del factor de erodabilidad (K).

Índice (T/año)	Resistencia	Símbolo
0.00 - 0.15	muy resistente	MR
0.15 - 0.30	resistente	RS
0.30 - 0.48	medianamente resistente	MD
0.48 - 0.60	Susceptible	SS
0.60 - 0.70	muy susceptible	MS

Cuadro 49. Clasificación del índice de erodabilidad K
 Fuente: Tomado de Ávila (1996) y ajustado por el autor (2015)

La gráfica 20 muestra el grado de erodabilidad para cada una de las unidades de suelo propuestas, teniendo en cuenta que un suelo es menos erodable a medida que decrece el contenido de limo, independiente del contenido de arcilla y/o arena.



Gráfica 20. Erodabilidad para cada unidad de suelo propuesta

Fuente: El autor (2015)

Con base en los resultados de la modelación espacial de la erodabilidad se obtiene que las zonas de mayor grado de susceptibilidad se localizan hacia el suroriente de la ciudad, hacia las áreas de laderas donde se destacan el cerro de La Popa, la loma del Marión y el cerro de Albornoz, los cuales se relacionan litológicamente con la formación calcárea del Popa, donde se presentan intercalaciones de areniscas y arcillolitas calcáreas, así como hacia el tope se observan afloramientos rocosos localizados. En inmediaciones de la Universidad Tecnológica de Bolívar sede Ternera se presentan depósitos arcillosos relacionados con el fenómeno del diapirismo de lodo, los cuales también son de una erodabilidad alta.

En cuanto a las zonas de menor grado de erodabilidad o resistentes, se identifican áreas costeras de formación de depósitos de playas y de ejecución de rellenos antrópicos, pese a su alto porcentaje de arena. Se destaca que estas zonas presentan pendientes moderadas a bajas. A continuación en la figura 108 se muestra el mapa de erodabilidad generado para la ciudad de Cartagena.

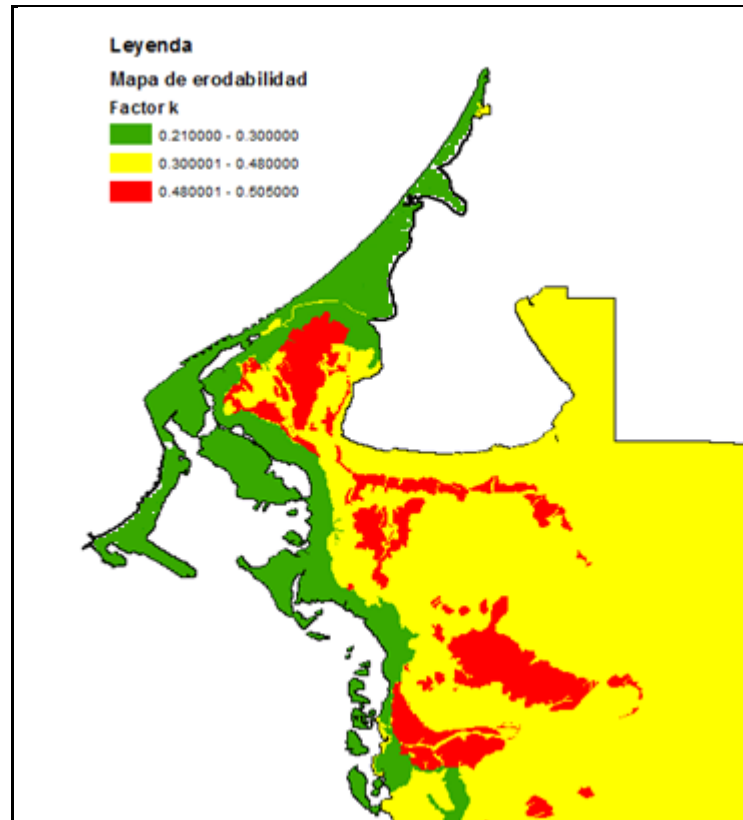


Figura 108. Mapa de erodabilidad

Fuente: El autor (2015)

❑ **Cálculo del factor de longitud de pendiente (L) y grado de pendiente (S)**

La longitud de la ladera y su pendiente influyen considerablemente en la tasa de erosión de un suelo, siendo el relieve uno de los principales factores que determinan la emisión de sedimentos de una cuenca (Gonzalez-Del Tánago 1991).

Según Meyer et al. (1975) las pérdidas de suelo por unidad de superficie se incrementan al aumentar la longitud de la ladera, siendo mayores en su parte baja, en razón de la acumulación aguas abajo de la lámina de escorrentía y el incremento de su fuerza de arrastre a medida que desciende por la ladera. Se destaca la formación de cárcavas y surcos en laderas, en laderas de mayor longitud, donde las tasas de erosión usualmente aumentan.

Wischmeier y Smith (1958) definen la longitud de pendiente (L) como aquella distancia que recorre la gota de agua, desde que se forma, en la divisorio, hasta que encuentra un cauce o una zona de sedimentación. Relaciona las pérdidas de suelo para una longitud dada y para la longitud de una parcela estándar, y se determina a través de la siguiente expresión:

$$L = (X/22.13)^m \quad [4.26]$$

Donde (X) es la longitud de la pendiente, (m) es un exponente en función de la inclinación de la pendiente, cuyo valor oscila entre 0.2 (pendientes suaves) y 0.5 (pendientes moderadas y altas) de la siguiente forma:



Pendiente	Exponente (m)
< 1%	0.2
≥ 1% - ≤ 3%	0.3
> 3% - < 5%	0.4
≥ 5% - ≤ 10%	0.5
> 10%	0.6*

* NOTA: Arnoldus (1977) sugirió un valor de (m) igual a 0.6 para pendientes más empinadas.

Con base en el mapa de pendientes, se obtuvo la distribución espacial del exponente “m” dentro del área de estudio, la cual varía entre 0.2 y 0.6. De otro lado, la longitud de la pendiente se evaluó con base en el píxel, el cual representa un polígono de 10 m x 10 m. Por lo tanto, se obtuvo un mapa del factor L que varía de 0 a 4.2 km (ver figura 109).

El grado de pendiente (S) influye considerablemente en la erosión del suelo, ya que es directamente proporcional a la cantidad de escorrentía superficial que se genera en una ladera por unidad de superficie y determina la velocidad de las aguas y su fuerza de arrastre. La influencia de la pendiente se estima a través del factor (S), mediante la siguiente ecuación:

$$S = (0.006541 \cdot s^2 + 0.045 \cdot s + 0.065) \quad [4.27]$$

Donde (S) es el factor de grado de pendiente y (s) es el valor de la pendiente de la ladera, expresada en porcentaje.

A través del sistema de información geográfica, se evaluó la ecuación de cálculo del grado de pendiente (S) para cada uno de los píxeles con pendientes encontradas en el área de estudio. Con base en este cálculo, las zonas con mayor grado de pendiente corresponden a aquellas que se encuentran en pendientes moderadas de colinas denudacionales y pendientes irregulares que conforman los cerros de La Popa, la loma del Marión y cerro de Albornoz (ver figura 110).

Después de hallar los factores de longitud de pendiente (L) y grado de pendiente (S), se realizó finalmente el cálculo del factor (LS) mediante la expresión:

$$LS = [(X/22.13)^m] \cdot (0.006541 \cdot s^2 + 0.045 \cdot s + 0.065) \quad [4.28]$$

De la ecuación se observa una mayor influencia en el factor (LS) del valor de la pendiente (s) que de la longitud de la pendiente (X) que depende de un exponente generalmente inferior a 0.6.

A continuación en las figuras 109 y 110 se muestran los mapas de factor de longitud de pendiente (L) y grado de pendiente (S) que se generaron.

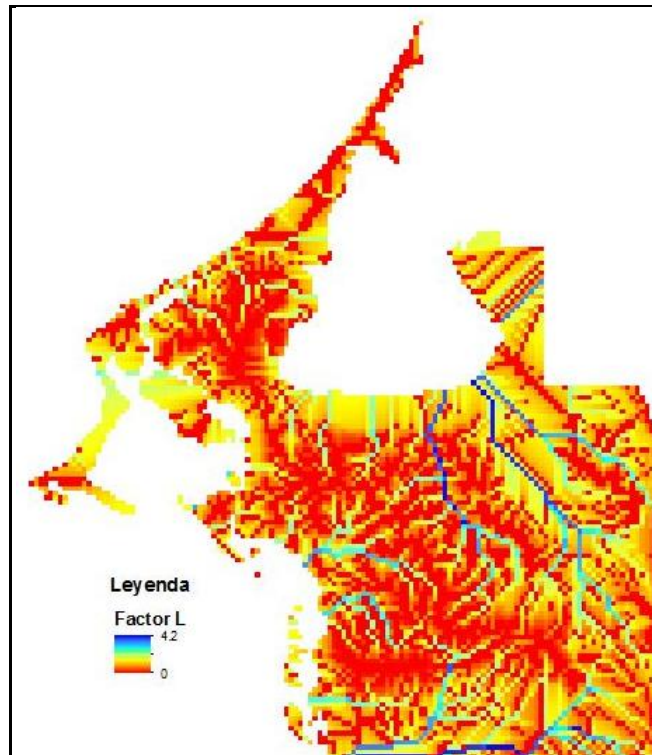


Figura 109. Mapa de factor de longitud de pendiente (L)
Fuente: El autor (2015)

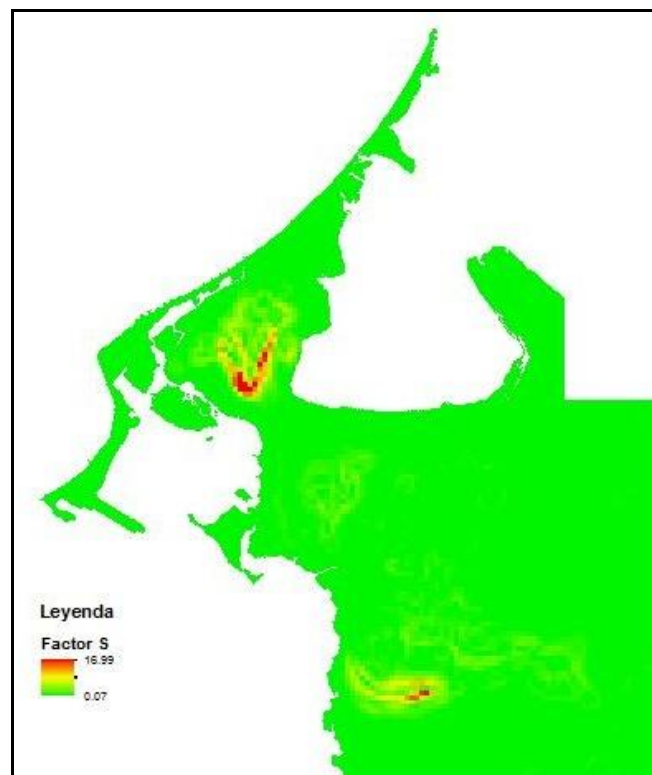


Figura 110. Mapa de grado de pendiente (S)
Fuente: El autor (2015)



❑ **Cálculo del factor de Cobertura vegetal (C)**

La cobertura vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad de la escorrentía superficial. Este factor recoge además de la influencia del tipo de vegetación existente, el manejo o disposición de los residuos que produce sobre el suelo. El factor C de la ecuación universal de pérdida de suelos, es adimensional y se define como el cociente entre las tasas de erosión para una parcela con una determinada cubierta vegetal y para esa misma parcela arada en surco continuo en la dirección de la pendiente, con las mismas condiciones de clima, suelo y relieve (Gonzalez-Del Tánago 1991).

El factor C, debe representar un promedio temporal de la protección que ofrece la vegetación del suelo, promedio que se recomienda estimar en las zonas agrícolas como función del tipo de cultivo y de los programas agrícolas. Para el cálculo del factor C se utilizaron las tablas de Wischmeier y Smith (1978) de cultivos agrícolas, que tienen en cuenta la forma y tipo de cultivo y las distintas rotaciones según el período del año.

Tipo y altura de cobertura	% de cobertura	Tipo	Cobertura de contacto con la superficie					
			% suelo cubierto					
			0	20	40	60	80	> 95
Muy poca cobertura	0	G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Cobertura malezas altas o arbustos (0.5 m de altura)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.13	0.11	0.760	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Cantidad apreciable de arbustos o rastrojos (2 m de altura)	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Presencia de árboles pero pocos arbustos (4 m de altura)	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

Cuadro 50. Valores del factor de cobertura vegetal (C)

Fuente: Tomado de Wischmeier y Smith (1978)

Los valores del factor C de las tablas de Wischmeier y Smith (1978) asumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo, (G) es la cobertura superficial de arbustos o vegetación herbácea, hojarasca y maleza, (W) es una cobertura superficial compuesta en su mayoría por hojas anchas, malezas con pocas raíces superficiales y residuos sin descomponer, la altura de copas se mide como altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación y el % de cobertura se considera aquella porción de terreno oculta por las copas en su proyección vertical.



Se utilizó como insumo de trabajo los mapas de cobertura vegetal y de aptitud y uso del suelo del casco urbano de la ciudad de Cartagena realizado por Ingeominas (2001a). Se asignaron valores de C a cada unidad de cobertura vegetal según lo propuesto en las tablas de Wischmeier y Smith (1978), esto se consignó en el cuadro 51. Finalmente, con base en los valores asignados del factor C, se realizó un mapa que muestra la distribución espacial del factor de cobertura vegetal en el área de estudio (ver figura 111).

Tipo de cobertura	Descripción	% de cobertura - Tipo - % suelo cubierto	Factor promedio (C)
Pastos (Pt)	Vegetación con altura inferior a 0.5 m	50% - G - 60%	0.035
Herbácea (Hb)	Vegetación con altura entre 0.5 y 2 m	25% - G - 20%	0.180
Arbustiva (Ab)	Vegetación con altura entre 2 y 10 m	50% - G - 20 %	0.160
Arbórea (Ar)	Vegetación con altura mayor a 10 m	50% - W - 60%	0.087
Zona con erosión (Ze)	Zona de laderas con pérdida de vegetación	0% - G - 0%	0.450
Zona sin cobertura o con poca cobertura (Zsc)	Zonas de uso urbano	Se trata de pavimentos y techos en su mayoría que no los afecta la erosión	0.003

Cuadro 51. Valores asignados del factor (C) a las unidades de cobertura vegetal

Fuente: Información tomada de Ingeominas (2001a) y del autor (2015)

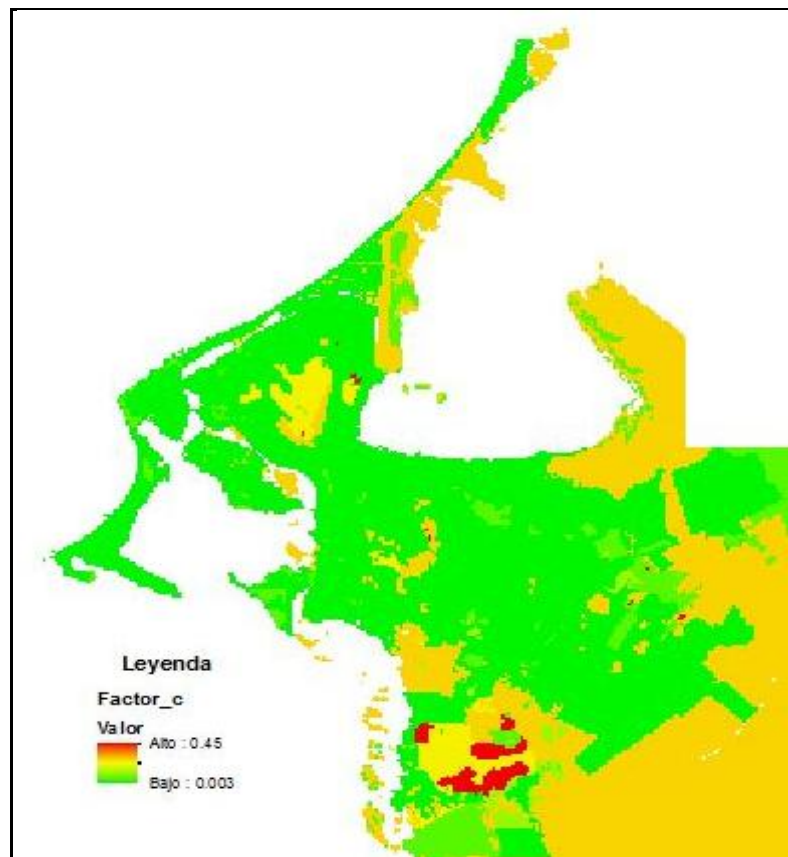


Figura 111. Mapa del factor de cobertura vegetal (C)

Fuente: El autor (2015)



❑ **Cálculo del factor de prácticas de manejo (P)**

Este factor recoge la influencia que tienen las prácticas de manejo o conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando los trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo las curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía. El factor P de la ecuación universal de pérdida de suelos, se refiere al porcentaje de las pérdidas de suelo que tiene una parcela considerada en conjunto, frente a las que tendría sin la práctica de conservación (Gonzalez-Del Tánago 1991).

El factor P varía entre cero (0) y uno (1). Se asigna un valor de cero (0) o un valor cercano para áreas donde se controlen efectivamente los procesos erosivos a través de obras estructurales y de control agroforestal, mientras que se considera un factor P igual a uno (1) para zonas con prácticas de cultivo inadecuadas como el arado y cultivos en el mismo sentido de la pendiente o para aquellas zonas sin ningún tipo de prácticas agroforestales.

Se determinaron los valores del factor (P) a partir de lo planteado por el Ministerio del Medio Ambiente de España (1998), siguiendo la metodología desarrollada por Ingeominas (2001-2003), esto se consignó en el cuadro 52.

Prácticas de conservación de suelos	Factor P
En curvas de nivel (1 al 16% pendiente)	0.6
En curvas de nivel (15 al 25% pendiente)	0.85
Terrazas (desagües con césped)	0.14
Terrazas (desagües subterráneos)	0.05
Hoyos de nivel	0.13
Sin prácticas de conservación	1.0

Cuadro 52. Valores del factor de prácticas de manejo (P)

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, España (1998) en Ingeominas (2001-2003)

El área de estudio en general no presenta prácticas de conservación de suelos, más allá de algunos proyectos aislados de intervención localizada de zonas verdes, por lo tanto se considera un valor constante de 1.0 para toda la zona de interés.

Resultados Erosión

El modelo empírico de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE, es aplicable solo a materiales del horizonte pedológico, por lo tanto los resultados en valores de erosión (E) expresados en (T/ha/año) sirven de índice relativo para estimar un potencial de pérdida por erosión pluvial de los suelos.

El mapa de erosión obtenido a través de SIG se ajustó teniendo en cuenta que se trabajó toda el área del casco urbano de Cartagena y no el área específica de movimientos en masa. El SIG produjo un conjunto de datos que cubren un área total de 81.34 Km² mediante pixeles de 10 m x 10 m, obteniendo una variación de la erosión potencial de 0 a 38.39 T/ha/año.

El grado de erosión siguiendo la clasificación propuesta FAO (1980) para los valores de pérdida de suelo (ver cuadro 53), se ha considerado de la siguiente forma:



Grado de erosión	Rango considerado (T/ha/año)
Muy alta	> 70
Alta	50 - 70
Moderada	30 - 50
Baja	< 30

Cuadro 53. Clasificación sugerida del grado de erosión

Fuente: Tomado de FAO (1980) y ajustado por el autor (2015)

Según IDEAM (2001) la región Caribe presentaba para la época porcentajes de erosión en sus suelos que abarcaban alrededor del 94% del territorio, y casi el 52% de la superficie afectada por procesos erosivos altos a muy altos (ver cuadro 54), porcentajes que expresan la severidad del problema aun hoy en día.

Grado de erosión	% área afectada
Muy alta	35
Alta	15
Moderada	20
Baja	18
Muy baja	4
Sin erosión	6
Total	100

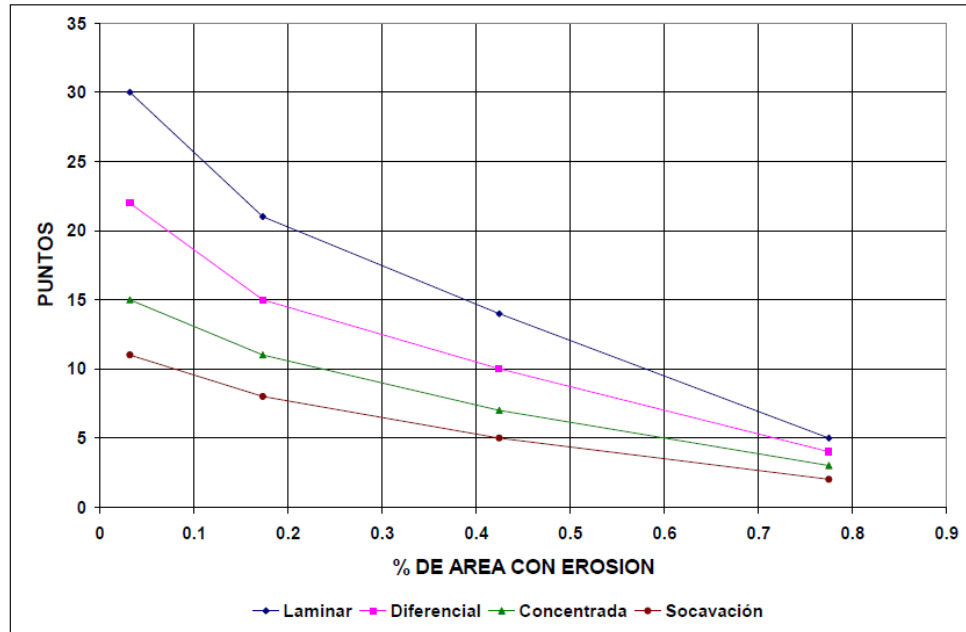
Cuadro 54. Porcentaje de erosión en la región Caribe

Fuente: Tomado de IDEAM (2001). Subdirección de suelos.

Teniendo en cuenta los datos de referencia de la FAO (1980) y la información del IDEAM (2001) para la región Caribe, se considera utilizar la siguiente escala de erosión para la ciudad de Cartagena.

Clase	Erosión (T/ha/año)
Muy baja	0 - 5
Baja	5 - 12
Media	12 - 25
Alta	25 - 38
Muy alta	> 38

Relación puntaje vs Tipo de erosión: A continuación se muestra la correlación de los tipos de erosión con los puntajes definidos por Ramírez (1988) en la metodología SES, para el parámetro erosión, a través de una representación gráfica, la cual se ilustra en la gráfica 21.



Gráfica 21. Correlación de puntajes y tipo de erosión

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001-2003)

Los puntajes por erosión (PE) propuestos por Ramírez (1988) varían en el rango de 2 a 35, de modo inversamente proporcional, siendo el puntaje igual a 2 un tipo de erosión muy severa, mientras que el puntaje de 35 se asigna cuando no existe erosión o cuando los procesos erosivos son de poca significancia.

Con base en los valores de erosión (E) expresados en T/ha/año que se obtuvieron del SIG para la ciudad de Cartagena, se encontró que la mejor distribución exponencial de puntaje (PE) viene dada por la siguiente expresión:

$$PE = 35 \cdot \exp(-b \cdot E) \quad [4.29]$$

Donde $b = [\ln(35/2)] / E_0$. Esta distribución planteada por Ingeominas (2001-2003), es aplicable al caso de la Cartagena, donde $E_0 = 38.39$ T/ha/año, por lo tanto se obtuvo que $b = 0.0753211$. La ecuación del parámetro Erosión para Cartagena queda expresada de la siguiente forma:

$$PE = 35 \cdot \exp(-0.0753211 \cdot E) \quad [4.30]$$

Los puntajes por erosión (PE) asignados a la ciudad de Cartagena varían en el rango de 2 a 35, de conformidad con la ecuación obtenida y la metodología SES.

En las figuras 112 y 113 se muestran los mapas generados de potencial de erosión y de calificación del parámetro erosión (E) respectivamente, producto de los análisis realizados.

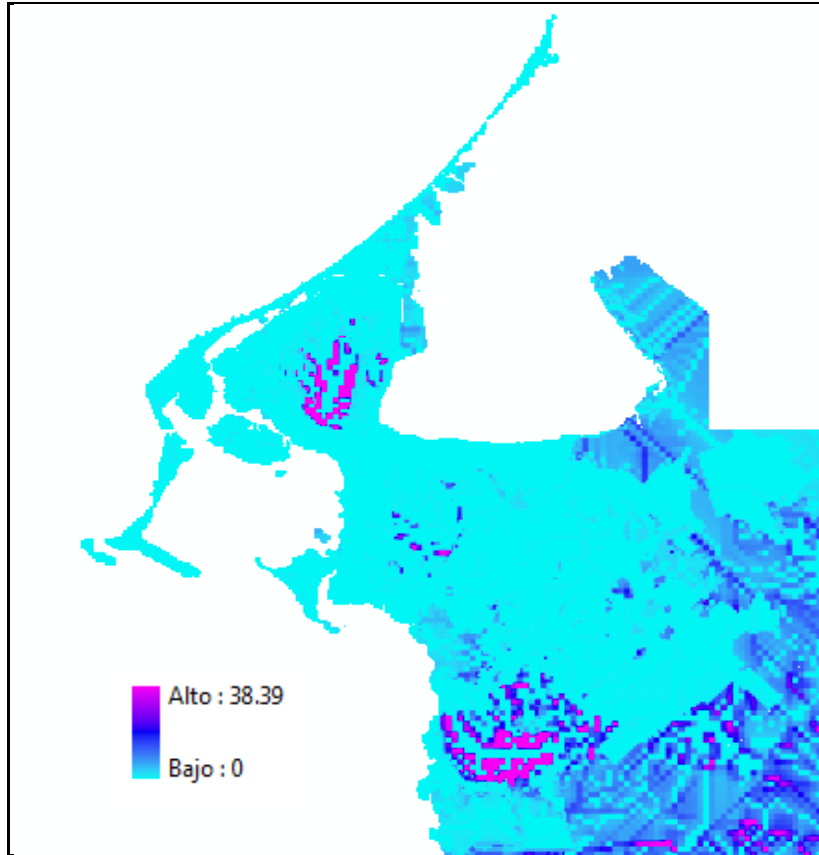


Figura 112. Mapa de potencial de erosión (E)
Fuente: El autor (2015)

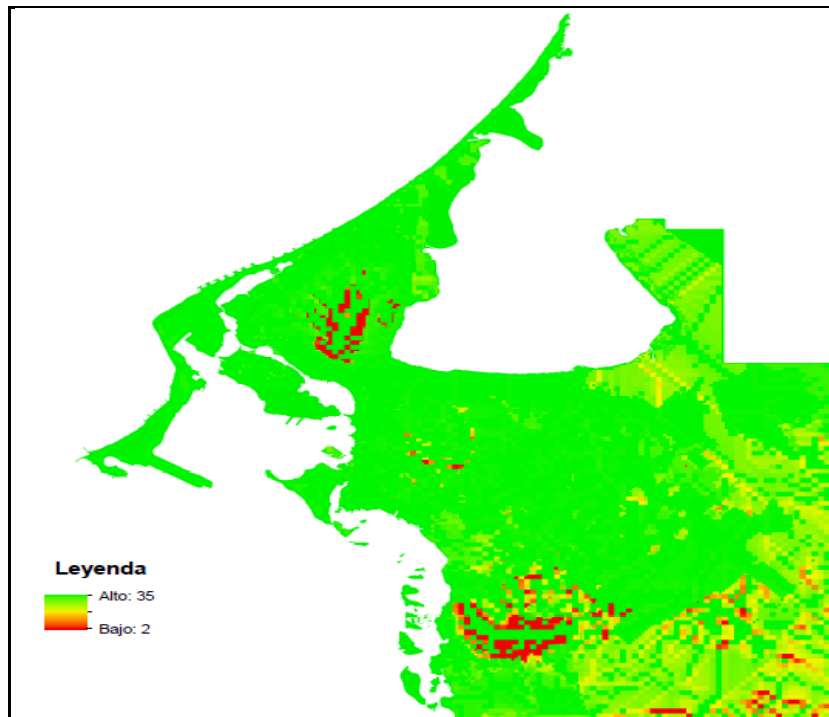


Figura 113. Mapa de calificación del Parámetro erosión (E)
Fuente: El autor (2015)



4.2.4. Parámetro Efecto Antrópico (A)

El efecto antrópico por su naturaleza variada se configura como un factor de cambio dentro del medio físico, rompiendo el equilibrio de los materiales, la vegetación y el agua, lo cual genera inestabilidad de las laderas, convirtiéndose la acción del hombre en factor contribuyente o detonante de deslizamientos.

Algunas de las causas que han llevado al deterioro del medio ambiente en la ciudad de Cartagena a través del efecto antrópico son la invasión y colonización de zonas no aptas para urbanizar, deforestación por talas de vegetación nativa y por disposición inadecuada y quema de residuos sólidos, afectación de rondas, vertimiento indiscriminado de aguas grises y negras, y excavaciones para adecuación de terrenos en zonas de ladera, entre otros.

La cobertura vegetal es un factor determinante para la estabilidad de los suelos (a mayor vegetación natural, mayor calidad de los suelos), especialmente en lo referente al control de erosión, por lo tanto contribuye a prevenir movimientos en masa superficiales. Sin embargo en las zonas de laderas de la ciudad de Cartagena, la cobertura vegetal ha sido altamente intervenida y de esta acción se desprenden muchos de los casos de deslizamientos reportados.

Metodología Efecto Antrópico

El análisis del factor antrópico en el presente trabajo se enfocó en la valoración de la tasa de deforestación de las zonas de laderas de Cartagena como elemento contribuyente en la ocurrencia de deslizamientos, siguiendo los lineamientos generales propuestos por Ingeominas (2001-2003).

Se utilizó el mapa de cobertura vegetal generado por Ingeominas (2001a) y se comparó con información obtenida de campo actual (2014), la cual se enfocó hacia algunos puntos de interés en la zona de laderas. Con base en la información recolectada de ambas épocas, se definieron aquellas zonas en las cuales se han generado procesos de pérdida de cobertura vegetal, procesos de revegetalización y aquellas zonas que aparentemente se mantienen sin cambios significativos, ya sea urbanizada, deforestada o con vegetación.

Las unidades de cobertura vegetal se calificaron siguiendo el procedimiento de la metodología SES. En el caso del mapa de cobertura vegetal generado por Ingeominas (2001a) se tomaron las calificaciones que se muestran en el numeral respectivo. Para evaluar la intervención antrópica del área de estudio se compararon las calificaciones del parámetro vegetación para ambas épocas: Años 2014 y 2001, determinando una diferencia entre ellas, donde los resultados positivos indican que se recuperó la cobertura vegetal y resultados negativos indican zonas en las cuales ocurrió deforestación.

Relación puntaje vs Efecto antrópico: Se definió la correlación del factor antrópico con los puntajes de Gonzalez y Millan (1998) definidos en la metodología SES, con relación al efecto antrópico (EA). Con base en la diferencia de calificaciones del parámetro vegetación para ambas épocas, que representan la intervención antrópica para Cartagena, se encontró que la mejor distribución de puntaje ajustada (PA) viene dada por la siguiente expresión:

$$PA = 3,2 \cdot \exp^{(0,1 \cdot EA)} \quad [4.31]$$



Los puntajes por efecto antrópico (PA) asignados a la ciudad de Cartagena varían actualmente en el rango de 10 a 35, de conformidad con la ecuación obtenida y la metodología SES. El valor de 10 representa una zona con pérdida de vegetación, muy intervenida, mientras que 35 se asigna a zonas sin urbanizar, poco intervenidas y/o con procesos de revegetalización.

En las figuras 114 y 115 se muestran los mapas generados de intervención antrópica entre los años 2001 a 2015 y de calificación del parámetro efecto antrópico (A) respectivamente, producto de los análisis realizados.

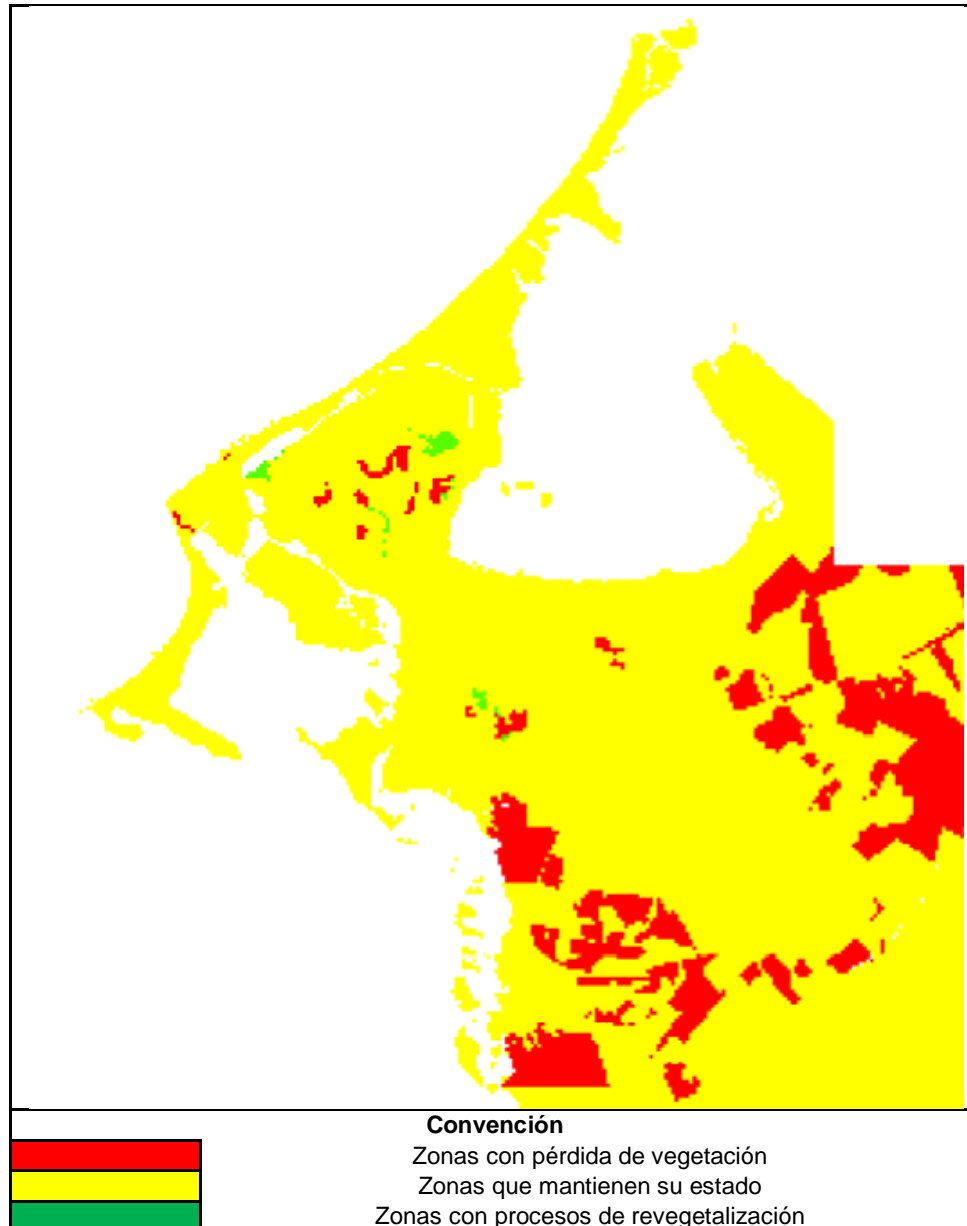


Figura 114. Mapa de Intervención Antrópica entre años 2001 y 2015

Fuente: El autor (2015)

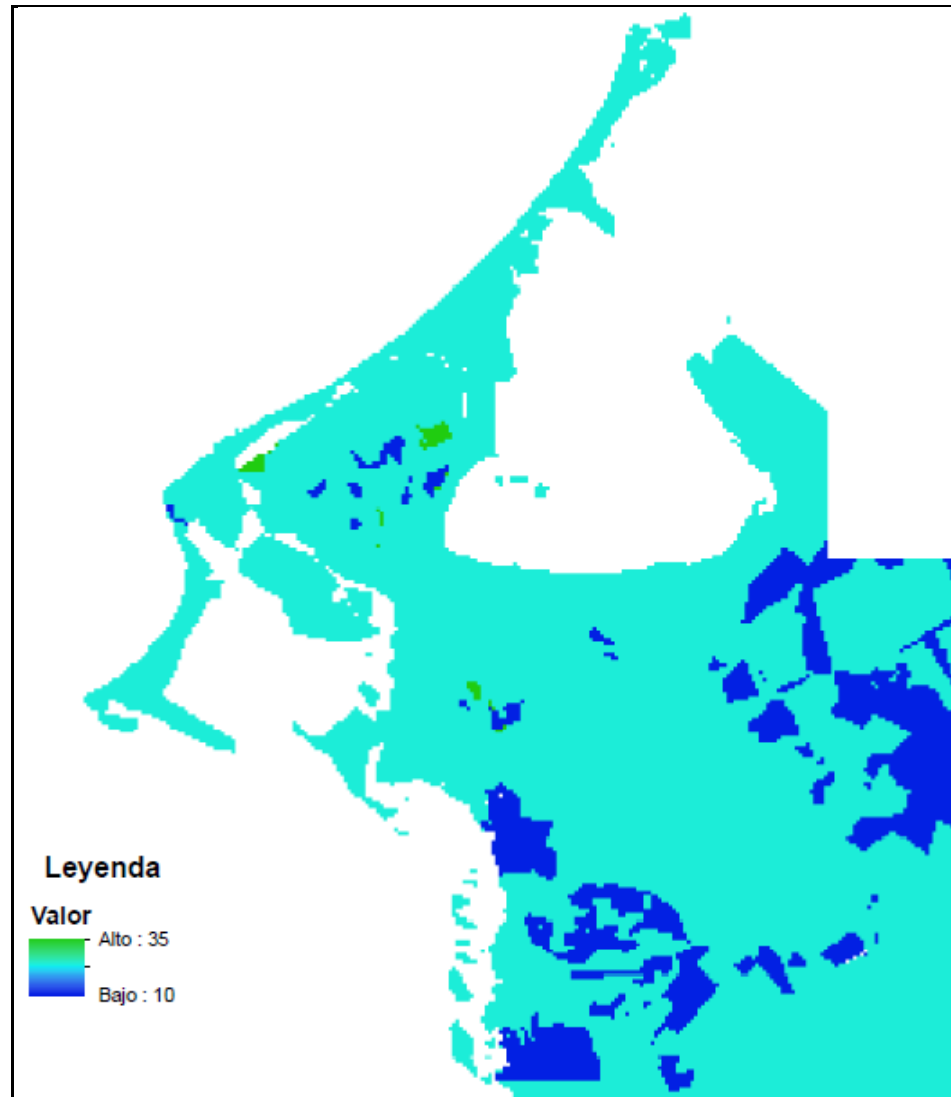


Figura 115. Mapa de calificación del Parámetro Efecto Antrópico (A)

Fuente: El autor (2015)



Capítulo 5. Procesos de inestabilidad característicos de Cartagena

El capítulo 5 describe los principales procesos de inestabilidad de la ciudad de Cartagena que se dan especialmente en las zonas de cerros circundantes, a través de movimientos en masa que se reactivan periódicamente por efecto de las características geológicas, geomorfológicas y climáticas del lugar, afectando a la comunidad que allí reside. Se realizó un inventario general de procesos de inestabilidad que permitió identificar y seleccionar los movimientos característicos en la ciudad (ver Anexo A).

Entre los procesos de remoción en masa característicos de la ciudad de Cartagena se encuentran los que tienen lugar en el cerro de La Popa y en sus estribaciones como son el del sector del sur del Salto del Cabrón, loma del Diamante, barrio Lo Amador sector Ricaurte y loma del Peyé. Por otro lado, en la loma de Marión se han presentado en las últimas dos décadas procesos de inestabilidad en los sectores vecinos de Nueva Granada y Manzanares y hacia el barrio de Zaragocilla (ladera hospital San Pablo). Adicional a los movimientos en masa citados anteriormente se hace una breve descripción en otros sitios de la ciudad, de algunos procesos relacionados.

5.1. Descripción y análisis de los PRM

La descripción y análisis de los procesos de remoción en masa seleccionados se realizó tomando como guía lo expuesto en la clasificación de Varnes (1958). A continuación en la figura 116 se muestra la localización de los PRM citados dentro de la ciudad de Cartagena (ver cuadro 55).

N°	Tipo	Sitio	Fecha de inicio
1	Flujo de detritos	Loma del Diamante (Torices)	1960
2	Deslizamiento	Lo Amador sector Ricaurte	2004
3	Flujo de detritos	Loma del Peyé	1995
4	Deslizamiento	San Francisco	1998
5	Deslizamiento	Nueva Granada - Manzanares	1995
6	Flujos de detritos	Salto del cabrón	1945*

**Nota: Este mecanismo de falla inició como deslizamiento.*

Cuadro 55. Resumen de los PRM en estudio

Fuente: El autor (2015)



Figura 116. Mapa de localización de PRM estudiados

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y editado por El autor (2015)

5.1.1. Flujo de detritos: Loma del Diamante

Se localiza al noroccidente del casco urbano de Cartagena, en el barrio Torices, en una de las estribaciones del cerro de La Popa. La loma del Diamante ha sido afectada por procesos denudacionales que comprenden procesos erosivos moderados y movimientos en masa principalmente del tipo flujo de detritos, localizados aproximadamente sobre las coordenadas $10^{\circ} 25' 42,53''N$ y $75^{\circ} 32' 9,51'' O$.

La erosión que afecta la loma del Diamante está asociada al desprendimiento y arrastre moderado de arcillolitas, limolitas y areniscas de origen calcáreo por acción de la escorrentía superficial y la carencia de vegetación nativa en algunas zonas de ladera. En otras zonas se evidencia la formación de surcos y cárcavas localizadas, de una profundidad hasta de 0,5 m. Estos procesos erosivos han alterado y moldeado en los últimos años la morfología de la loma, en especial hacia sus flancos sur y oriental (ver figura 117), donde se detecta en la parte superior de la loma roca caliza arrecifal muy meteorizada perteneciente al conjunto inferior de la Formación calcárea de La Popa y en la parte intermedia de ladera se detecta una unidad de predominio detrítico (conjunto superior de la Formación Bayunca) constituida de arcillolitas y limolitas pardas claras intercaladas con delgadas capas de areniscas pardas muy resistentes, localmente conglomeráticas y en ocasiones friables. En general, los estratos presentan una posición sub-horizontal y están afectados por fisuración moderada.



Figura 117. Laderas de la loma del Diamante afectadas por procesos denudacionales
Fuente: UDC-AMC (2009a)

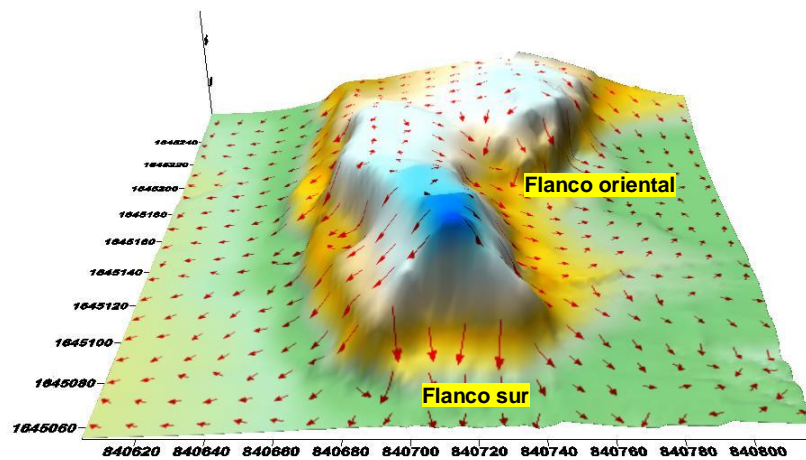


Figura 118. Modelo 3D de la loma del Diamante y dirección de la escorrentía superficial
Fuente: UDC-AMC (2009a)



En algunas zonas de la parte intermedia de las laderas se presentan bloques meteorizados de roca caliza, embebidos en matriz areno-arcillosa de estado medio a suelto y permeable que han generado posteriormente caídas y flujo de detritos debido al aporte de las aguas lluvias y al vertimiento indiscriminado de aguas grises y negras por parte de asentamientos ubicados en la parte superior de la loma.

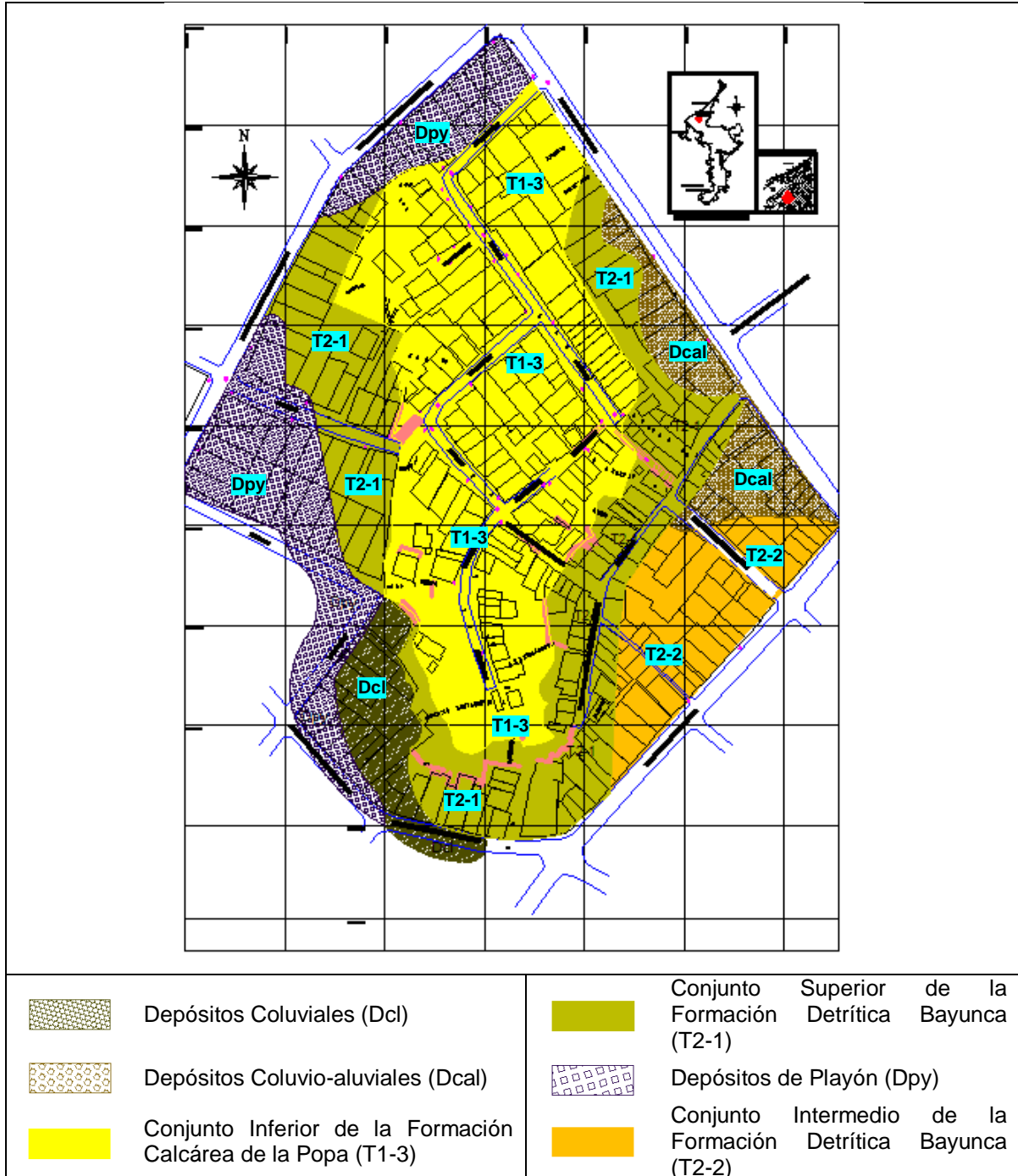


Figura 119. Mapa Litológico de la Loma del Diamante

Fuente: UDC-AMC (2009a)



En la loma del Diamante se realizaron exploraciones del subsuelo (UDC-AMC 2009a), por medio de ensayos de penetración estándar (SPT) y apiques, detectando hacia la base del flanco sur a nivel superficial y hasta 5 m de profundidad arcilla limosa de color pardo a amarillo con presencia de vetas grises y óxido y rastros de gránulos calcáreos de consistencia media a firme, relacionados con la Formación detrítica Bayunca, mientras que hacia la parte nororiental se presentan depósitos coluvio-aluviales por efecto de la sedimentación generada por la gravedad y las corrientes de agua de tipo torrencial. Hacia el noroccidente de la loma se detectó arena limo-arcillosa de color pardo oscuro con presencia ocasional de pequeños fragmentos de caliza, asociada con antiguos depósitos de playón (ver figura 119).

A nivel geomorfológico, la zona de estudio clasifica como una loma, posee una altura de 26 msnm, presenta una cima amplia aplanada, las laderas son en su mayoría convexas, hacia el flanco sur la inclinación alcanza los 70°, mientras que en los demás flancos las pendientes varían entre 25° y 52°.

Es importante destacar que en la zona de estudio se distingue la unidad morfológica del tipo pedimentos de acumulación con declives entre 1° y 3° localizados hacia la base de los flancos occidental y oriental, por efecto de la erosión diferencial, mientras que hacia la parte suroccidental se presenta un coluvión conformado por fragmentos de material calizo de tamaños del orden de 0,1 m embebidos en una matriz arenosa gruesa, de tonalidad gris clara y presencia de limos.

La ocurrencia de los procesos denudacionales de la loma se ha potenciado por la actividad antrópica, en la cual se evidencian excavaciones y cortes realizados en zonas de laderas para localización de asentamientos irregulares y ampliación de lotes, alteración de drenajes naturales y vertimiento de aguas servidas y residuos sólidos de los asentamientos localizados en la parte alta de la loma.

Los flujos de detritos es el mecanismo de falla más relevante en la loma, son ocasionales y presentan movimientos rápidos, en razón de la morfológica de la zona, en especial hacia el flanco sur y oriental. Del mismo modo se generan flujos de tierra de materiales finos de predominio arcillo-limoso, dependiendo del contenido de agua y de la velocidad en función de la inclinación de las laderas, que originan desplazamientos con formas lobuladas en su extremo inferior y por consiguiente la formación de surcos en la superficie, acentuada por la escorrentía superficial. Otros movimientos en masa que se presentan en la loma, pero en menor medida son las caídas de roca y deslizamientos rotacionales menores.

Las caídas se presentan esporádicamente hacia el flanco sur de la loma, al desprenderse bloques de roca caliza de manera rápida que caen libremente desde una masa meteorizada compuesta también por fragmentos o detritos calcáreos antes de la falla, por lo tanto estas caídas se consideran predominantemente secundarias.

En cuanto a las consecuencias de estos movimientos en masa, en marzo de 2014 se presentó un deslizamiento de tierra que afectó 2 viviendas, hubo una pérdida humana y varias familias afectadas. Durante años se han presentado ocasionalmente procesos de inestabilidad en la zona que ponen en riesgo las personas que habitan asentamientos irregulares, especialmente en la parte alta de la loma (ver figura 120).



Fuente: Periódico El Universal (2004)

Fuente: UDC-AMC (2009a)

Figura 120. Asentamientos irregulares en la parte alta de la Loma del Diamante

Los trabajos de recuperación de la zona de estudio deben ir encaminados al control de los flujos de detritos a través de la ejecución de obras de protección sobre aquellas zonas de ladera desprovistas de vegetación nativa, realizando corte y perfilamiento de los taludes que lo requieran, revegetalización con biomanto y especies nativas funcionales, protección de material calizo mediante pantalla de revestimiento de concreto lanzado y malla eslabonada fijada con pernos, instalación de muros en gavión en aquellas zonas de flujo periódico, construcción de canales, cunetas y lechos filtrantes para el manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales y mediante estructuras de fijación de sedimentos para impedir la profundización de surcos y cárcavas.

5.1.2. Deslizamiento rotacional: Lo Amador

Se localiza al noroccidente del casco urbano de Cartagena, en el barrio Lo Amador, sector Ricaurte, en una de las estribaciones del cerro de La Popa, llamada antiguamente cerro Le Franc. Este movimiento en masa se ubica sobre las coordenadas $10^{\circ} 25' 26,40''$ N y $75^{\circ} 31' 59,23''$ O en la parte sur del cerro.

Morfológicamente este sector presenta sistemas de lomerios de una altura máxima de 39 msnm, la cima del cerro ha sido explanada naturalmente con el paso del tiempo y en ella se encuentra actualmente emplazado el colegio de La Salle. Las laderas existentes son en su mayoría convexas y poseen pendientes que varían entre 25° y 53° .

En la zona límite entre el colegio de La Salle y el barrio Lo Amador, donde se dispone el cerramiento de dicha institución educativa, se presenta una zona escarpada de una longitud de por lo menos 250 m y altura máxima de 7 m, producto del deslizamiento en mención y procesos erosivos (ver figura 121). También se distinguen pedimentos por erosión hacia la base de la ladera, que se relacionan con las arcillolitas del conjunto inferior de la Formación Detrítica Bayunca, poseen pendientes hasta de 10° y se caracterizan por la presencia de surcos de 20 cm de profundidad. Estos pedimentos se encuentran cubiertos por rellenos de arcilla parda con presencia de gravas calizas producto probablemente del arrastre de materiales asociados con el proceso de escorrentía superficial.



Figura 121. Vista parcial del Deslizamiento Lo Amador, Sector Ricaurte

Fuente: Tomado de UDC-AMC (2009a) y editado por el autor (2015)

En la zona del deslizamiento Lo Amador y área de influencia (2.1 hectáreas) se realizaron exploraciones del subsuelo (UDC-AMC 2009a), por medio de ensayos de penetración estándar (SPT) y apiques (ver figura 123) detectando a nivel superficial rellenos variados de arena y arcilla limosa con presencia de gravas y escombros de construcción, de 1 m de espesor. Subyaciendo y hasta una profundidad de 8 m se encontró arcilla predominantemente limosa, de color entre grisáceo y pardo claro a amarillento, de baja plasticidad, de consistencia medio firme a dura, con vetas grises, vetas amarillentas y/o óxido.

Hacia la parte intermedia de la ladera, este material arcilloso presenta intercalaciones de areniscas arcillosas color gris pardo y grano fino a una profundidad de 2 m, relacionadas con el conjunto inferior de la Formación Detrítica Bayunca (T2-3), mientras que hacia la parte superior del cerro, los materiales se hacen más arenosos y calcáreos, cambiando la litología al conjunto intermedio de dicha formación (T2-2). Estas formaciones geológicas del sector se pueden apreciar vistas en planta en la figura 122.

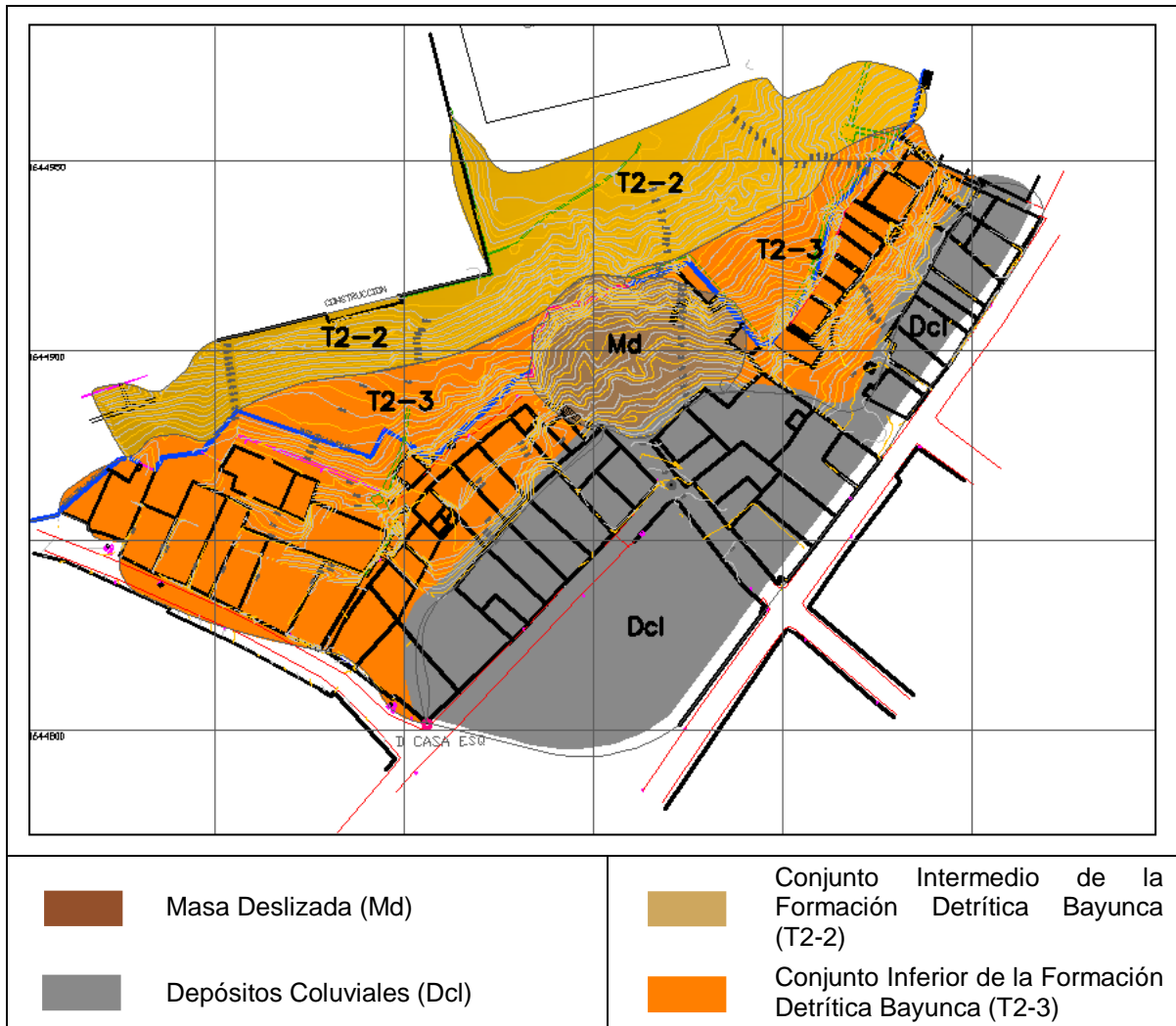


Figura 122. Mapa Litológico de Lo Amador, Sector Ricaurte

Fuente: UDC-AMC (2009a)

Hacia la base de la ladera localizada al suroriente de la zona de estudio se han formado depósitos coluviales de un espesor probable entre 1 y 5 m, constituidos de arcillas y areniscas calcáreas, que han sido movilizadas por erosión, antiguos procesos de remoción en masa y por la acción de la escorrentía superficial. En las exploraciones realizadas se detectaron a diversas profundidades fragmentos y gránulos de caliza embebidos en matriz arenosa calcárea de grano grueso, que también hacen parte de los depósitos coluviales.



Figura 123. Ejecución de SPT en el sector Lo Amador
Fuente: UDC-AMC (2009a)

Es importante mencionar que la UDC-AMC (2009a) consideró la zona del deslizamiento como una unidad litológica de "*masa deslizada*" (Md), pese a su carácter morfológico, en la cual los materiales de relleno en estado suelto a medio se han movilizad

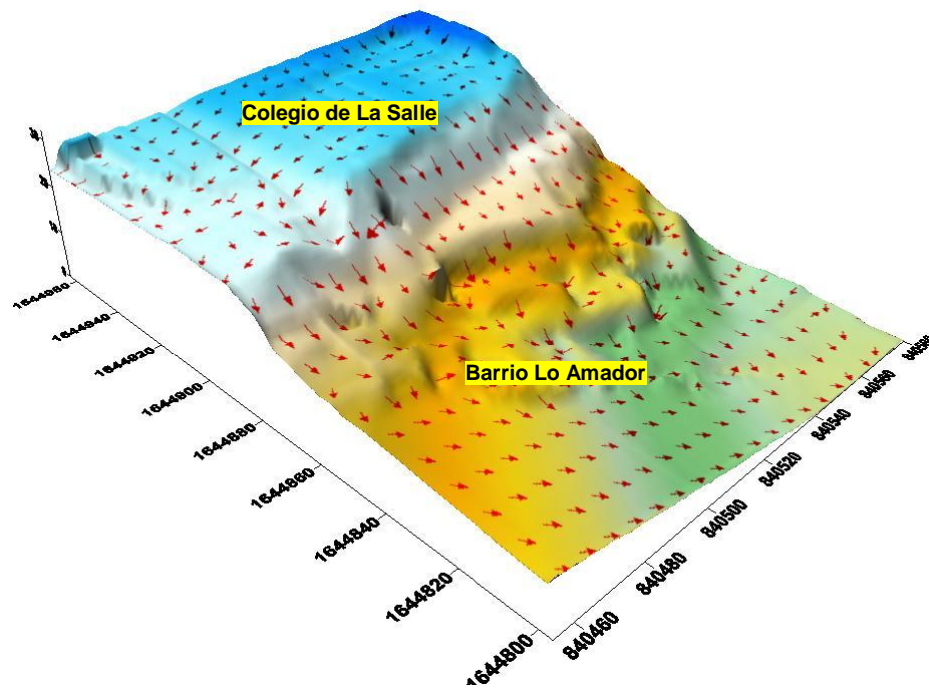


Figura 124. Modelo 3D de Lo Amador y dirección de la escorrentía superficial
Fuente: UDC-AMC (2009a)



El deslizamiento de Lo Amador se caracteriza por el desplazamiento de una masa de suelo, semi-deformada, cuya superficie de falla se considera curva y cóncava hacia arriba. Este movimiento en masa presenta una superficie de falla de por lo menos 42 m de longitud, ancho de 35 m y profundidad aproximada que varía entre 7 y 10 m. El escarpe principal de 70 m de longitud y altura de 7 m expuesto en la corona del deslizamiento constituye la forma de una "cuchara", por lo tanto se trata de un movimiento simple rotacional (ver figura 125). La corona del deslizamiento con el tiempo se ha inclinado hacia atrás aproximadamente metro y medio, hacia la pendiente, generando movimientos retrogresivos en la zona del cerramiento del colegio. En su momento era evidente la formación de escarpes secundarios a media ladera por efecto de desplazamientos diferenciales de una altura del orden de 2 m, los cuales se han ido deformando paulatinamente.

Una de las principales causas del deslizamiento Lo Amador, está relacionada con las características de los materiales térreos que allí se encuentran. Las areniscas calcáreas sobre las que se desarrolla el movimiento en masa son friables y frágiles, lo cual facilita una rápida acción de los agentes meteorizantes. De otra parte, está la influencia de la intervención antrópica de la parte intermedia alta de la ladera, mediante sobrecargas, cortes y rellenos anti-técnicos representados en la construcción de asentamientos irregulares, hoy reubicados, que en su momento aportaron a la inestabilidad.



Figura 125. Vista frontal del escarpe principal del deslizamiento Lo Amador

Fuente: UDC-AMC (2009a)

En cuanto a las consecuencias del deslizamiento Lo Amador, en octubre de 2006 se presentó un deslizamiento de tierra que solo averió varias viviendas al pie de la ladera. Durante los últimos 20 años se han presentado en época invernal procesos de inestabilidad en la zona que han generado situaciones de riesgo sobre las personas que habitan en cercanías.



Los trabajos de recuperación del sector deben ir encaminados al control de nuevos movimientos en masa a través de la ejecución de obras de contención, en principio al pie de la ladera, donde actualmente la zona se encuentra urbanizada, realizar corte y perfilamiento de las laderas que lo requieran hasta ángulo de reposo, uso de enrocado de protección y revegetalización con especies nativas funcionales a media ladera y en la parte alta en terrenos del Colegio de La Salle y fuera de ellos, ejecución de malla de pilotes de concreto para mitigar la generación de nuevas superficies de falla, construcción de canales, cunetas, cuencos disipadores y lechos filtrantes para el manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales y mediante estructuras de captación de sedimentos para impedir la profundización de surcos y cárcavas.

Deslizamiento: Lomas del Rosario

Se considera pertinente citar el deslizamiento que se presenta en las Lomas del Rosario, en el sector de Nariño (calle 36 A con carrera 20), que aunque no es objeto del presente análisis, es cercano al movimiento de Lo Amador (calle 35 con carrera 19) y se ubica al nororiente en una estribación vecina. Se trata de un movimiento antiguo, el cual se reactivó en el año 2010 por causa de la ola invernal y de las continuas intervenciones antrópicas del sector, especialmente la construcción de asentamientos en la corona del deslizamiento. Este movimiento cubre un área aproximada de 0.4 hectáreas sobre el conjunto intermedio de la Formación Detrítica Bayunca (T2-2), constituido en ese sector por intercalaciones de arcillolitas calcáreas de color pardo claro con areniscas arcillosas de grano muy fino y color pardo grisáceo. Aunque no se tiene información precisa acerca del espesor promedio de la masa deslizada, por inspección visual se cree que su máxima profundidad podría estar en el orden de 3,5 m (ver figura 126).



Figura 126. Vista parcial del escarpe principal del deslizamiento: Lomas del Rosario

Fuente: El autor (2011)



En noviembre de 2010 un total de 7 familias cuyas casas se encontraban en riesgo inminente por el deslizamiento fueron reubicadas a otras zonas. En la actualidad se han presentado intentos de reasentamientos en la corona del deslizamiento por parte de terceros.

5.1.3. Flujo de detritos: Loma del Peyé

Se localiza al norte del casco urbano de Cartagena, en una de las principales estribaciones del cerro de La Popa, al oriente del mismo, llamada Loma del Peyé. Se trata de un sistema de lomerios con elevaciones de hasta 50 m, en especial hacia el Colegio Fundación Pies Descalzos, donde las cimas son muy amplias, de formas redondeadas y elongadas, laderas en su mayoría convexas, con pendientes entre 14° y 39° .



Figura 127. Laderas de la loma del Peyé afectadas por procesos denudacionales

Fuente: Arriba: UDC-PNUD (2014) y Abajo: Barboza (2011)



En el sector noroccidental de la loma se presentan laderas cóncavas de una inclinación no mayor a 15° , mientras que hacia el sector oriental se evidencian laderas convexas de pendientes de hasta 70° que conforman escarpes de antiguas zonas de explotación de materiales de construcción, las cuales son relativamente inestables y han sido invadidas en la corona y pie de la ladera (ver figura 127).

En el sector se destacan movimientos en masa especialmente hacia la parte suroriental de la loma del tipo flujo de detritos y en menor proporción de caídas de roca, sobre las coordenadas $10^\circ 25' 31,51''$ N y $75^\circ 31' 3,71''$ O.

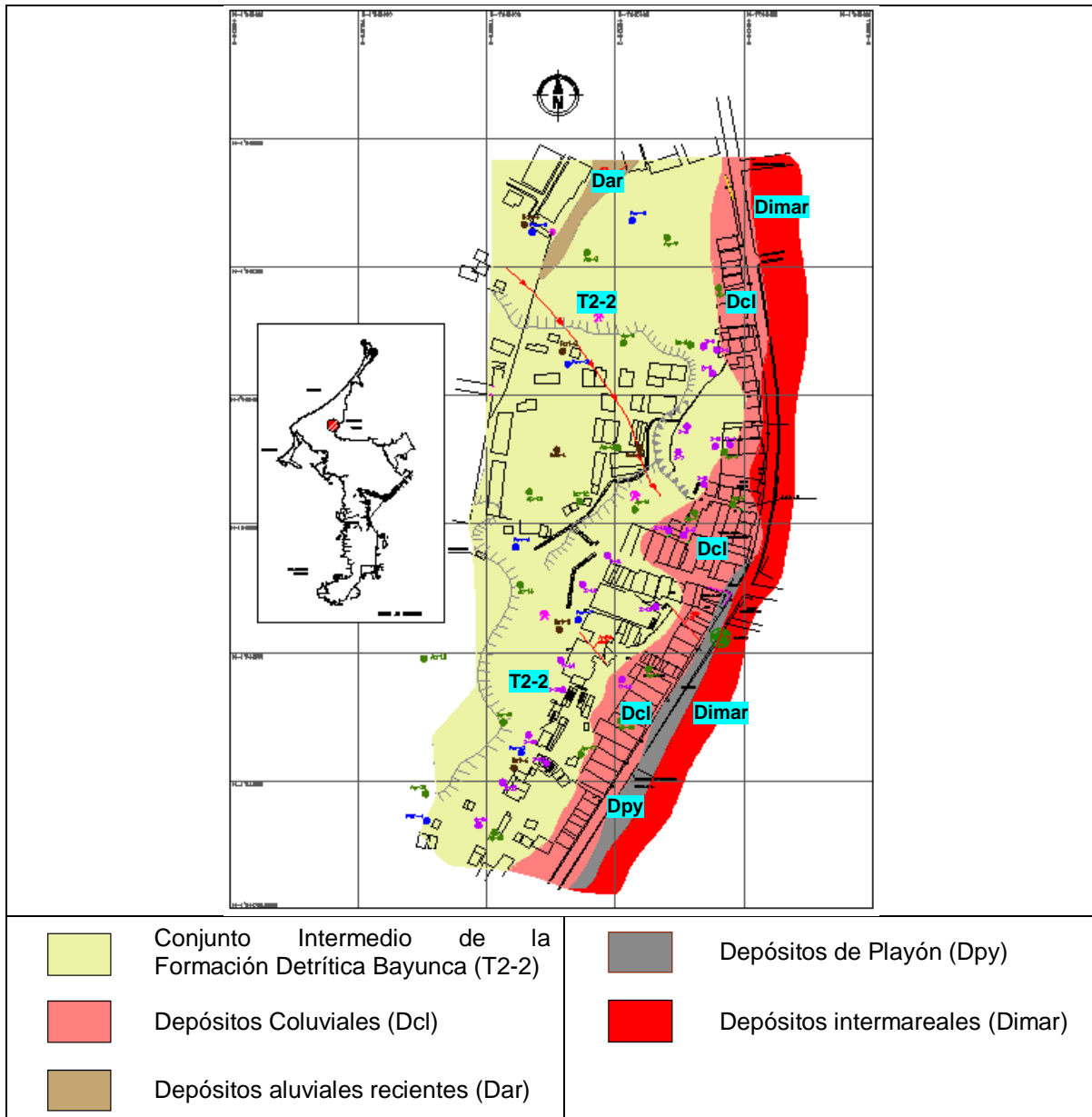


Figura 128. Mapa Litológico de la loma del Peyé, Sector Oriental

Fuente: Consorcio DJU (2009)

Morfológicamente este sector del Peyé se caracteriza por la existencia de zonas muy escarpadas que han sido modeladas por intensos procesos de erosión en surcos y



cárcavas que a su vez han dado lugar a la generación de flujo de detritos y caídas de roca caliza meteorizada. Es importante destacar como se mencionó con anterioridad que varias zonas escarpadas tienen su origen en antiguas zonas de explotación de materiales de construcción.

En la parte baja de la loma, hacia el sector oriental se han formado coluviones, producto de la desintegración y alteración de materiales calcáreos (causada por los procesos denudacionales), los cuales se han ido acumulando paulatinamente. Estos depósitos coluviales están constituidos por bloques de tamaño del orden de 0.5 m de arenisca calcárea y caliza localmente muy meteorizada y dispuesta en forma caótica, que se encuentran embebidos en una matriz arenosa localizada en la base de los escarpes conformados por procesos de remoción en masa.

A finales de la década de los 40's el nivel del agua de la ciénaga de la virgen se encontraba muy cercano a la base de la loma del Peyé, sobre el sector suroriental; se determinó la existencia de antiguas barras espigas de constitución areno-arcillosa, que delimitaban llanuras intermareales y funcionaban como una especie de barrera natural hacia la ciénaga de la Virgen. Esta zona ha sido intervenida a través de la ejecución progresiva de rellenos anti- técnicos que hoy cubren depósitos intermareales constituidos por sedimentos de arcilla y limo blando, de color gris oscuro, con restos de fragmentos de conchas con interdigitaciones de arena arcillosa de color pardo y de grano fino.

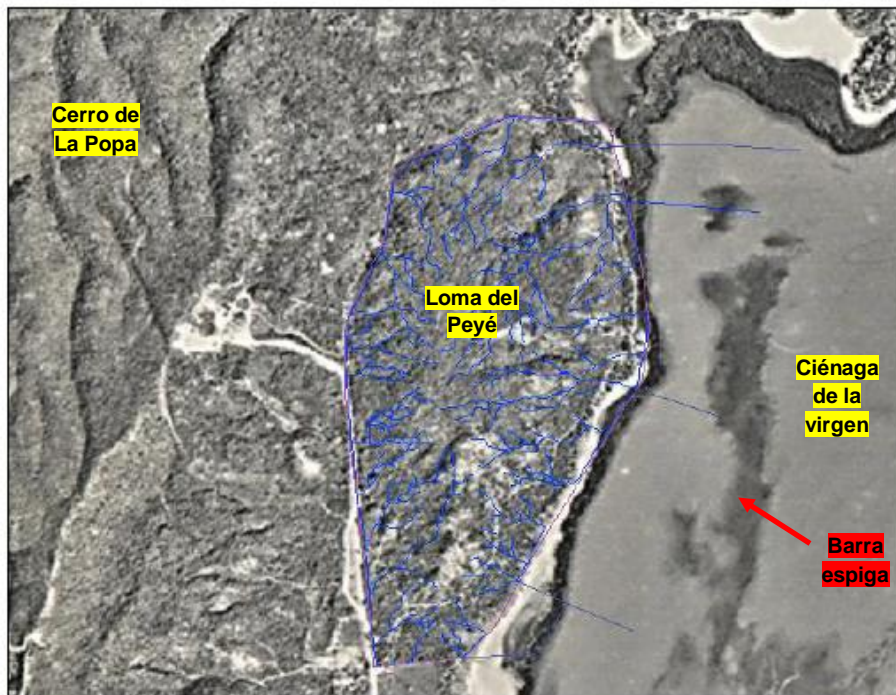


Figura 129. Vista parcial de la loma del Peyé en el año 1948 con sus cauces naturales
Fuente: Tomado de UDC-PNUD (2014) y editado por el autor (2015)

En la loma del Peyé se realizaron exploraciones del subsuelo (UDC-PNUD 2014), especialmente en aquellas zonas inestables, por medio de ensayos de penetración estándar (SPT) y perforaciones mecánicas con roto-percusión en diámetro HQ con corona rotatoria detectando materiales térreos relacionados con el conjunto intermedio de



la Formación detrítica Bayunca (T2-2). A nivel superficial en la parte alta de la ladera se detectó arcilla parda clara de alta plasticidad y consistencia media con vetas grises y de oxidación, hasta una profundidad de 6 m. También se evidencian en la cima del sector occidental de la loma, afloramientos localizados de roca caliza de origen coralino, ligeramente cementada, ocasionalmente margosa, muy blanda y aspecto terroso con fragmentos de corales. Estas calizas pertenecen al conjunto superior de dicha formación (T2-1).

Subyaciendo los primeros 6 m y hasta una profundidad variable entre 7 y 12 m se encontraron estratos de arena de grano fino, de color gris y densidad suelta a media. Posteriormente y hasta una profundidad que varía entre 22 y 30 m se detectaron arcillas arenosas color pardo claro, consistencia media a dura, de plasticidad variable; presentan ocasionalmente fracturas, vetas de oxidación, fragmentos de corales y lentes de arena. Finalmente se encontró arena media a muy densa, de color gris con fragmentos de corales hasta la máxima profundidad de exploración de 36 m.

Adicionalmente se destacan al sur de la loma, afloramientos bastante estables de arcillolitas limosas en capas gruesas de aspecto masivo y homogéneo, con intercalaciones y lentes de arenas de grano fino y frecuentes planos de fracturas rellenas con venas de yeso de hasta 7.0 cm de espesor. Las fracturas son esencialmente verticales y presentan dos tendencias predominantes NS y EW.

Hacia la parte central, norte y en las faldas del costado occidental del cerro se presentan limolitas arcillosas de color pardo a café amarillento, ocasionalmente con presencia de carbonatos lixiviados provenientes de los niveles calcáreos superiores. Hacia la parte superior presenta un nivel de arenas sueltas de grano medio con intercalaciones compactas de cemento calcáreo. Estas limolitas arcillosas muestran una ligera tendencia al desprendimiento y caídas de pequeños fragmentos de origen calcáreo en algunos sectores de la pendiente occidental y oriental de la loma.

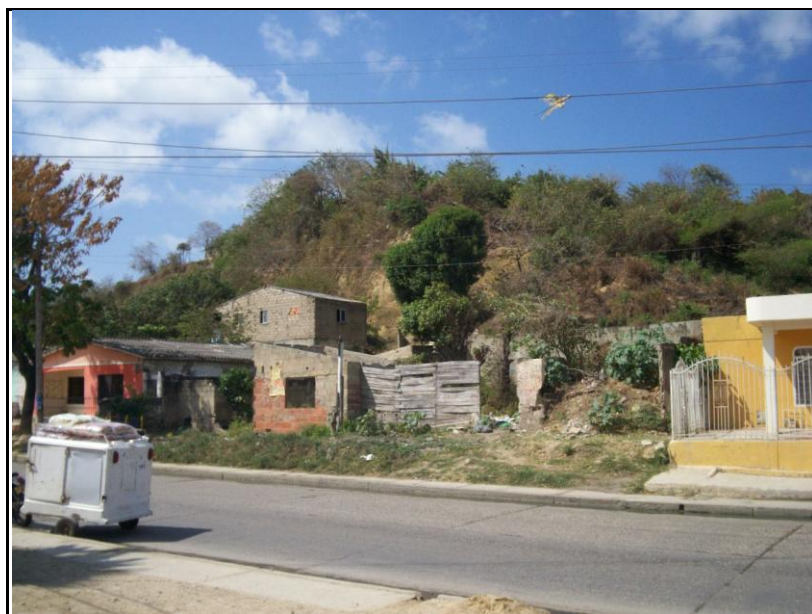


Figura 130. Vista parcial del sector oriental de la loma del Peyé
Fuente: Consorcio DJU (2009)



Los flujos de detritos en la loma del Peyé se concentran en el sector oriental, se caracteriza por el desplazamiento medio a rápido de materiales no consolidados con forma lobulada, de la parte alta y media de la ladera, esencialmente de areniscas calcáreas dispuestas en bancos de más de 5 a 6 metros de altura de grano fino a conglomerático, de color amarillo parduzco. Estas areniscas son friables y poco cementadas, por lo tanto son susceptibles a la erosión por agua de escorrentía y eventuales flujos por saturación. Usualmente el material deslizado no se conserva y posteriormente es removido. Las superficies de falla se consideran curvas y cóncavas hacia arriba, estos flujos se presentan mayormente en una zona del sector oriental de 0,36 hectáreas, aunque a nivel local se generan en otros puntos de la loma del Peyé. A raíz de los flujos y caídas que se han presentado, se evidencia una zona escarpada de una longitud del orden de 40 m que con el tiempo será de mayor magnitud, sino se toman las medidas de remediación del caso.

En cuanto a las consecuencias de estos movimientos en masa, periódicamente en la loma del Peyé, en especial durante las épocas invernales se han presentado incidentes que han ocasionado el colapso de viviendas, infraestructura vial y sistemas de contención que se han construido para estabilizar laderas. Específicamente se tiene información de un deslizamiento ocurrido en octubre de 2007 que afectó varias viviendas y familias, hubo 5 personas heridas, 2 adultos y 3 niños. En noviembre de 2009 se reactivaron los procesos de inestabilidad en la misma zona, afectando esta vez a 6 viviendas y sus habitantes, 2 de ellas sufrieron daños menores y las otras 4 se dañaron considerablemente.

Los trabajos de recuperación de la zona de estudio deben ir encaminados al control de la erosión y de los procesos de remoción en masa a través de la ejecución de muros de contención cimentados sobre pilotes, protección sobre aquellas zonas de ladera desprovistas de vegetación nativa, realizando corte, perfilamiento y aterrazado de los taludes que lo requieran, revegetalización con biomanto y especies nativas funcionales, protección mediante pantalla de revestimiento de concreto lanzado y malla eslabonada fijada con pernos, colocación de muros en gavión en aquellas zonas de flujo periódico de detritos, construcción de canales colectores y cunetas para el manejo de las aguas superficiales y mediante estructuras de fijación de sedimentos, tipo trinchos y barreras para impedir la profundización de los surcos y cárcavas existentes.

5.1.4. Deslizamiento: San Francisco

Se localiza al nororiente del casco urbano de Cartagena, en el barrio San Francisco, en una de las estribaciones del cerro de La Popa, llamada Loma del Guerrero sobre las coordenadas 10° 25' 52,99" N y 75° 31' 3,13" O.

Se trata de un sistema colinado con elevaciones de hasta 60 m, donde las laderas se presentan en su mayoría convexas, con pendientes del orden de 30° a 40° en la parte superior, mientras que en la parte media y baja las inclinaciones varían entre 10 y 25°.

En la parte media de la ladera se presentan desde hace más de 15 años procesos periódicos de erosión intensa e intervención antrópica mediante la excavación en la ladera para acondicionar el terreno para la ampliación de viviendas.



Figura 131. Vista parcial de escarpe principal de deslizamiento San Francisco

Fuente: UDC-AMC (2012a)

En la zona norte de la loma del Guerrero se evidencia un escarpe principal en forma de herradura, asociado con antiguos movimientos en masa, el cual fue reseñado por Carvajal (1998), que corresponde a la actual corona del deslizamiento y que hoy en día presenta mayores dimensiones en razón de los procesos de inestabilidad. La zona del escarpe albergaba hasta el año 2011 un sin número de viviendas, que en la actualidad han sido reubicadas.



Figura 132. Vista parcial de la corona y zanja de deslizamiento San Francisco

Fuente: UDC-AMC (2012a)

Las rocas aflorantes de la zona del deslizamiento corresponden a los conjuntos superior (T1-1) e intermedio (T1-2) de la formación calcárea de La Popa (ver figura 133). Se realizaron exploraciones del subsuelo (UDC-AMC 2011a), por medio de ensayos de penetración estándar (SPT) y perforaciones mecánicas con roto-percusión detectando en la parte más alta y escarpada de la loma, a nivel superficial, calizas arrecifales del conjunto superior, localmente de aspecto calichoso, compuestas de fragmentos de coral y conchas de bivalvos, con espesores del orden de 6 m. En la parte media y baja de la ladera inestable, se presenta el conjunto intermedio de la formación calcárea La Popa, en el cual se detectaron arcillas pardas con presencia de limos en diferentes proporciones, vetas de oxidación, vetas grises, caracuchas menudas y rastros de calizas, intercaladas con distintos niveles de arenas limosas que presentan rastros de caracuchas y gravillas



calizas. Mediante estos sondeos se confirma lo planteado por Carvajal (1998), quien asocia el conjunto intermedio (T1-2) con arcillolitas y limolitas calcáreas con un horizonte de areniscas friables (deleznables) de grano medio a fino de color pardo claro con niveles delgados de arenisca calcárea y calizas calichosas de color amarillo pálido y precisa que en estos niveles arenosos es donde se presentan problemas de remoción en masa y rezumaderos de agua, tal y como se ha evidenciado recientemente.

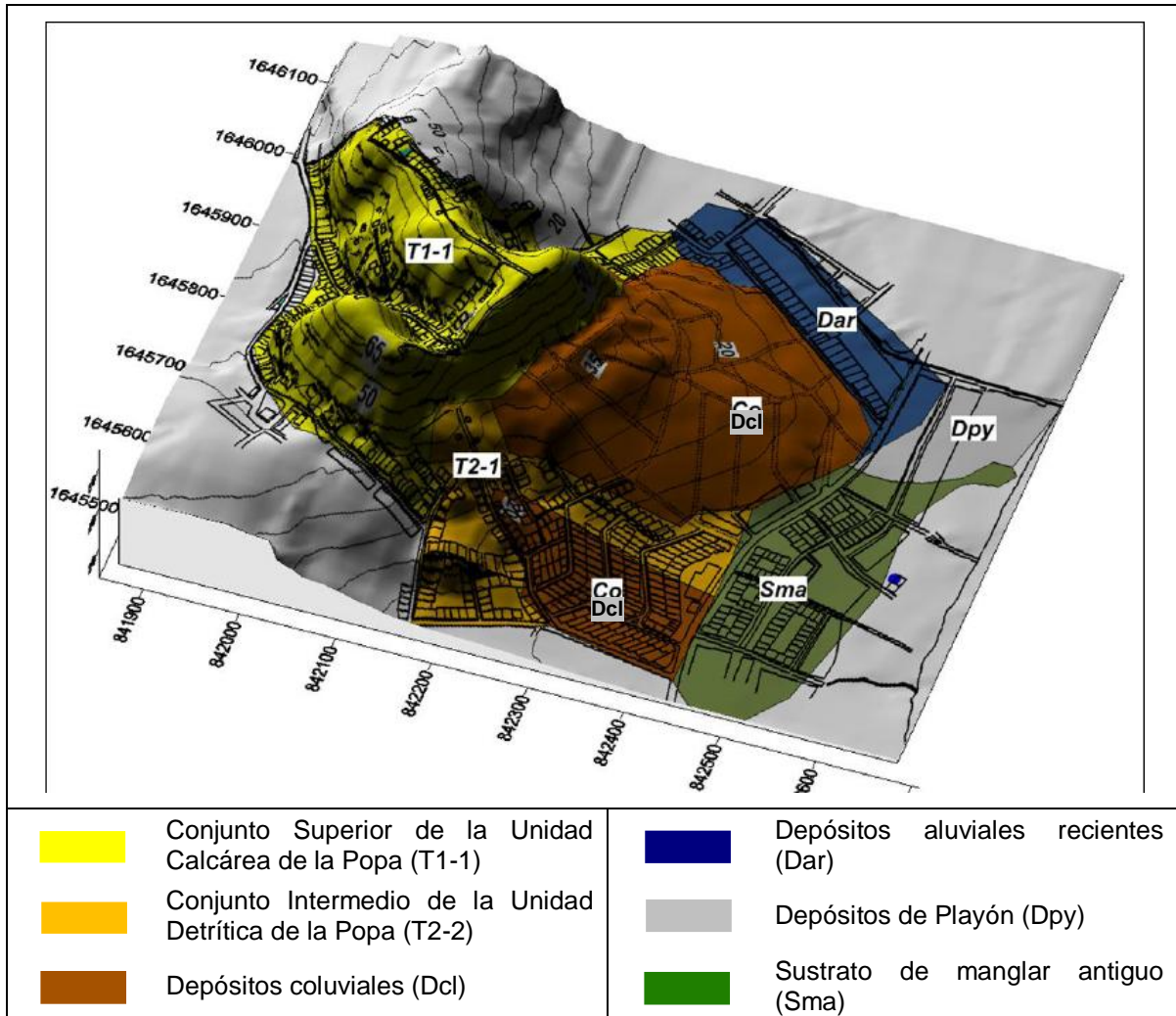


Figura 133. Mapa Litológico de la loma del Guerrero, Barrio San Francisco

Fuente: UDC-AMC (2011a)

Dentro de los antecedentes, en el año 1998 se reactivó el deslizamiento según manifiestan los vecinos, pues el terreno de sus viviendas se empezó a agrietar y hundirse, se evidenciaron resumideros de agua en la parte intermedia de la ladera, en la base de la ladera se presentaron agrietamientos y levantamientos de 2 a 5 m. No se tiene conocimiento de la recurrencia de estos movimientos en el sector. Según Carvajal (1998) se cree que la causa probable del movimiento tuvo su origen en eventos sísmicos ocurridos en el mes de junio de 1998 que generaron asentamientos diferenciales y acomodamiento del terreno, aunado a la saturación del material arenoso, la forma convexa de la ladera y las pendientes moderadas a altas, que originaron una disminución previa de la resistencia al corte del terreno, la cual fue acelerada por el esfuerzo adicional



asociado al sismo del 22 de Junio y sus replicas. Es probable que se haya generado licuación del terreno a pequeña escala, ayudada por la saturación del terreno en razón de la ruptura de tuberías de acueducto.

En el año 2010 el deslizamiento en mención se volvió a reactivar evidenciando procesos de mayor severidad a los del año 1998, en relación a los agrietamientos y hundimientos en la parte alta de la ladera, que generaron progresivamente una especie de zanja de 30 m de ancho, 300 m de largo y una profundidad de 10 a 15 m. En razón de los desplazamientos se generaron rupturas en las tuberías de acueducto, alcantarillado y gas del sector y daños en pozas sépticas, presentándose fugas que aportaron en el proceso de saturación del material y la disminución de su resistencia al corte. A diferencia del movimiento del año 1998 que fue ocasionado por la acción del sismo, en el año 2010 la causa principal del mismo tuvo su origen en las condiciones atípicas de lluvia del mes de octubre y noviembre de dicho año.

Este movimiento en masa se comporta como un deslizamiento rotacional con componentes traslacionales retrogresivos. La zona afectada por el deslizamiento abarca aproximadamente 20 hectáreas, donde se emplazaba antes la mayor parte del barrio San Francisco y parte de otros sectores vecinos como San Bernardo, La Paz y Sinaí, los cuales quedaron parcialmente destruidos. Es importante mencionar que la mayoría de viviendas que quedaban en el sector fueron construidas con deficiencias constructivas de tipo estructural, en especial aquellas ubicadas en las zonas de invasión, hacia las cotas superiores.

Actualmente este deslizamiento se encuentra en estado de equilibrio aparente, en riesgo latente hasta tanto se configuren nuevamente factores detonantes como la lluvia, que generen procesos de inestabilidad. Como la mayoría de viviendas fueron demolidas y sus escombros retirados en gran medida, las cargas superficiales han disminuido, generando adicionalmente un proceso gradual de descarga en el sector (ver figura 134). Se debe garantizar el despeje total de las zonas de alto riesgo pues en la actualidad se han presentado algunos intentos de invasión en la zona que de no tomar las medidas correctivas podrían generar inconvenientes futuros.



Figura 134. Zonas afectadas por la inestabilidad en el deslizamiento San Francisco

Fuente: UDC-AMC (2012a)

Los trabajos de recuperación de la zona de estudio deben ir encaminados inicialmente a la recolección total y controlada de escombros y otros residuos sólidos que aún subsisten en el sector, control de los procesos de remoción en masa a través de la ejecución de obras de contención, en especial de muros de gravedad y pantallas de pilotes de una



longitud que sobrepase la profundidad de falla, adecuación de rasante mediante rellenos compactados de material granular, protección sobre aquellas zonas de ladera desprovistas de vegetación nativa, realizando corte, perfilamiento y aterrazado de los taludes que lo requieran, revegetalización con biomanto y especies nativas funcionales, construcción de canales colectores en material no rígido, cunetas, lecho filtrantes y cuencos disipadores para el manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales. Es importante implementar un plan de instrumentación, monitoreo y seguimiento del sector utilizando instrumentos tipo piezómetros e inclinómetros, así como realizando planes complementarios de exploración del subsuelo mediante refracción sísmica y perforaciones mecánicas.

5.1.5. Deslizamiento: Nueva Granada - Manzanares

Los deslizamientos de Nueva Granada y Manzanares están distanciados entre sí una longitud de 250 m, se localizan en la parte central del casco urbano de Cartagena, en la loma del Marión sobre las coordenadas $10^{\circ} 23' 46,30''$ N y $75^{\circ} 30' 25,06''$ O y coordenadas $10^{\circ} 23' 36,35''$ N y $75^{\circ} 30' 32,84''$ O respectivamente (ver figura 135). Específicamente el movimiento de Nueva Granada se ubica en los barrios Nueva Granada, 9 de Abril y Zaragocilla en un área aproximada de 2.0 hectáreas, mientras que el deslizamiento de Manzanares se localiza en el Barrio Nuevo Bosque y en los sectores vecinos de Altos del Nuevo Bosque, Altos de San Isidro, Manzanares y Mirador de Nuevo Bosque en un área aproximada de 1.5 hectáreas.

A nivel geomorfológico, la zona de los deslizamientos clasifica como una loma, con alturas máximas que varían entre 44 m para Manzanares y 50 m para Nueva Granada, presentan cimas aplanadas y altamente urbanizadas, las laderas son en su mayoría convexas. Las pendientes promedios de Nueva Granada varían entre 10° y 28° , aunque en las zonas escarpadas las inclinaciones alcanzan los 70° , especialmente en el flanco occidental (Zaragocilla), mientras que en Manzanares las inclinaciones promedios varían entre 12° y 23° y en las zonas escarpadas han llegado a tener los 80° , hacia el Mirador de Nuevo Bosque (flanco nororiental).



Figura 135. Localización de referencia de los deslizamientos Nueva Granada -Manzanares

Fuente: Tomado de Google Earth (2014) y editado por el autor (2015)



En las zonas de los deslizamientos se realizaron exploraciones del subsuelo (UDC-AMC 2009b, 2011b), por medio de ensayos de penetración estándar (SPT). En Nueva Granada se detectaron a nivel superficial afloramientos localizados de roca caliza meteorizada de origen coralino, muy blanda y aspecto terroso relacionados con el conjunto superior de la formación calcárea de La Popa (T1-1), en la parte intermedia y baja de la ladera se detectaron materiales térreos del conjunto intermedio de la Formación detrítica Bayunca (T2-2), predominantemente arcillas limosas color pardo claro a grisáceo, con vetas grises y de oxidación, de plasticidad variable, con presencia ocasional de gravas calizas, rastros de arena y micas, hasta una máxima de profundidad de exploración de 7 m (ver figura 136).

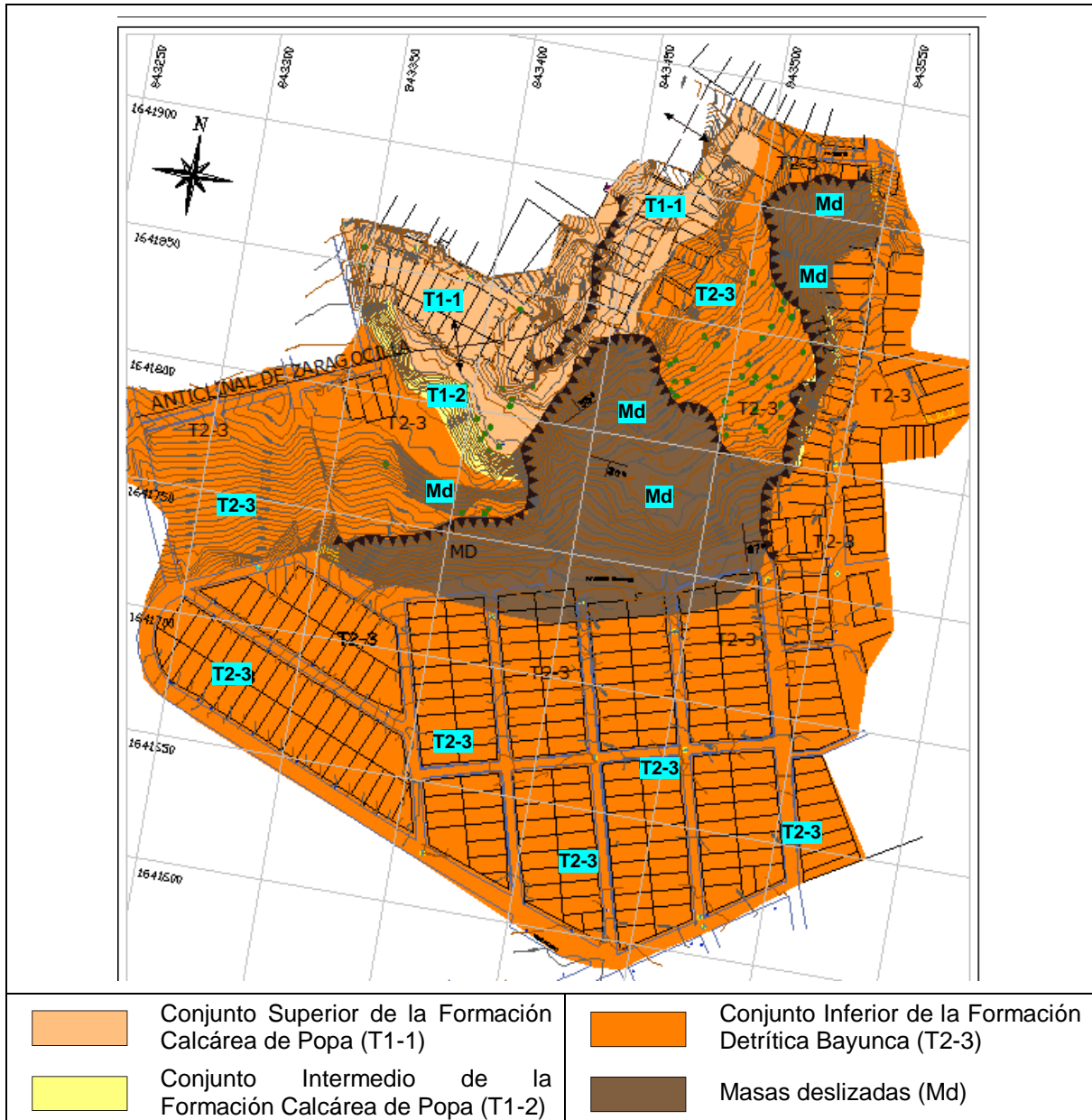


Figura 136. Mapa Litológico de Nueva Granada

Fuente: UDC-AMC (2009b)



Es importante mencionar que en Nueva Granada se evidencia un deslizamiento principal y un pequeño deslizamiento local hacia el flanco oriental, los cuales son catalogados por (UDC-AMC 2009b) como una unidad litológica de "*masas deslizadas*" (Md), pese a su carácter morfológico, donde los materiales deslizados hacen parte del conjunto intermedio (T2-2), algunos se encuentran in situ, en estado suelto a medio y otros han sido movilizados en forma de flujo de detritos (ver figura 137).

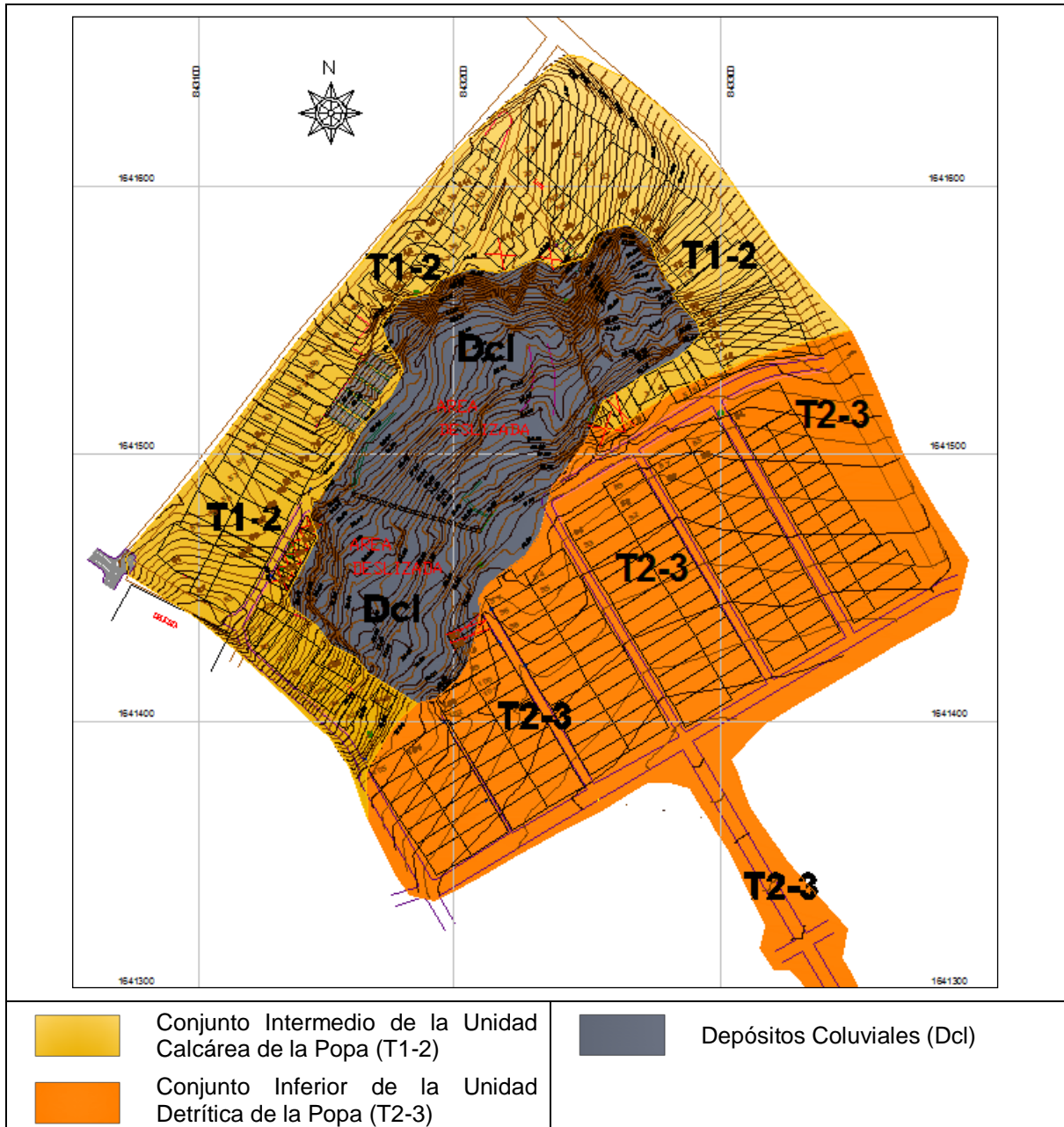


Figura 137. Mapa Litológico de Sector Manzanares

Fuente: UDC-AMC (2011b)

En Manzanares, la litología es similar, por ello al ejecutar exploraciones del subsuelo se han detectado materiales de las mismas formaciones Popa y Bayunca. En la zona de laderas se presentan materiales arcillosos calcáreos con lentes de calizas y areniscas del



conjunto intermedio de la formación calcárea de La Popa (T1-2), los cuales se han deslizado anteriormente depositándose en una zona intermedia baja conformando depósitos coluviales recientes (Dcl) que se han movilizado posteriormente por efecto de los procesos de inestabilidad. En la parte baja del sector, donde se emplaza el barrio Nuevo Bosque se presenta una alternancia de arcillolitas y limolitas grises del conjunto inferior de la Formación detrítica Bayunca (T2-3).

La loma del Marión ha sido continuamente afectada por procesos intensos de erosión y remoción en masa, especialmente en las zonas de Nueva Granada y Manzanares. Se han generado deslizamientos que han variado a flujos de material, por efecto del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento en la época del año. El deslizamiento principal de Nueva Granada presentaba una superficie de falla del orden de 100 m de longitud, ancho de 92 m y profundidad probable de 10 m.

El escarpe principal de 150 m de longitud y altura de 5 a 6 m se exponía en la corona del deslizamiento constituyendo la forma de una "cuchara", por lo tanto se trata de un movimiento simple rotacional. La corona del deslizamiento con el tiempo se inclinó hacia atrás unos cuantos metros, hacia la pendiente, generando movimientos retrogresivos en la cima del deslizamiento. En su momento era evidente la formación de escarpes secundarios a media ladera por efecto de desplazamientos diferenciales de una altura de hasta 5 m, los cuales se deformaron paulatinamente, movilizándose hacia el pie de la ladera al entrar en contacto con el agua de escorrentía, generando un flujo de material importante. En el año 2014 esta zona fue intervenida mediante obras de estabilización.



Figura 138. Escarpe principal y flujo de material por efecto de las lluvias - Nueva Granada

Fuente: El autor (2010)

El deslizamiento de Manzanares presentaba una superficie de falla de 76 m de longitud, ancho de 55 m y profundidad no determinada. El escarpe principal de 50 m de longitud y altura de 1 a 3 m se exponía en la corona del deslizamiento constituyendo la forma de una "cuchara", por lo tanto se trata de un movimiento simple rotacional (ver figura 139). La corona del deslizamiento con el tiempo se inclinó hacia atrás unos cuantos metros, hacia la pendiente, generando movimientos retrogresivos hacia Altos de Nuevo Bosque. En el flanco oriental se presentaron pequeños deslizamientos, produciendo escarpes tipo paredes subverticales y posteriormente flujos de material (ver figura 140). La corona del deslizamiento y el flanco oriental han sido intervenidos por obras de estabilización y están actualmente cubiertos de vegetación.



Figura 139. Escarpe principal y corona del deslizamiento de Manzanares

Fuente: El autor (2011b)

Entre las principales causas de los deslizamientos del sector se citan la intervención antrópica, mediante sobrecargas, cortes al pie de la ladera y rellenos anti-técnicos representados en la construcción de viviendas, vertimiento indiscriminado de aguas negras y grises desde la parte alta, presencia de areniscas friables susceptibles a los agentes meteorizantes y la influencia de un sistema de fallas cercano que incide en la estabilidad del sector.



Figura 140. Vista parcial de pie y flanco oriental del deslizamiento de Manzanares

Fuente: El autor (2010)

En cuanto a las consecuencias de estos deslizamientos, cada año en la loma del Marión, se han presentado incidentes que han ocasionado la afectación y colapso de viviendas. En Nueva Granada se tiene información sobre procesos de inestabilidad, desde hace más de 15 años. Se destaca la afectación de la totalidad de la tercera etapa de la urbanización, la cual fue demolida y las familias reubicadas hace aproximadamente 12 años. En el año 2010 y 2011 se presentaron deslizamientos y flujos de material deslizado que también afectaron a la comunidad, especialmente aquellas localizadas al pie de la loma. En relación a Manzanares se han presentado eventos en los últimos años que han afectado a la comunidad, en especial en el año 2010 que se reactivó el deslizamiento averiando 2 viviendas en la parte inferior de la ladera y más de 7 viviendas en la parte alta.

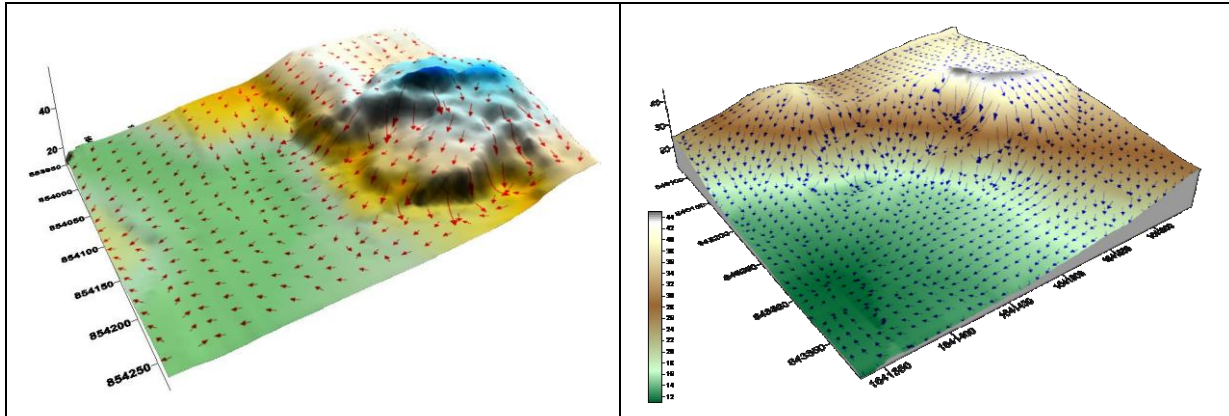


Figura 141. Modelo 3D de los sectores Nueva Granada - Manzanares

Fuente: UDC-AMC (2009b, 2011b)

Los trabajos de recuperación de los sectores Nueva Granada y Manzanares ya han sido ejecutados en cierta medida, como se mencionó antes, en el año 2014, cuando finalizó la ejecución de obras de contención, tipo muros de gravedad piloteados, corte, perfilamiento y aterrazado de taludes, siembra parcial de especies nativas y construcción de canales colectores y cunetas para el manejo de las aguas superficiales. Para estabilizar completamente la zona aun hace falta la ejecución de obras de contención adicionales, protección sobre aquellas zonas de ladera desprovistas de vegetación nativa, control de erosión mediante estructuras de fijación de sedimentos, tipo trinchos y barreras para impedir la profundización de los surcos y cárcavas existentes, revegetalización con biomanto y especies nativas funcionales, colocación de muros en gavión en algunas zonas de flujo periódico de material y construcción de lechos filtrantes y de canales adicionales.

5.1.6. Flujo de detritos: Salto del cabrón

Se localiza al nororiente del casco urbano de Cartagena, en costado sur del cerro de La Popa, aproximadamente sobre las coordenadas $10^{\circ} 25' 6,11''$ N y $75^{\circ} 31' 32,08''$ O. Este cerro ha sido afectado por procesos denudacionales que comprenden procesos erosivos moderados a intensos y movimientos en masa, en el caso del salto del cabrón por flujos de detritos (ver figura 142).

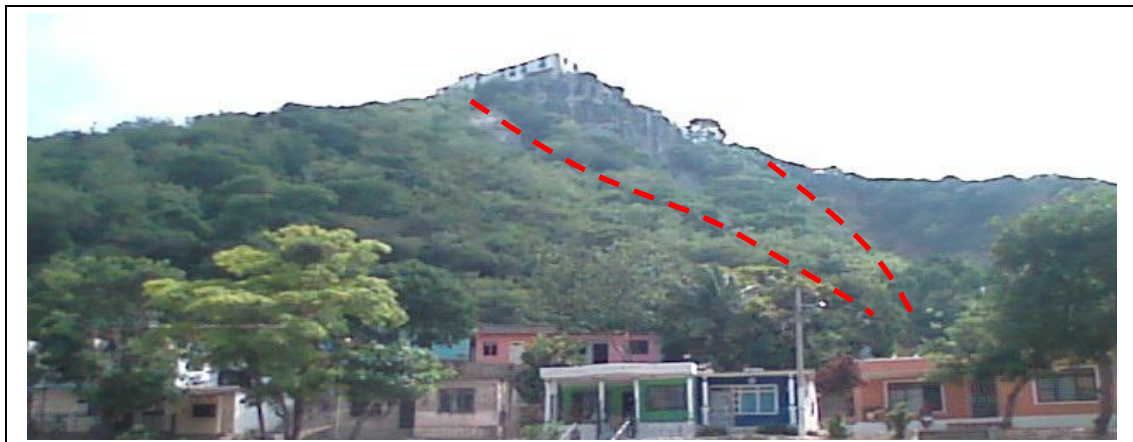


Figura 142. Sector sur del Salto del cabrón afectado por procesos denudacionales

Fuente: UDC-AMC (2009a)



El sector de inestabilidad presenta alturas que oscilan entre los 50 y 152 m en la base el convento. A nivel geomorfológico, la zona de estudio clasifica como colina, presenta una cima amplia aplanada, las laderas del salto del cabrón son en su mayoría convexas, con inclinaciones superiores a 45° en la parte alta de la ladera.

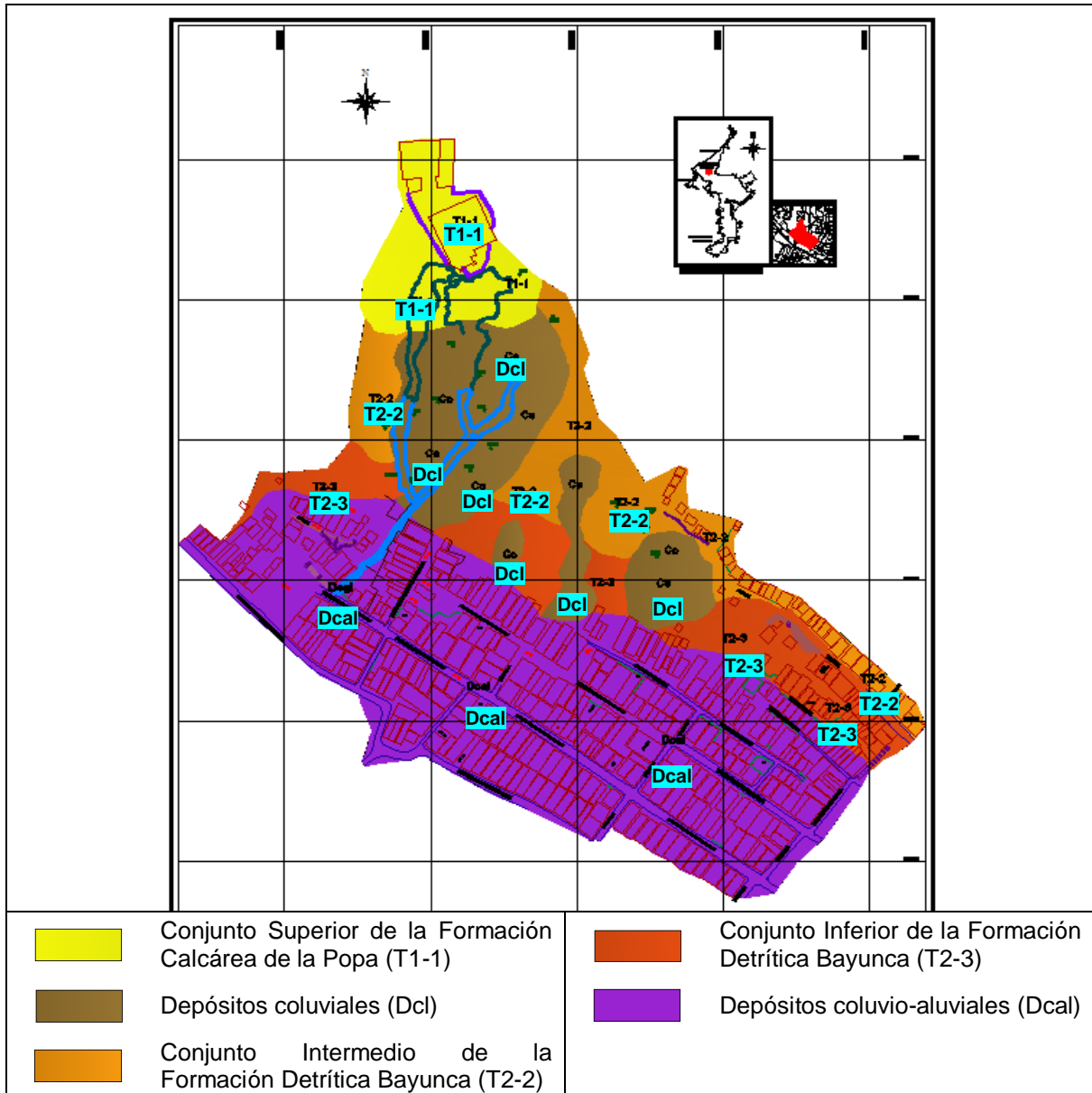


Figura 143. Mapa Litológico del Cerro de la Popa, Sector Salto del Cabrón

Fuente: UDC-AMC (2009a)

La erosión intensa que afecta el salto del cabrón está asociada al desprendimiento y arrastre moderado de arcillolitas, limolitas y areniscas de origen calcáreo por acción de la escorrentía superficial y la carencia de vegetación nativa en algunas zonas de ladera. En otras zonas se evidencia la formación de surcos y cárcavas localizadas, de una profundidad hasta de 0,5 m. Estos procesos erosivos han alterado y moldeado en los últimos años la morfología del sector, donde se detectan calizas arrecifales hacia el tope, pertenecientes al conjunto superior de la Formación calcárea de La Popa (T1-1) y en la



parte intermedia de ladera se detectan unidades de predominio detrítico (conjunto intermedio (T2-2) e inferior (T2-3) de la Formación Bayunca) constituida de arcillolitas y limolitas grisáceas intercaladas con delgadas capas de areniscas pardas muy resistentes, localmente conglomeráticas y en ocasiones friables. En la parte baja del sector se han acumulado materiales en forma de depósitos coluvio-aluviales.

Aunque en la década de los 40's se presentaron predominantemente movimientos en masa tipo deslizamientos, los cuales incidieron en la morfología actual, en los últimos años, los flujos de detritos son el mecanismo de falla más relevante en el sector, como resultado de la inestabilidad anterior, se generan de modo ocasional y en movimientos rápidos, en razón de las altas pendientes de la zona.

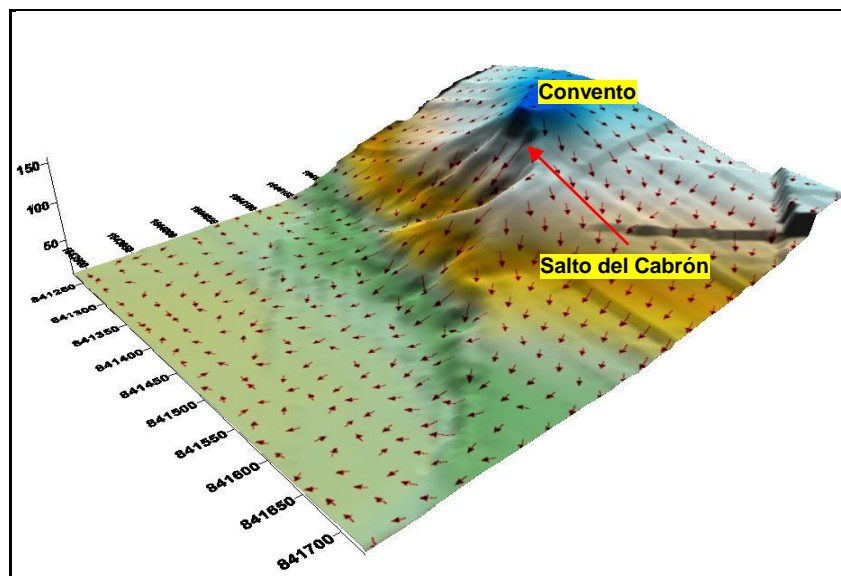


Figura 144. Modelo 3D del Salto del cabrón y dirección de la escorrentía superficial

Fuente: UDC-AMC (2009a)

En cuanto a las consecuencias de estos movimientos en masa, en abril de 1948 se presentó un deslizamiento de tierra que no causó daños, pues está zona no es muy transitada. En los últimos años se han presentado eventos de flujos de material, tampoco sin pérdidas materiales, ni humanas.

Los trabajos de recuperación de la zona de estudio se han ido ejecutando paulatinamente mediante la construcción de obras de protección de material calizo expuesto mediante pantalla de revestimiento de concreto lanzado y malla eslabonada fijada con pernos y de canales colectores para el manejo de las aguas superficiales. Se deben complementar estas obras, a través de la protección sobre zonas de ladera aun desprovistas de vegetación nativa, realizando corte y perfilamiento de los taludes que lo requieran, revegetalización con biomanto y especies nativas funcionales, instalación de muros en gavión en aquellas zonas de flujo periódico, construcción de canales adicionales, cunetas y lechos filtrantes y mediante estructuras de fijación de sedimentos para impedir la profundización de surcos y cárcavas. Es importante mencionar que en la parte intermedia baja del salto del cabrón, el sistema de canales que se construyó se ha colmatado poco a poco, por lo tanto se deben realizar limpiezas periódicas de los mismos y recolección de material suelto y bloques, producto de los flujos, que pueden ocasionar mayor colmatación.



Capítulo 6. Zonificación de la Amenaza

El capítulo 6 contiene el mapa final de un escenario de zonificación de la amenaza relativa por deslizamientos en la ciudad de Cartagena que se obtuvo a partir de la evaluación de los parámetros detonantes de la metodología SES.

Al inicio del capítulo se muestran los resultados de la calificación final una vez desarrollada la metodología SES, mediante la evaluación de los parámetros, obteniendo de la valoración una variación de (CE) entre 52.13 a 166.43. Posteriormente se describe un procedimiento llevado a cabo para definir los rangos de variación de la calificación de estabilidad en tres categorías: Alto, medio y bajo, lo cual se refleja en el mapa de (CE) obtenido de la metodología SES. La calibración del mapa de amenaza relativa se realiza paralelamente al procedimiento de clasificación de la estabilidad contrastando el inventario de PRM de los últimos 14 años (Ver Anexo A) y con el mapa de zonificación de susceptibilidad a los PRM de Ingeominas (2001a).

Hecho esto, se realiza la delimitación del área de estudio, a partir de las zonas de cerros de Cartagena y se complementa tomando como límite inferior una pendiente mínima del terreno de 5%. Esto para poder adelantar la comparación con el mapa de zonificación por PRM de Ingeominas (2001a).

Finalmente se realiza la descripción de las categorías de amenaza relativa por PRM de acuerdo con las condiciones de estabilidad del área de estudio y se efectúa de modo conceptual y parcial una comparación entre el escenario obtenido de amenaza relativa por deslizamientos y la zonificación por PRM elaborada por Ingeominas (2001a).

6.1. Mapa Final de un Escenario de Amenaza relativa por deslizamientos en la ciudad de Cartagena

De la Metodología SES se desprende la generación del mapa final de un escenario de zonificación de la amenaza relativa por deslizamientos en la ciudad de Cartagena, obtenido con base en los lineamientos para la evaluación de los cuatro (4) parámetros intrínsecos y cuatro (4) detonantes. En esta evaluación semi-cuantitativa se realizó la valoración de cada uno de los parámetros que intervienen en la estabilidad de las laderas. Posteriormente se llevó a cabo el cruce sistemático de los mapas temáticos resultantes de la valoración de cada parámetro en términos de su contribución a la inestabilidad.

La evaluación final del grado de amenaza relativa según lo planteado anteriormente en la metodología SES es el resultado de los valores ponderados, asignados a cada parámetro y se expresa de la siguiente forma:

$$CE = M + R + D + V + E + C + S + A \quad [6.1]$$

Donde Material (M), Relieve (R), Drenaje (D), Vegetación (V), Erosión (E), Clima (C), Sismo (S) y Efectos Antrópicos (A) son los parámetros de evaluación definidos en la metodología SES.



La calificación de estabilidad máxima teórica de la metodología SES varía entre 15 y 292. En el presente análisis al realizar la sumatoria de los parámetros, se obtuvo una calificación de estabilidad (CE) que varía de 52.13 a 166.43.

6.1.1. Calibración de zonas y rangos de variación de (CE)

La definición de los rangos de variación de la calificación de estabilidad se realizó para tres categorías (alto, medio y bajo) siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

- I. Se midió para cada puntaje individual de CE entre 52 y 166 las áreas respectivas medidas en km^2 .
- II. Se agruparon los puntajes cada 5 unidades (p.e. 52-56) y se sumaron las áreas de cada puntaje para obtener un área de grupo medida en km^2 (ver cuadro 56 y figura 145).
- III. Se trazaron las áreas de grupo dentro de la zona de estudio mediante SIG y dichas áreas se contrastaron con el inventario de PRM de los últimos 14 años (Ver Anexo A) y con el mapa de zonificación de susceptibilidad a los PRM de Ingeominas (2001a). Es importante destacar que el proceso de contrastación visual se llevó a cabo tanto en la pantalla del computador, como con copias en papel translúcido.
- IV. Se realizó la identificación de zonas inestables sobre las áreas de grupo involucradas, utilizando el proceso de contrastación de información disponible. Los rangos de CE de estas zonas presentaron una variación entre 52 y 95.
- V. Se clasificaron las zonas inestables asignándoles un grado de amenaza relativa alto o medio. Las zonas de amenaza alta se definieron a través del rango de variación de los puntajes de las áreas de ubicación de los PRM críticos (cerro de La Popa y loma del Marión), el cual tuvo una variación de 52 a 86. El área restante con rango entre 86 y 95 se le asignó un grado intermedio (ver cuadro 57).
- VI. La calibración del mapa de amenaza relativa se realizó paralelamente al procedimiento de categorización de la estabilidad empleando el análisis de los PRM de los últimos 14 años.



Rango de CE [1]	Area de grupo (km ²)	Rango de CE [2]	Area de grupo (km ²)
52.13-56	0.003	112.0000001-117	7.417
56.0000001-62	0.119	117.0000001-122	2.865
62.0000001-67	0.079	122.0000001-127	13.145
67.0000001-72	0.393	127.0000001-132	5.037
72.0000001-77	1.524	132.0000001-137	1.613
77.0000001-82	1.261	137.0000001-142	2.350
82.0000001-87	3.976	142.0000001-147	2.805
87.0000001-92	4.021	147.0000001-152	0.617
92.0000001-97	4.399	152.0000001-157	2.979
97.0000001-102	9.030	157.0000001-162	0.062
102.0000001-107	5.205	162.0000001-166.43	0.003
107.0000001-112	4.577		

Cuadro 56. Agrupación de puntaje de CE cada 5 unidades

Fuente: El autor (2015)

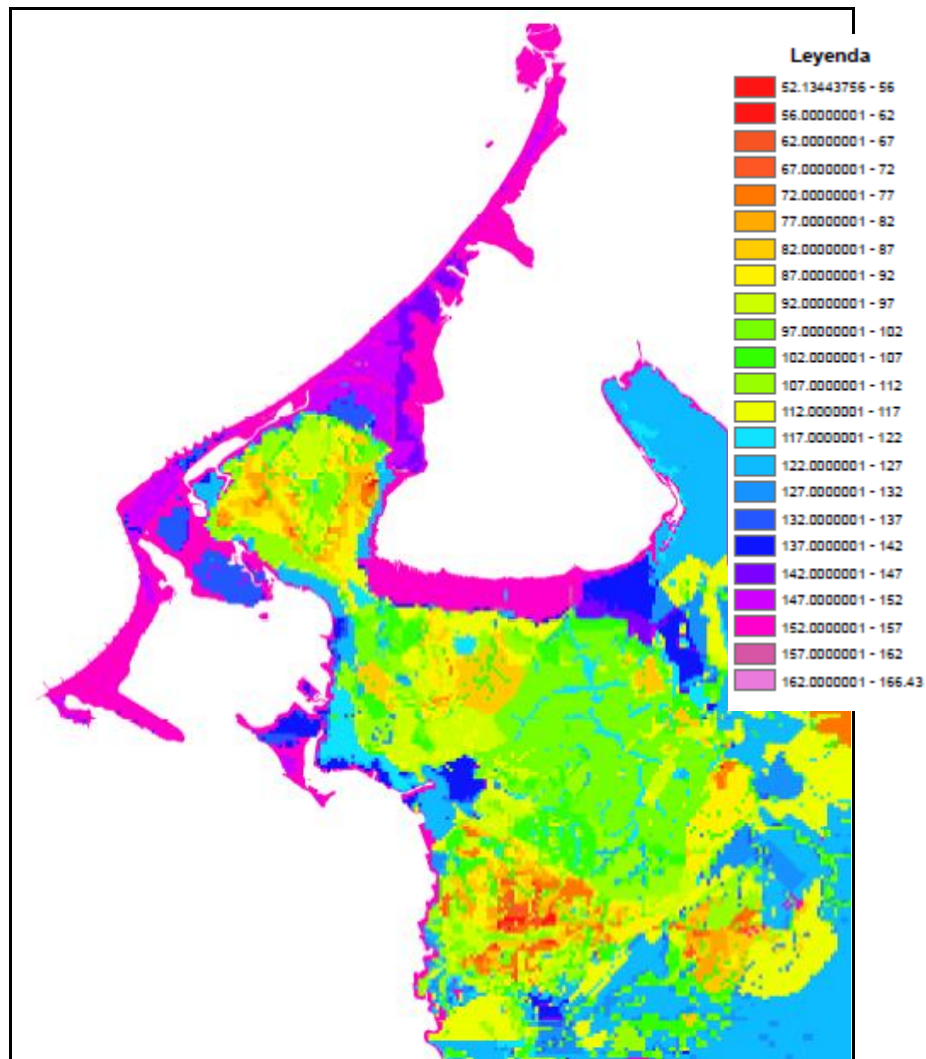


Figura 145. Mapa de agrupación de puntajes de CE cada 5 unidades

Fuente: El autor (2015)



Grado de amenaza relativa por PRM	Convención	Rango de CE	Area (km ²)	%
Alto (RMa)	RMa	0 - 86	5.88	8.00
Medio	RMm	86 - 95	7.84	10.67
Bajo	RMb	> 95	67.62	81.33
Total			81.34	100

Cuadro 57. Clasificación de la calificación de estabilidad para definir grado de amenaza relativa por PRM de Cartagena

Fuente: El autor (2015)

En el Cuadro 57 se encuentra la clasificación realizada para la calificación de estabilidad (CE) a partir del procedimiento descrito anteriormente y en la figura 146 se muestra el mapa de (CE) de laderas y amenaza relativa por PRM en Cartagena.

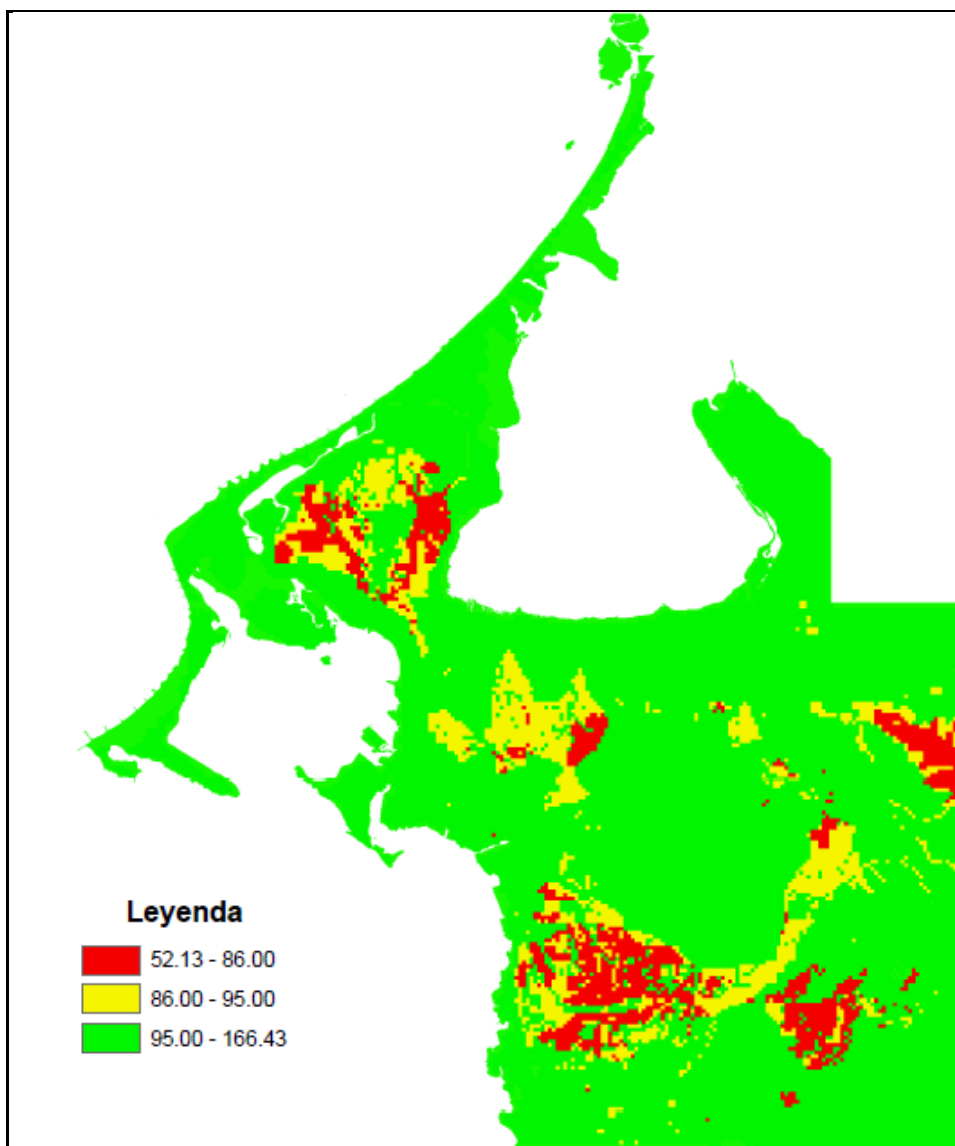
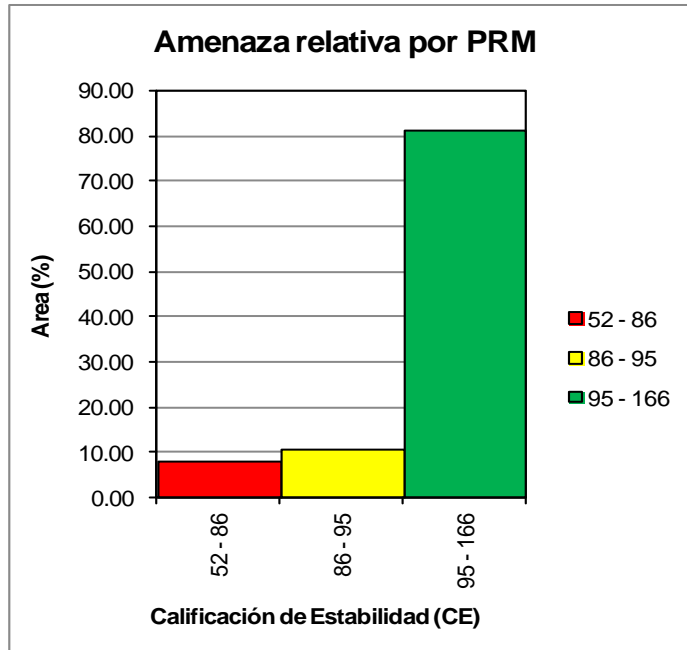


Figura 146. Mapa de calificación de estabilidad (CE) obtenido de la metodología SES

Fuente: El autor (2015)



Gráfica 22. Relación de categorías de Amenaza Vs Area (%)
Fuente: El autor (2015)

A partir de la gráfica 22 se concluye que el área de estudio presenta un 8.0% de su extensión en categoría de amenaza alta, 10.67% media y 81.33% Baja. Es decir que el 18.7% de la zona de estudio se encuentra en categorías de amenaza alta a media, concentradas en las zonas de cerros y lomas que circundan la ciudad, ratificando el hecho de que estas zonas por sus características morfológicas y morfométricas favorecen el desarrollo de sectores inestables.

6.1.2. Delimitación del área de estudio

El análisis de amenaza relativa por PRM se realizó sobre la totalidad del área de Cartagena, aprovechando que se contaban con Mapas temáticos de toda la ciudad generados por Ingeominas (2001a), de Geotecnia, Geología, Geomorfología, Cuencas hidrográficas, Cobertura vegetal y Uso del suelo. Por otro lado, la metodología SES es aplicable a unidades de área y tiene cubrimiento total. Se tomó la decisión de adelantar un ejercicio académico completo sobre la totalidad del área, con la intención de mirar las variaciones de la calificación de estabilidad, incluso en aquellas zonas de mayor estabilidad, más aun cuando es la primera vez que se muestra un mapa de amenaza relativa por PRM para todo el casco urbano.

Es importante mencionar que al evaluar todo el casco urbano, no se colocó un límite inferior por pendiente donde no se presentan teóricamente PRM, por lo tanto la calificación de estabilidad muestra resultados un poco más altos y gran parte del casco urbano, por su topografía predominantemente plana, resulta en un grado de amenaza relativa baja a los PRM.

El inventario de procesos de remoción en masa de los últimos 14 años se utilizó como elemento de calibración de los resultados obtenidos con la metodología SES, a



través de la contrastación visual y de esta forma se obtuvo el Escenario final de amenaza relativa por PRM de Cartagena.

Este escenario fue necesario delimitarlo a partir de las zonas de cerros de Cartagena, teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo, es su comparación con el mapa de zonificación por PRM de Ingeominas (2001a), el cual se encuentra inmerso dentro de un mapa de susceptibilidad a fenómenos geológicos. En este caso, la delimitación del área de estudio se enfocó en las zonas de PRM que tienen lugar en la loma del Marión y en los cerros de La Popa y Albornoz y se complementó tomando como límite inferior una pendiente mínima del terreno de 5%.

De los 81.34 km² de la totalidad del casco urbano, se delimitaron las zonas de cerros y sus áreas de influencia, quedando el área de estudio ajustada a 9.23 km². En promedio el 30.4% del área de estudio se categorizó en el nivel de amenaza media, el 20.9% como amenaza alta y el restante 48.7% como amenaza baja. Lo anterior permite concluir que la condición general de estabilidad de Cartagena se encuentra en un estado de equilibrio relativo con relación a su entorno geoambiental, dando lugar a la posibilidad de que un área determinada pueda cambiar de categoría de estabilidad, en forma positiva o negativa, dependiendo de los parámetros detonantes, principalmente de las condiciones de lluvia y de la acción antrópica sobre el medio físico.

A continuación se describen las tres categorías definidas dentro de la zonificación de la amenaza relativa por PRM empleando el método semi-cuantitativo de estabilidad de laderas

6.1.3. Amenaza relativa Baja a los PRM

Zonas relativamente estables donde no se observan procesos de inestabilidad significativos, se presentan con pendientes bajas y topografía de plana a ondulada, así como en zonas escarpadas donde la intervención antrópica es menor y aún se conserva la cobertura vegetal.

Se destacan localmente procesos de reptación superficiales en suelos arcillosos e intervención antrópica de baja a moderada, especialmente hacia los sectores de Zaragocilla (Mirador), Bosquesito y Barrio España en la loma del Marión y al sur de la ciudad hacia los barrios María Cano, Carmelo, San Pedro Mártir y El Educador.

En el cerro de La Popa y sus estribaciones se evidencian zonas de amenaza relativa baja a los deslizamientos, principalmente hacia la cima del cerro propiamente dicho y de la loma del Peyé, donde litológicamente se presentan rocas calizas estables de la Formación calcárea del Popa con pendientes bajas a moderadas, que favorecen la estabilidad de estas zonas. Casos similares se presentan hacia la parte superior de la loma del Marión, especialmente hacia el sector de la Universidad de Cartagena, sede Piedra de Bolívar, en la zona de lomeríos del Colegio Comfenalco y en Escallón villa hacia el centro comercial Los Ejecutivos.

Los escarpes localizados al norte y oriente del convento de La Popa, son también considerados dentro del mismo rango de amenaza, pues se mantienen conservados con



vegetación nativa y las inclinaciones estructurales en contra de la pendiente del escarpe. Igualmente se presenta todo el flanco sur del cerro de Albornoz donde la vegetación nativa ha sido poco intervenida por el hombre, así como hacia el sector sur en el barrio Arroz Barato.

El cerro de San Lázaro (castillo de San Felipe) y el flanco occidental de la loma del Diamante son considerados dentro del mismo rango de amenaza bajo, en razón de sus pendientes bajas y las intervenciones civiles que se han realizado en estas zonas, así como en los sectores de Amberes, Bruselas y parte del 9 de Abril.

En caso de presentarse procesos de deforestación sostenidos en las zonas de laderas de los cerros de La Popa y Albornoz, aun con vegetación nativa, se podrían generar o reactivar procesos denudativos tipo surco, carcavamiento y flujos de tierra y/o detritos, y el progresivo desarrollo de movimientos en masa de mayor relevancia. Esto pondría en riesgo la integralidad de las viviendas localizadas en la parte baja de las laderas.

6.1.4. Amenaza relativa Media a los PRM

Zonas de estabilidad marginal susceptibles a procesos denudacionales por efecto de los factores detonantes, poseen pendientes de media a alta, donde se presenta la ocurrencia ocasional de procesos denudacionales como deslizamientos, desprendimiento y caídas de material rocoso y flujos de tierras y/o detritos.

En caso de lluvias extraordinarias como las ocurridas en la ola invernal de los años 2010 y 2011, o de eventos sísmicos superficiales como aquel que afectó al barrio San Francisco en el año 1998, en las zonas de amenaza relativa intermedia se podrían generar deslizamientos que eventualmente afectarían áreas mayores.

Estas zonas de amenaza relativa intermedia presentan una litología donde se destacan las arcillolitas, limolitas y las calizas meteorizadas, de pendientes moderadas e inclinación de los estratos en contra de la pendiente de la ladera, o en favor de la misma, pero con buzamientos suaves, especialmente en la loma del Colegio de La Salle y la loma del Barrio El Espinal, en algunas zonas del barrio Papayal, Kennedy, Las Flores y Palestina.

En algunas zonas la intervención antrópica y los procesos de erosión pueden ser localmente altos, principalmente en los sectores La Española, Nariño, San Bernardo y hacia el flanco oriental de la loma del Diamante. Igualmente se aprecian zonas con evidencias de deslizamientos antiguos y aparentemente estabilizados donde en la actualidad las actividades antrópicas son mínimas, o se han hecho obras de protección, tal como el sector oriental de la loma del Peyé y la subida de La Popa.

En la loma del Marión se destacan los sectores de Andalucía, 9 de Abril y Las Brisas, afectados por procesos denudacionales periódicos, acelerados por la intervención antrópica, en la parte superior e intermedia de las laderas, especialmente en el sector que colindan los barrios 9 de Abril, Las Brisas y Nueva Granada. También se destaca la inestabilidad en este rango, hacia el barrio La Campiña, parte de Zaragocilla y en el flanco oriental de un lomerío en Escallón Villa cerca del centro comercial Los Ejecutivos.



En el cerro de Albornoz y zonas de influencia se presentan amplias zonas de amenaza intermedia, asociadas con la inestabilidad de los rellenos del basurero clausurado de Henequén (sector nororiente), en el sector de Las Lomas al norte y en la parte superior del mismo cerro en forma de franja paralela a la divisoria de aguas, donde pese a que la intervención antrópica en los últimos años ha sido alta, el buen drenaje y la litología del área han mantenido la zona en este nivel de amenaza.

Debido a la dinámica geomorfológica y la actividad antrópica, algunas de estas zonas eventualmente pueden aumentar el grado de amenaza relativa por deslizamientos, presentando muchas de las consecuencias observadas en zonas de alta amenaza, por lo tanto es vital, realizar un tratamiento adecuado sobre estas zonas que garantice el mejoramiento o mantenimiento de las condiciones de estabilidad.

6.1.5. Amenaza relativa Alta a los PRM

Zonas inestables en sectores de pendientes altas a muy altas, muy susceptibles a los factores detonantes; están afectadas por procesos denudativos como deslizamientos, desprendimiento y caídas de material rocoso y flujos de tierras y/o detritos, así como erosión, en donde es común encontrar cicatrices de deslizamientos antiguos y estructuras de deslizamientos activos. Estos PRM afectan principalmente la zona de cerros de la ciudad, especialmente hacia el sector sur del Salto del cabrón, la loma del Guerrero y Nueva Granada, generando serios daños en la infraestructura cercana. El mal manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales pueden acelerar la profundización y extensión de los surcos, cárcavas y deslizamientos.

Las zonas de mayor inestabilidad en la ciudad están asociadas a la presencia de niveles delgados de areniscas, altamente friables y susceptibles a los factores detonantes, que se encuentran intercalados entre las formaciones calcáreas de La Popa y detrítica Bayunca. Se detectan arcillolitas y limolitas en la base y calizas al tope, con concentraciones locales de depósitos de coluvión y aluvión en la base de las laderas.

En el cerro de La Popa y sus estribaciones, las zonas de amenaza alta, se encuentran en el Salto del cabrón, segunda y tercera curva de la vía de acceso al convento de La Popa, lomas de San Blas, lomas del cielo, laderas de la Calle Guillermo Posada, Loma Fresca, parte de Nariño, Lo Amador, flanco sur de la loma del Diamante, Pablo VI, Paraíso I y II, Pedro Salazar, Republica del Caribe, loma del Guerrero (Barrio San Francisco), parte de la loma del Peyé y el sector de San Bernardo asociado a la explotación de antiguas canteras.

La actividad antrópica en estas zonas es alta, en razón de la intervención de drenajes naturales y la deforestación generalizada, que ha incidido en la formación de surcos, cárcavas y valles con erosión retrogresiva intensa, sumado a la presencia de escarpes en favor de la pendiente. Estos factores hacen proclive la ocurrencia de deslizamientos rotacionales y en menor medida traslacionales, adicionalmente se evidencian otros movimientos en masa antiguos que son susceptibles a ser reactivados.



Las zonas de amenaza alta de la loma del Marión son producto de la combinación de la litología del sector y las altas pendientes. Se presentan principalmente hacia los sectores de Nueva Granada, parte de 9 de Abril, Manzanares, Mirador de Zaragocilla y Piedra de Bolívar.

Finalmente en el cerro Albornoz, se encuentra una zona de amenaza alta asociada antiguamente a la explotación de las calizas aflorantes del sector. Se presentan mayores inestabilidades en el sector occidental y sur del mismo, por efecto principalmente de la intensa intervención antrópica y la presencia de areniscas friables hacia la parte media de la secuencia estratigráfica.

La estabilidad de estas zonas es difícil de recuperar a través de obras de remediación convencionales, en razón de la alta susceptibilidad a los PRM por efecto de las altas pendientes, intervención antrópica, procesos erosivos intensos y/o condiciones extremas de pluviosidad, por lo tanto se requieren medidas especiales para lograr estabilizar las zonas críticas.

Teniendo en cuenta las tres categorías definidas dentro de la zonificación de la amenaza relativa por PRM y la delimitación establecida a partir de las zonas de cerros de Cartagena, tomando como límite inferior una pendiente mínima del terreno de 5%., a continuación en la figura 147 se ilustra el Escenario de amenaza relativa por deslizamientos (calibrado) para la ciudad de Cartagena.

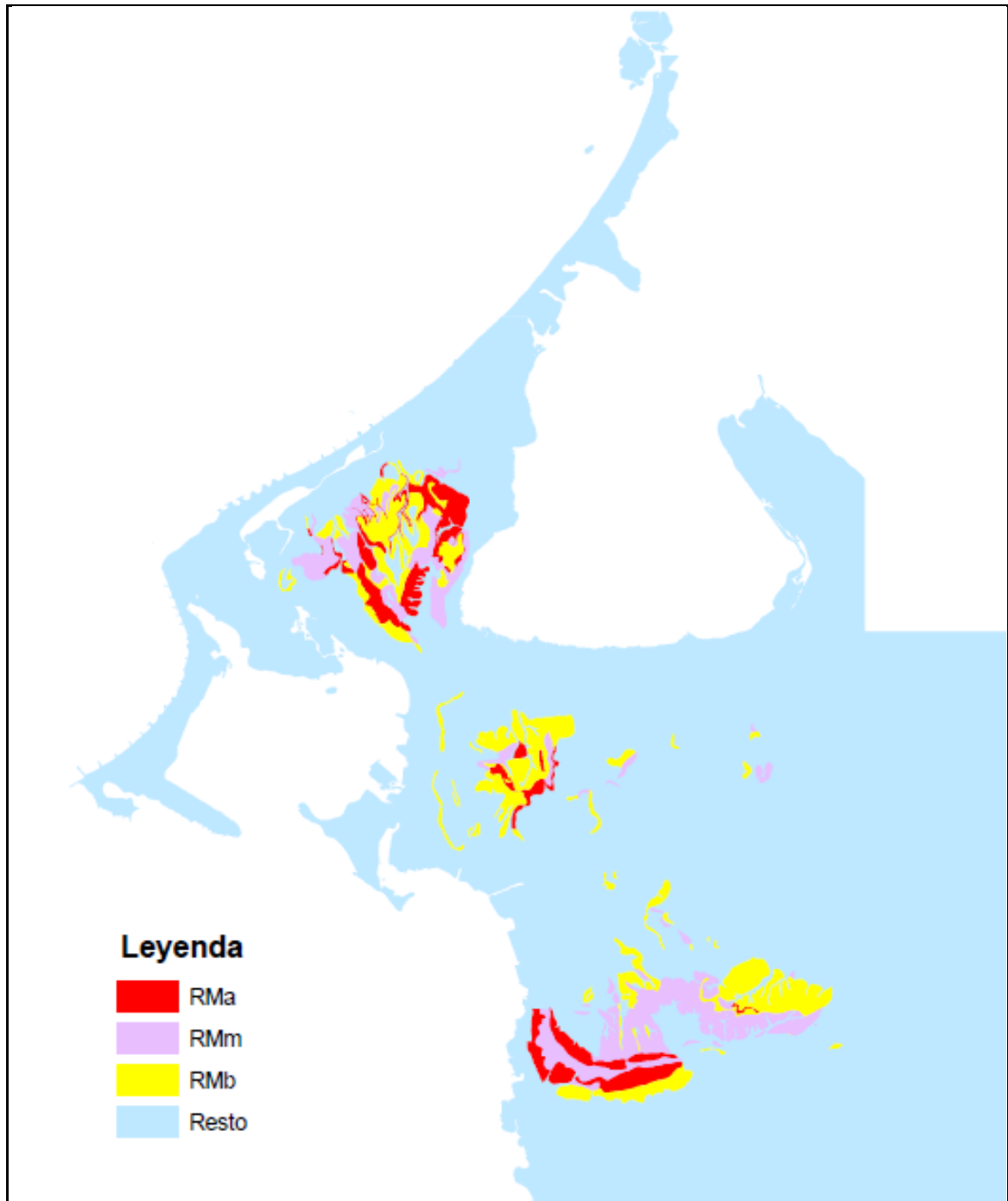


Figura 147. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos (calibrado)

Fuente: El autor (2015)



6.2. Comparación con Zonificación por PRM (2001b)

La mayoría de estudios de zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa que se proyectan tienen el propósito de orientar los desarrollos urbanísticos de forma segura y de alguna manera se constituyen en herramientas predictivas que están fundamentadas en ciertas hipótesis y simplificaciones. En el caso de Cartagena, Ingeominas (2001a) desarrolló a través de la metodología SES una zonificación por procesos de remoción en masa para la ciudad de Cartagena, identificando condiciones determinadas de estabilidad en las zonas de laderas de los cerros de La Popa y Albornoz, y en la loma del Marión.

Con el paso del tiempo se han presentado cambios naturales en las condiciones de estabilidad sobre varias zonas críticas de la ciudad debido a factores detonantes como la erosión, la intervención antrópica y las lluvias, por lo tanto actualmente la zonificación desarrollada por Ingeominas (2001a) presenta en dichos sitios algunas diferencias en relación con los niveles reales de amenaza por deslizamientos y se constituye en una herramienta que debe ser ajustada a la luz de los acontecimientos y procesos que han ocurrido en casi una década y media transcurrida.

En los últimos años Cartagena viene presentando un proceso sostenido de urbanización, incluyendo en zonas no aptas, en especial en las zonas de laderas que conforman los cerros circundantes, lo cual ha generado fuertes procesos de erosión que localmente desencadenan procesos de remoción en masa. La intervención antrópica afecta los sistemas de laderas de la mayoría de los municipios de Colombia y Cartagena no es la excepción. La ciudad experimenta procesos significativos, en los cuales se ha modificado el uso del suelo, debido a la cantidad elevada de asentamientos humanos. En los sectores de deslizamientos se presentan cortes y excavaciones al pie de las laderas para adecuación y ampliación de viviendas y lotes, alteración de drenajes naturales, intervención de la cobertura vegetal, vertimiento de aguas negras y residuos sólidos usualmente en zonas altas y la quema indiscriminada de basuras. Adicionalmente las condiciones climáticas que se han potenciado por las fuertes olas invernales de los últimos años, inciden en la estabilidad de las laderas existentes.

Dicho esto, se ha elaborado un escenario de amenaza relativa por deslizamientos teniendo en cuenta los cambios en las condiciones de estabilidad de seis (6) zonas críticas, para establecer la evolución de los movimientos en masa.

A continuación en el cuadro 58 se muestra un cuadro comparativo de niveles de amenaza relativa por remoción en masa para el año 2001 y 2015, teniendo en cuenta lo planteado por Ingeominas (2001a) y lo ya consignado en el presente documento.



Sector	Nivel de amenaza relativa por PRM		Categoría de cambios morfológicos	Evolución
	2001	2015		
Loma del Diamante	Medio	Alto	Bajo	Reactivado
Lo Amador sector Ricaurte	Medio	Alto	Medio	Reactivado
Loma del Peyé	Bajo	Alto	Medio	Reactivado
San Francisco	Medio	Alto	Alto	Reactivado
Nueva Granada	Medio	Alto	Alto	Reactivado
Manzanares	Alto	Alto	Alto	Reactivado
Salto del cabrón	Alto	Alto	Medio	Estacionario

Cuadro 58. Comparativo de niveles de amenaza por PRM 2001-2015

Fuente: El autor (2015)

En general estos movimientos en masa han tenido actividad en los últimos 14 años, en razón de distintas combinaciones de factores detonantes (lluvia, erosión, sismo e intervención antrópica), por lo tanto su nivel de amenaza relativa a los procesos de remoción en masa se ha incrementado de medio a alto en 4 de 7 casos.

6.2.1. Caso Cerro de La Popa y Estribaciones

En el Cerro de La Popa y sus estribaciones se evaluaron cinco (5) zonas críticas tales como Loma del Diamante, Lo Amador sector Ricaurte, Loma del Peyé, San Francisco y Salto del Cabron (sector sur). En la figura 148 se muestra la zonificación por PRM de Ingeominas del año 2001 y se referencian las cinco zonas críticas estudiadas.

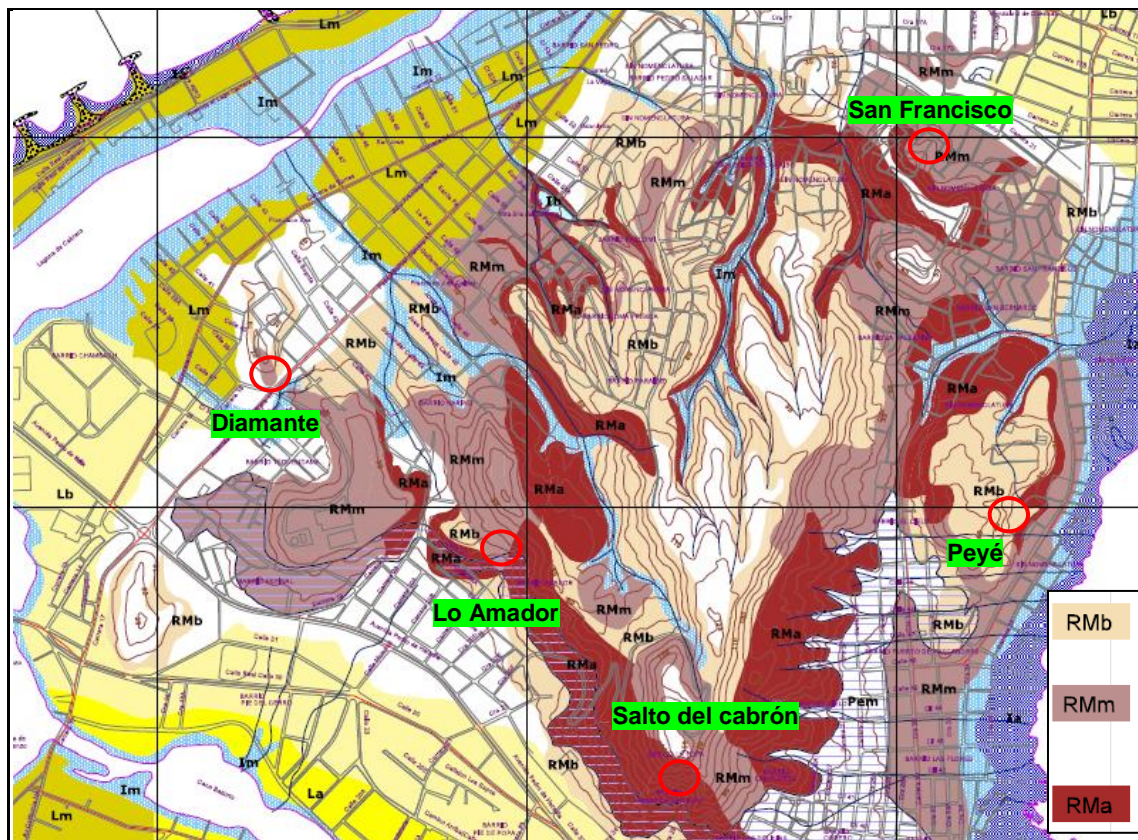


Figura 148. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Cerro de La Popa y estribaciones

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



En la figura 149 se muestra el sector del Cerro de La Popa zonificado mediante la generación de un escenario de amenaza relativa por deslizamientos y se referencian las cinco zonas críticas estudiadas.

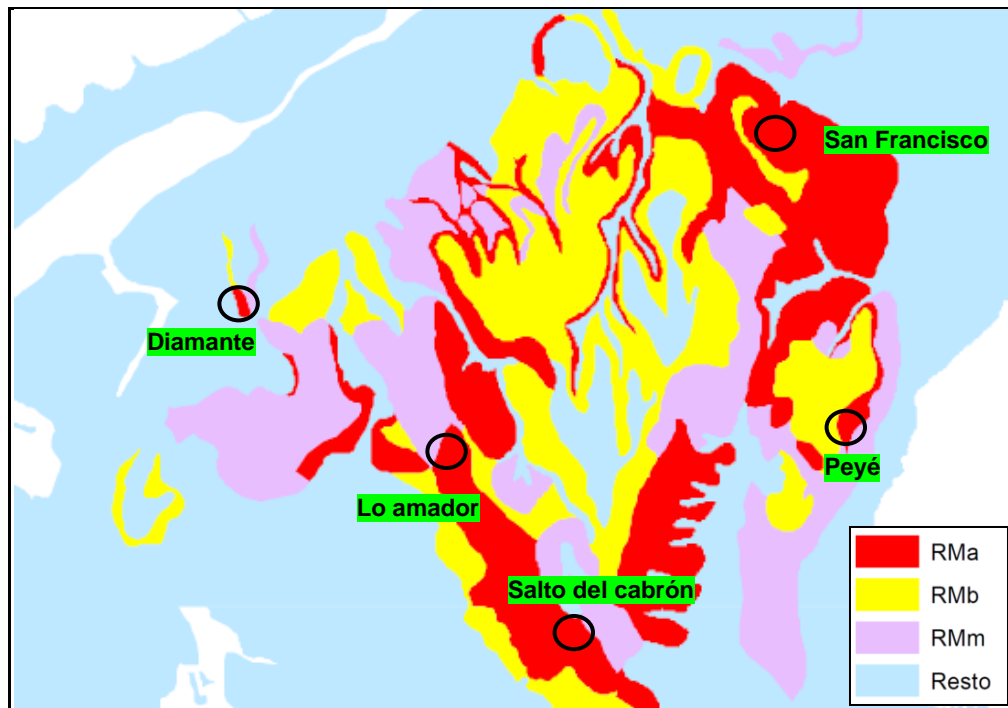


Figura 149. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos - Sector Cerro de La Popa
Fuente: El autor (2015)

Al comparar puntualmente las zonas críticas entre los años 2001 y 2015 se observa que el deslizamiento de San Francisco presenta cambios significativos en su nivel de amenaza, pasando de medio a alto y afectando más de 20 hectáreas de terreno. Se concluye que los eventos ocurridos en el año 2010 (ola invernal), en el cual se reactivaron antiguos deslizamientos, destruyendo un gran número de viviendas, ha generado una situación de amenaza latente, aun hoy, 5 años después. Por otro lado, en la loma del Peyé se han presentado los mayores cambios en la estabilidad del sector, puesto que se han reactivado antiguos movimientos, esta vez con mayor intensidad, en especial por efecto del factor antrópico, que han elevado el nivel de amenaza, pasando de bajo a alto en ciertas zonas.

En estos sitios se aprecian en general zonas escarpadas de pendientes que varían entre 12° y 70°, asociadas particularmente a las formaciones calcárea de La Popa y detrítica Bayunca, que corresponden a una alternancia variable de arcillolitas y limolitas pardas a grisáceas con presencia de niveles delgados a intermedios de areniscas calcáreas, susceptibles a los deslizamientos. Se evidencian concentraciones locales de depósitos coluviales, aluviales y coluvio-aluviales al pie de las laderas, así como depósitos de playón en aquellos sectores cercanos a las lagunas (San Francisco y lomas del Diamante y del Peyé).

La morfología de los cuerpos de los deslizamientos se ha modificado drásticamente, en especial en San Francisco, puesto que los materiales una vez deslizados han sido removidos periódicamente con maquinaria, estos cambios son más notables en la zona



de acumulación de los deslizamientos sobre la base de los mismos. El área de influencia de estos deslizamientos se ha incrementado, en cuanto a la distancia desde la punta hasta la corona por efecto de movimientos retrogresivos y longitud y ancho de la superficie de falla.

En el caso de los sectores Lo Amador, loma del Peyé y Salto del cabrón, los cambios en los rasgos morfológicos han sido menos acentuados, aunque significativos, se han presentado modificaciones que se consideran intermedias. La loma del Diamante ha sido el sector con menos cambios en su morfología, pese a los flujos de detritos que se presentan, especialmente en época invernal.

En cada sector existe evidencia de erosión superficial, con la consecuente modificación del relieve, en especial hacia las zonas escarpadas, aunque es importante destacar que se conservan en esencia la forma del perfil y las principales estructuras de los deslizamientos.

Finalmente la presencia de vegetación en cada caso aumenta o disminuye de manera notable en su superficie, en cuanto a cobertura, altura y densidad, dependiendo del grado de actividad del deslizamiento y de la época del año.

6.2.2. Caso Loma del Marion

En la loma del Marion y sus estribaciones se evaluó la zona comprendida entre la urbanización Nueva Granada y el sector de Manzanares, aclarando que se tratan de dos (2) sectores cercanos entre sí.

Al comparar puntualmente las zonas críticas entre los años 2001 y 2015 se observa en las figuras 150 y 151 que la zona de Nueva Granada presenta los mayores cambios en su nivel de amenaza, pasando de medio a alto, a causa de los constantes flujos de materiales que se han presentado de forma periódica, especialmente en los últimos cinco años. Es importante destacar que en principio se han generado deslizamientos localizados que han variado a flujos de material, por efecto del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento en la época del año. En el caso de Manzanares, el nivel de amenaza relativa se ha mantenido en un grado alto, puesto que al igual que en el sector de Nueva Granada, se han presentado constantes flujos de materiales de forma periódica, arrastrando la capa vegetal existente y evidenciando en la zona un nivel de inestabilidad que aparentemente ha disminuido, por algunas obras civiles que se han realizado durante el año 2014.

En Nueva Granada y Manzanares los cambios en los rasgos morfológicos han sido muy acentuados en los últimos años, se han presentado modificaciones topográficas que se consideran significativas. Esto se justifica en razón de movimientos de materiales térricos que se han deslizado y han sido removidos periódicamente con maquinaria. El área de influencia de estos deslizamientos se ha incrementado, en cuanto a la distancia desde la punta hasta la corona por efecto de movimientos retrogresivos y longitud y ancho de la superficie de falla.

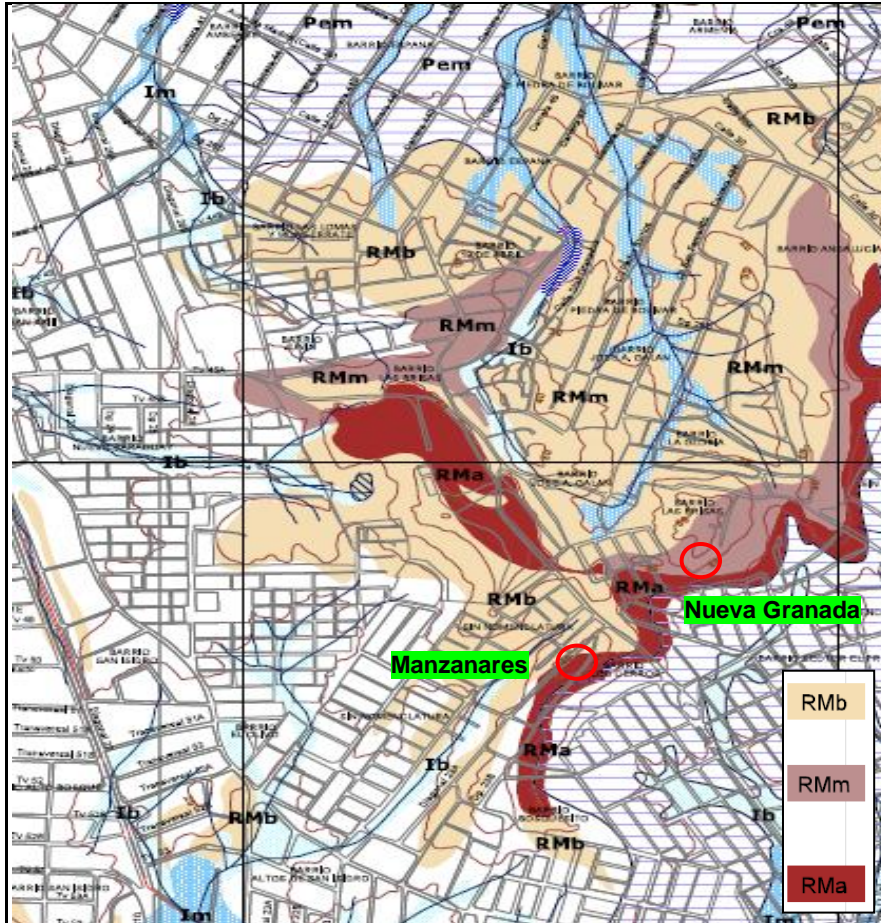


Figura 150. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Loma del Marión
Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)

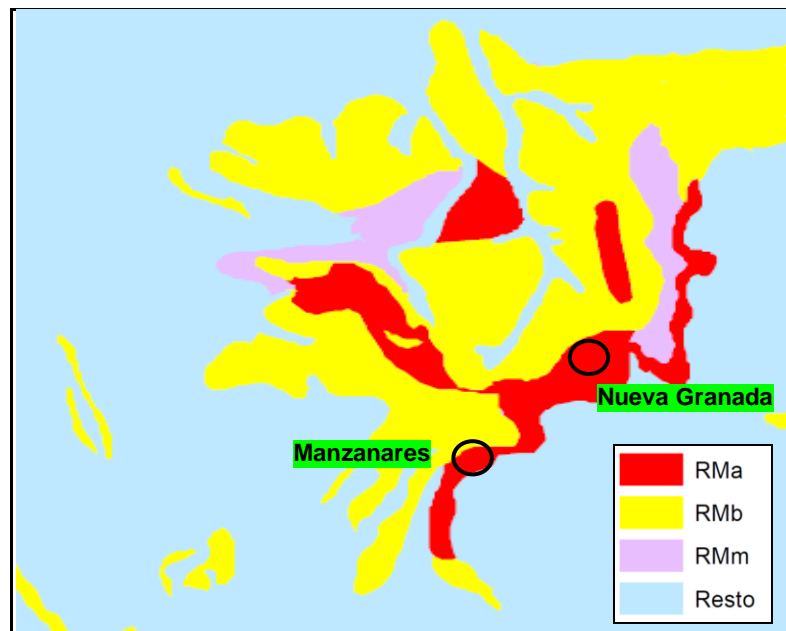


Figura 151. Escenario de amenaza relativa por deslizamientos - Sector Nueva Granada
Fuente: El autor (2015)



También se han evidenciado en estos años procesos intensos de erosión superficial, con la consecuente modificación del relieve, en especial hacia las zonas escarpadas. En relación con la presencia de vegetación en las zonas de deslizamiento, como se mencionó antes, la capa vegetal ha sido arrastrada una vez se presenta la inestabilidad, pero con el paso de tiempo vuelve a crecer de manera notable en su superficie, en cuanto a cobertura, altura y densidad, dependiendo del grado de actividad del deslizamiento y de la época del año.

Caso Cerro de Albornoz

Aunque no se realizaron comparaciones con el cerro de Albornoz (ver figura 152), pues ninguno de los 6 sitios críticos se localizan en dicho cerro, es importante comentar que en los últimos años este sector ha tenido una alta intervención antrópica, traducida en un sin número de asentamientos irregulares que han cambiado las condiciones de estabilidad de varias zonas, modificando los drenajes naturales y realizando cortes significativos para realizar ampliaciones, especialmente en la parte alta y baja de las laderas. Las autoridades han intentado controlar estos procesos de invasión, sin embargo hasta el momento no han sido completamente efectivos.

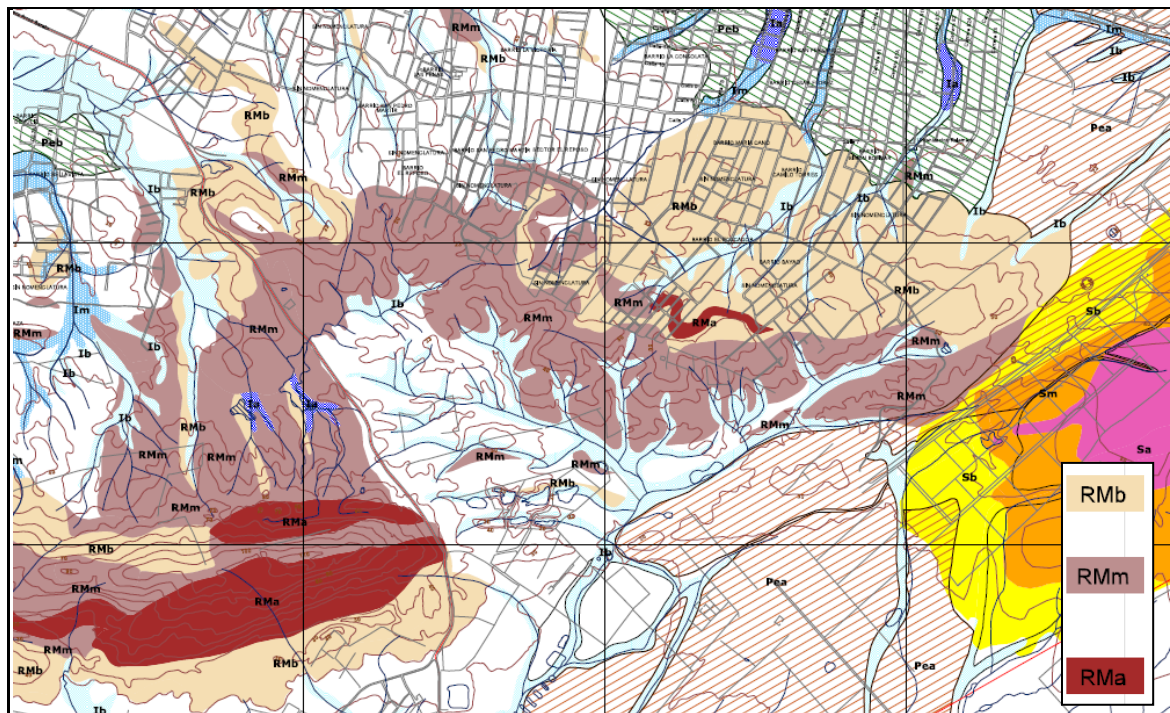


Figura 152. Mapa de zonificación por PRM de Cartagena - Cerro de Albornoz

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



6.3. Discusión sobre la confiabilidad de la Metodología SES (1989)

La metodología SES (1989) es un sistema heurístico de evaluación de la estabilidad de taludes mediante puntajes. En esencia la metodología ha sido diseñada de tal forma que desarrolla un amplio trabajo en la caracterización de los parámetros intrínsecos y detonantes involucrados, lo cual es muy adecuado, pero es quizás la forma de combinar algunos parámetros una de las causas que podría estar incidiendo en el resultado final (Díaz, 2004) y en su porcentaje de acierto en relación con lo que existe realmente en el campo.

Gonzalez (2006) explica que de los ocho (8) parámetros de evaluación de la metodología SES, los más difíciles de parametrizar en su orden son Materiales (M), Relieve (R), Densidad de Drenaje (D) y Erosión (E). En concordancia con lo planteado por Gonzalez (2006), se puede decir que en el caso de Cartagena, se presentaron algunas dificultades en la evaluación del parámetro Erosión (E), puesto que el análisis se realizó a partir de información secundaria, escasa en algunas zonas. Dicho todo lo anterior, es evidente que las dificultades que se presentan en el análisis de algunos parámetros trae consigo la necesidad de realizar algunas simplificaciones y ciertas consideraciones que de alguna manera inciden en la confiabilidad de la metodología.

Cabe mencionar el trabajo realizado en la tesis de Díaz (2004) y los resultados obtenidos, como elemento de referencia en el presente numeral. En este trabajo se presenta un estudio comparativo de metodologías de zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicado al sector rural de Villavicencio. Los resultados muestran que las metodologías de Van Westen (1997) y Rodríguez (2001) presentan porcentajes de acierto del orden de 91 y 81% respectivamente, seguidos por la metodología SES (1989) con un 73% y finalmente la metodología de Mora y Vahrson (1994) con un 48%.

Se observa que la metodología SES para Villavicencio presentó resultados admisibles a la luz de los procesos de inestabilidad evaluados, al igual que para la ciudad de Cartagena, lo que le otorga un nivel de confiabilidad relativamente bueno, haciendo la salvedad que en ambos casos ha sido necesario calibrar y establecer categorías libres y relativas únicamente a las áreas de estudio, que podrían ser aplicables a zonas cercanas y/o con condiciones similares, es decir que la metodología SES, por el momento, solo es válida como un índice de estabilidad relativa para un área dada, de acuerdo con lo planteado por González (2006), pero en ambientes diferentes su aplicación indiscriminada puede generar errores.

Es importante mencionar que la aplicación de la metodología SES genera en realidad mapas de zonificación de amenaza "relativa" (o de susceptibilidad) para un área dada, puesto que al no establecerse la probabilidad de ocurrencia de un evento dado (probabilidad de falla) y menos aun sus variaciones espaciales y temporales, no se puede considerar que los mapas obtenidos sean de amenaza propiamente dichos.

Dado que la metodología SES funciona bajo consideraciones subjetivas por parte de quien la implementa, es importante para mejorar su aplicación en un corto plazo que se haga una revisión detallada de la misma, a la luz de los recientes avances tecnológicos y la disponibilidad de información técnica de mayor calidad en varias zonas de estudio. Es importante revisar para cada parámetro establecido sus intervalos de variabilidad



(algunos definidos desde 1988) de acuerdo con su influencia en la estabilidad de las laderas, es decir teniendo en cuenta su peso dentro de la calificación final. También se deben actualizar algunos pesos de referencia de la metodología que fueron obtenidos a través de encuestas efectuadas a ingenieros geotecnistas hace más de 25 años, haciendo la salvedad que cada área de estudio tiene sus particularidades y el uso de la metodología debe hacerse de modo discriminado según las condiciones de sitio.

Es claro que existen otras metodologías de análisis que arrojan resultados con un nivel de incertidumbre menor con respecto a la metodología SES. Sería interesante evaluar la posibilidad de adaptar la metodología SES hacia un enfoque más determinístico, que brinde la posibilidad de hacer predicciones de comportamientos ante cambios en las condiciones de los materiales, aunque esto requiere mayor nivel de detalle, al pasar a una escala un poco más local que intermedia, y toma de datos más específicos de índole geotécnico, geológico y geomorfológico.

En general la evaluación de la amenaza por deslizamientos para un alto grado de confiabilidad es posible sólo al superar una serie de obstáculos entre los que se citan aquellos de mayor relevancia tal como la naturaleza discontinua de las fallas en los taludes (en espacio y tiempo), identificar las causas, los principales factores desencadenantes y las relaciones causa-efecto, y contando con una secuencia completa de datos históricos relacionada con la frecuencia de estos procesos geomorfológicos. Esto requiere de estudios cuidadosos y detallados, y por ende de grandes inversiones, que algunas veces no se justifican.

Por lo tanto, se concluye que la confiabilidad requerida para la evaluación de los parámetros de evaluación de la Metodología SES y los resultados esperados dependerá en gran medida de la calidad y cantidad de información técnica que se utilicé, aclarando que los resultados podrán ser admisibles más no exactos, aun cuando la información sea óptima, puesto que este tipo de metodologías presentan limitantes inherentes a sus propias concepciones.



Conclusiones y recomendaciones

La ciudad de Cartagena se encuentra ubicada en una zona costera, accidentada e irregular, en la que actúan procesos geológicos muy particulares que convierten a la ciudad en un sistema de gran fragilidad ambiental. A nivel regional, la ciudad está influenciada por el Cinturón del Sinú asociado a los fenómenos de diapirismo de lodo que han modelado el relieve en tiempo subreciente destacándose la formación de cerros y lomas en una ciudad de topografía predominantemente plana.

Aunque Cartagena se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica baja, se considera un área geológica compleja, desarrollada sobre terrenos plegados y localmente fracturados, como resultado de los esfuerzos del frente de deformación relacionado con la convergencia de las placas Caribe y Suramérica y por la acción de estructuras tipo pliegues, fallas, lineamientos y diaclasas, entre las cuales se destacan la falla de Mamonal, Henequén, de La Popa y Las Brisas, algunas de ellas con evidencia de actividad.

De La precipitación media anual, se puede decir que la información de las estaciones hidrometeorológica indica que hacia el sector de Crespo al norte de la ciudad y hacia Bayunca y Cañaveral se presentan los valores más altos de pluviosidad, variando de 1034 a 1325 mm, mientras que en los corregimientos de Santa Ana y Galerazamba y hacia la isla de Manzanillo del Mar se presentan los valores más bajos, variando de 740 a 865 mm. Al evaluar la ciudad en conjunto, a partir de las isoyetas de precipitación media anual, se observan que sus variaciones son consistentes con los valores de las estaciones, aumentando proporcionalmente dentro del casco urbano en dirección suroccidente - nororiente en un rango de 770 a 1040 mm.

Con base en el resultado final del trabajo, se corrobora la hipótesis de que los cerros y lomas de la ciudad son susceptibles a procesos de inestabilidad y que esto es favorecido por las características morfológicas de los mismos. Del mapa final de amenaza relativa a los deslizamientos que se obtuvo, se concluye que un 20.9% de las zonas de laderas de Cartagena presentan sectores de categoría de amenaza alta, donde predominan en primer lugar procesos erosivos que dan lugar a movimientos en masa tipo flujos de tierras y/o detritos, caídas y deslizamientos propiamente dichos.

La combinación de factores intrínsecos como el relieve escarpado, tipo de material e influencia de las fallas y de factores detonantes como lluvia, erosión e intervención antrópica, hacen propicio la ocurrencia de múltiples procesos denudativos en la ciudad y por ende la reactivación de zonas inestables, especialmente en el cerro de La Popa, las cuales han sido identificadas en el mapa final de amenaza relativa a los deslizamientos.

De las estaciones seleccionadas se obtuvo que la precipitación acumulada antes de la ocurrencia de un deslizamiento presenta valores de lluvia crítica que varían entre 387 y 586 mm para duraciones críticas que oscilan entre 37 y 46 días. Con base en las curvas de precipitación máxima acumulada (mm) vs duración (días) se determinó que el período de retorno para la lluvia crítica está comprendido entre 7 y 19 años.

A partir de la correlación entre la precipitación media anual vs elevación y vs período de retorno para la lluvia crítica de las estaciones seleccionadas, se determinó que el período de retorno crítico está comprendido entre los 9 y 11 años para los puntos sintéticos que



se consideraron en Tierra Bomba, Villas de la Candelaria, loma del Marión y Cerros de La Popa y Albornoz. Se recomienda instalar nuevas estaciones hidrometeorológicas en la ciudad, algunas de ellas en la ubicación de los puntos sintéticos, que permitan la obtención de mayor cantidad de información, especialmente pluviográfica y por ende la realización de un mejor análisis de lluvias.

La obtención del período de retorno para la lluvia crítica se realizó a nivel regional con base en la información disponible de las estaciones seleccionadas, variando en un rango de 7 a 19 años, sin embargo a nivel del casco urbano, el período de retorno para la lluvia crítica varía en un rango diferente enmarcado dentro del regional, entre 7 y 12 años.

De la evaluación del parámetro clima se obtuvo la ecuación de calificación $P = 7,6 \times (Tr - 7)^{0,62}$ en función del período de retorno para la lluvia crítica. La ecuación muestra que para un período de retorno $Tr \geq 21.6$ años se tienen 40 puntos, lo cual indica un nivel de pluviosidad muy bajo. Se concluye que Cartagena presenta un comportamiento de la lluvia heterogéneo, donde un 51% de la zona obtuvo una calificación de alta a muy alta, para las condiciones más extremas de pluviosidad, mientras que en la zona restante hacia el suroriente del casco urbano se obtuvieron calificaciones medias a bajas, razón por la cual se puede decir que esta es una subregión con un comportamiento de lluvia bajo.

La evaluación del factor de amplificación sísmica (Q) se realizó asumiendo un mapa de distribución de perfiles de suelo según la NSR-10 que se definió con base en la zonificación geotécnica de Cartagena hecha por Ingeominas (2001a), para poder conocer el tipo de Material terreo a amplificar. En Cartagena se presenta predominantemente el perfil de suelo tipo S2 (C) y en menor medida el perfil tipo S1 (A-B), donde el factor Q varía entre 1.05 a 1.30 acorde con la pendiente del terreno. Se recomienda para futuros estudios de amenaza sísmica, implementar una metodología que permita la obtención de factores de amplificación sísmica más precisos.

De la evaluación del parámetro Sismo se obtuvo la ecuación de calificación $PS = 12 \cdot \exp(-27 \cdot As^2)$ en función de la aceleración en superficie. La ecuación muestra que para aceleraciones entre 0.105 y 0.15g se tienen puntajes que varían entre 8.91 y 6.56 puntos respectivamente, lo cual indica un nivel de sismicidad bajo de la ciudad poco propenso a la generación de deslizamientos. Se aclara que los resultados de calificación del parámetro sismo están sujetos a las consideraciones iniciales hechas para la elaboración del mapa de distribución de perfiles de suelo según la NSR-10 y son susceptibles de cambios según el método que se implemente.

Al evaluar la erosividad, como índice de erosión pluvial, se encontró la dificultad de su estudio en razón de la escasez de registros pluviográficos de la zona, por lo tanto se adoptó como distribución espacial la distribución de isoyetas de precipitación media anual de la ciudad, a partir de información hidrometeorológica de la estación Aeropuerto Rafael Nuñez.

La erosividad obtenida para Cartagena aumenta de modo proporcional con la precipitación media anual, en dirección occidente-oriente y sur-norte, presentándose los mayores valores del factor R hacia el cerro de La Popa y más hacia el norte (Crespo) y hacia el oriente, con magnitudes que oscilan entre 84.3 y 113.8 MJ.mm/ha.h.



La erodabilidad del suelo cartagenero debe ser obtenida a partir de un mapa consolidado de unidades de suelo, sin embargo al no tener esta información, se definieron preliminarmente unidades de suelo utilizando la zonificación geotécnica del casco urbano de Cartagena llevada a cabo por Ingeominas (2001a). Los resultados de la modelación indican que las áreas de mayor grado de vulnerabilidad a la erosión del suelo se localizan hacia las zonas de laderas donde se destacan el cerro de La Popa, la loma del Marión y el cerro de Albornoz, y hacia la variante Mamonal - Turbaco donde se presentan depósitos arcillosos relacionados con el fenómeno del diapiroismo de lodo, de una erodabilidad alta.

En relación a las prácticas de manejo o conservación de los suelos por efecto de la erosión, se puede decir que en Cartagena no existe un plan de acción sostenible y efectivo de prácticas de conservación de suelos, más allá de algunos proyectos aislados de intervención local de zonas verdes, que son difícilmente representativos dentro de un marco de ciudad.

Aunque los procesos erosivos en Cartagena son predominantemente de origen costero, en el presente trabajo académico se hizo énfasis en el estudio de aquellos procesos que tienen lugar en las zonas de laderas, como detonantes de los movimientos en masa, por lo tanto su evaluación se llevó a cabo a través de un modelo empírico de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) formulada por Wischmeier y Smith (1962), obteniendo una variación de la erosión potencial de 0 a 38.39 T/ha/año, donde los máximos valores se evidencian en la zona de cerros, con un porcentaje de 6% del área de estudio.

De la evaluación del parámetro efecto antrópico se obtuvo la ecuación de calificación $PA = 3,2 \cdot \exp^{(0,1 \cdot EA)}$ en función de la diferencia de calificaciones del parámetro vegetación de los años 2014 y 2001 que representa la intervención antrópica evaluada para Cartagena. Aunque solo la evaluación de este parámetro se enfocó en la valoración de la tasa de deforestación de las zonas de laderas, se pueden evaluar otro tipo de variables, las cuales sobrepasan el alcance del presente trabajo académico.

De todos modos, es importante destacar que pese a que Cartagena es una zona altamente urbanizada, se presenta intervención antrópica, especialmente en la zona de laderas, como en el resto de municipios del país, destacándose la modificación del uso del suelo, debido a la cantidad elevada de asentamientos humanos, se presentan cortes y excavaciones al pie de las laderas para adecuación y ampliación de viviendas y lotes, alteración de drenajes naturales, intervención de la cobertura vegetal, vertimiento de aguas negras y residuos sólidos usualmente en zonas altas y la quema indiscriminada de basuras, adicionalmente las condiciones climáticas que se han potenciado por las fuertes olas invernales de los últimos años han incidido en la generación de erosión, que localmente desencadenan deslizamientos.

Han transcurrido más de 14 años desde que los resultados de la zonificación de susceptibilidad por remoción en masa de Cartagena de Ingeominas (2001a) fueron publicados, por lo tanto al identificar las zonas de amenaza relativa por deslizamientos del escenario "actualizado", se presentan diferencias en la calificación final de estabilidad, en razón de la evolución de los movimientos en masa y la calibración realizada sobre los cuatro (4) parámetros detonantes.



Los procesos de remoción en masa seleccionados, se concentraron en el cerro de La Popa y sus estribaciones, como principal zona de laderas de la ciudad, donde se destacan los sectores críticos de Loma del Diamante, Lo Amador, lomas del Rosario, Loma del Peyé, San Francisco y el Salto de Cabrón. La mayoría de estos sectores son afectados periódicamente y modo predominante por flujos de tierra y/o detritos y deslizamientos localizados de tipo rotacional, y en menor medida por desprendimientos y caídas de material.

En los sitios críticos afectados por PRM se recomienda la implementación de trabajos de recuperación encaminados obras de contención y protección donde haya lugar, realización de corte y perfilamiento de los taludes que lo requieran, revegetalización con especies nativas funcionales, protección de material calizo pendiente mediante revestimiento de concreto, instalación de muros en gavión en aquellas zonas de flujo periódico, construcción de canales colectores, cunetas y lechos filtrantes para el manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales y a través de estructuras de fijación de sedimentos para impedir la profundización de surcos y cárcavas.

Se recomienda desarrollar prácticas sostenibles de manejo y conservación de suelos, enfocadas en las zonas de ladera de la ciudad, en razón de la erosión que allí tiene lugar, garantizando la conservación de la cobertura vegetal para mitigar la acción de agua en el transporte de sedimentos y evitar la degradación o pérdida de suelos, puesto que cada tipo de suelo tiene un comportamiento diferente y requiere un uso racional y un manejo adecuado para su conservación.

La zonificación de amenaza relativa por deslizamientos presentada en el presente trabajo académico es el resultado del análisis semicuantitativo de distintas variables intrínsecas y detonantes.

De los 81.34 km² de la totalidad del casco urbano, se delimitaron las zonas de cerros y sus áreas de influencia, quedando el área de estudio ajustada a 9.23 km². En promedio el 30.4% del área de estudio se categorizó en el nivel de amenaza media, el 20.9% como amenaza alta y el restante 48.7% como amenaza baja. Lo anterior permite concluir que la condición general de estabilidad de Cartagena se encuentra en un estado de equilibrio relativo con relación a su entorno geoambiental, dando lugar a la posibilidad de que un área determinada pueda cambiar de categoría de estabilidad, en forma positiva o negativa, dependiendo de los parámetros detonantes, principalmente de las condiciones de lluvia y de la acción antrópica sobre el medio físico.

La metodología SES aplicada en la generación de un escenario de amenaza relativa por deslizamientos de Cartagena, es en esencia un sistema heurístico de evaluación de estabilidad de taludes que funciona mediante la asignación de puntajes a los parámetros de evaluación y por lo tanto está sujeto a una cantidad de consideraciones subjetivas por parte de quien evalúa. Se recomienda la utilización de metodologías probabilísticas y/o de técnicas de observación satelital y herramientas avanzadas de análisis de datos que permitan zonificar las amenazas por deslizamientos, obteniendo un resultado más objetivo.



Se recomienda analizar la posibilidad de incorporar dentro de la metodología SES (1989) parámetros adicionales de evaluación enfocados hacia los siguientes aspectos:

- Análisis de la evolución de la actividad del deslizamiento y su edad
- Una variable que permita introducir datos geotécnicos que aporten en la calificación de estabilidad.
- Evaluación de materiales térreos minoritarios, a los cuales se les asigne una calificación que sea adicional a la calificación del parámetro Materiales, que está enfocada en aquellos predominantes.
- Un parámetro que discrimine la ocurrencia o no de deslizamientos en áreas de condiciones similares.
- Evaluación de condiciones del agua subterránea (Hidrogeología).
- Combinar parámetros según lo planteado por Díaz (2004) e incluso de relacionar la función de susceptibilidad y la función detonante.
- Es importante analizar la posibilidad de ampliar y modificar la manera de estudiar el nivel de amenaza por procesos erosivos incluyendo criterios de análisis.

En la evaluación del parámetro de Efecto Antrópico del presente trabajo se utilizó únicamente la deforestación como variable de análisis, asignando puntajes para dos épocas (2001 y 2014) según los mapas de cobertura vegetal. Se recomienda realizar futuras investigaciones sobre la ocurrencia de deslizamientos evaluando los efectos de sobrecarga y descarga en la zona de laderas de Cartagena, por infiltración de agua de escorrentía y por modificación de drenaje.

Se recomienda profundizar en el desarrollo y patronamiento del parámetro de Efecto Antrópico, especialmente en zonas urbanas, donde se han hecho planteamientos particulares para la ciudad de Bogotá por parte de Millán y Gonzalez (2001). Este parámetro no es comparable entre zonas rurales y zonas baldías de índole urbana, por lo tanto debe establecerse la forma de diferenciarlos, en relación a la asignación de puntajes.

La variable Erosión (E) es de difícil parametrización y estimación, teniendo en cuenta que puede generar inestabilidad sobre una masa estable, sobre material ya movilizado o combinado, siendo estos escenarios totalmente distintos. Se recomienda para futuras investigaciones desarrollar modelos de estimación del proceso erosivo y de sedimentación, utilizando mayor información local e incorporando nuevas variables de clima y edafológicas, que permitan pronosticar cambios en la superficie terrestre.

El parámetro Clima (C) se evaluó con información hidrometeorológica de 6 estaciones ubicadas dentro del área de estudio y en zonas vecinas. Se recomienda realizar un análisis más detallado a través de registros de precipitación utilizando información adicional de otras estaciones cercanas disponibles, preferiblemente de tipo pluviográfica, la cual también servirá como insumo para futuras investigaciones en donde se evalúe la variable de erosividad, como índice de erosión pluvial y se establezca una mejor distribución espacial de la misma dentro de la ciudad de Cartagena.



El estudio de Ingeominas (2001b) cuyo fin era determinar las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las rocas y suelos que afloran en el casco urbano de Cartagena y evaluar los factores de amenazas geológicas, tanto naturales como antrópicas, se utilizó como insumo base dentro del presente trabajo académico, sin embargo se recomienda el desarrollo de nuevos estudios sobre las amenazas naturales y riesgos a los que está expuesto el Distrito de Cartagena, puesto que las evaluaciones y análisis técnicos disponibles ya tienen más de una década y media de existencia y a la luz de los acontecimientos actuales pueden estar parcialmente desactualizados.

Aunque el parámetro Sísmico es evaluado en el presente trabajo académico siguiendo lineamientos metodológicos de Ingeominas (2001-2003) y Cartagena es una ciudad ubicada en zona de amenaza sísmica baja, se recomienda adelantar investigaciones acerca del efecto de la amplificación de ondas sísmicas en los cerros de la ciudad de Cartagena (La Popa, Albornoz y Marion), especialmente por el efecto de la resonancia entre el periodo del sismo y su relación con el periodo del suelo y del obstáculo topográfico.



Referencias bibliográficas

Aguilar-Collazo, R. D., Jiménez, M. (2005). Clasificación Geomorfológica y Análisis de la Variación Espacial y Temporal de las Playas de Cartagena: Sector Punta Santo Domingo hasta la Playa Sur de la Bocana. Tesis de Pregrado, Ingeniería Civil. Universidad de Cartagena. 122 p.

Alcaldía Mayor de Cartagena, Oficina de Planeación Distrital (2003). División de Sistemas de Información. Cartografía temática de Cartagena. Disponible en <http://www.cartagenacomovamos.org/cartagena_division.php>. Fecha de Consulta: 20 de Julio de 2014, 10:30 a.m.

Aleotti P., Chowdhury R. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspective, Bulletin of Engineering Geology of the Environment, (1999) 58: 21-44.

Andrus, R.D., and T.L. Youd. (1987). Subsurface Investigation of a Liquefaction Induced Lateral Spread, Thousand Springs Valley, Idaho. Miscellaneous Paper GL-87-8. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). Landslide types and processes.

Ángel, C., Esquivel, J. y Sarmiento, G. (1985). Geología del Departamento de Bolívar al Norte del Canal del Dique. Informe 1941 Ingeominas, Bogotá.

Aristizabal, C., Ferrari, A., Silva, C. (2009). Control Neotectónico del Diapirismo de Lodo en la región de Cartagena, Colombia. I+D, Vol. 8, N° 1, Julio de 2009, pp. 42-50.

Arnoldus (1977). Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. In: Guidelines for watershed management. FAO Conservation Guide, 1: pp 99-124. FAO, Roma.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). Comité AIS 300 - Amenaza sísmica. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Segunda edición: Ingeominas (1998). Bogotá, Colombia.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). Comité AIS 300 - Amenaza sísmica. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009. Bogotá, Colombia.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98. Bogotá, Colombia: AIS, 1998.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Bogotá, Colombia: AIS, 2010.

Ávila, G. (1996). Metodología para evaluación cuantitativa de erosión en taludes viales. En: Congreso colombiano de Geotecnia. Erosión. Memorias, volumen 1. Sociedad colombiana de Geotecnia. En: Ingeominas (2001-2003). Zonificación Integral por Amenazas Naturales para la Ciudad de Villavicencio – Meta. Fases I y II.

Barboza, G. (1996). Zonificación Geotécnica y Análisis de Susceptibilidad a los Fenómenos Naturales en el Casco Urbano de Cartagena. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Barboza, G. (2007). Caracterización geotécnica del subsuelo donde se localiza el sector Rafael Núñez del barrio Olaya Herrera, casco urbano de la ciudad de Cartagena. Informe de consultoría para la Secretaría de Planeación Distrital. 102 p. Cartagena.



Barboza, G. (2013). Evaluación geológica-geotécnica para la definición del nivel de amenaza por diapirismo de lodo (volcanes de lodos) en el lote de la UTB ubicado en la variante Mamonal - Turbaco. Contrato de consultoría N° 19 de 2013 - Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB). Informe técnico inédito, 180 p. Cartagena.

Barboza, G., Carvajal, J. H. (2006). Caracterización Geotécnica y Análisis de la Susceptibilidad a los Fenómenos Geológicos en el Casco Urbano de Cartagena. Ciencias e Ingeniería Al Día. ISSN 1900-768X, v.1, fasc.1, Editorial de la Universidad De Cartagena. pp. 21 - 22.

Brunsdén, D. (1979). Mass movements. En: Embleton, C. E. y J. B. Thornes (Eds.), Progress in Geomorphology, Arnold.130.186.

Brunsdén, D. (2002). The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. Quart. J. of Engng. Geol. 35, 101-142.

Cabeza-Durango, L. (2009). Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias D.T. y C. Boletín Científico CIOH, 2009. pp. 4-10.

Cardona, Omar Darío. (1993). Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo. En: Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Cardona, Omar Darío. (2001). La Necesidad de Repensar de Manera Holística los Conceptos de Vulnerabilidad y Riesgo, "Una Crítica y una Revisión Necesaria para la Gestión" (Artículo y ponencia para International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, Wageningen, Holanda). Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Carrara, A., Cardinali, M.; Guzzetti F.; Reichenbach P. (1995). GIS Technology in Mapping Landslide Hazard - Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazard. Eds. Alberto Carrara and Fausto Guzzetti. pp135-176.- Dordrecht Kluwer Academic Publishers, 1995. En: González, A. J. (2006). Ecuaciones del (SES) para su uso en SIG.

Carvajal J. H., Pérez F. (1993). Geomorfología y Aspectos Erosivos del Caribe Colombiano. Sector La Boquilla - Bahía de Barbacoas. Informe 2179 Ingeominas. 80 p. Cartagena.

Carvajal, J. H. (1996a). Amenazas geológicas en el Casco Urbano de Cartagena (Síntesis). Informe Ingeominas. 34 p. Cartagena D.T. y C.

Carvajal, J. H. (1996b). Evaluación de las Zonas Susceptibles a Fenómenos Naturales Amenazantes en el Casco Urbano de Cartagena. Informe INGEOMINAS. Cartagena D.T. y C., 35 p.

Carvajal, J. H. (1998). Características de los fenómenos de remoción en masa en el barrio San Francisco - Cartagena. Informe Ingeominas. 15 p. Cartagena D.T. y C.

Carvajal, J. H. (1999). Análisis preliminar de susceptibilidad a los daños causados por erupción de "volcanes de lodo" en el sector suroriental de Cartagena. Informe Ingeominas. 25 p. Cartagena D.T. y C.

Carvajal, J. H. (2001). Amenazas geológicas asociadas al volcanismo de lodos. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geología. CD aparte de Volcanes. 15 p. Manizales.



Carvajal, J. H. (2002). Caracterización de la metodología geomorfológica adaptada por INGEOMINAS. Documento interno INGEOMINAS sometido a discusión y modificaciones. 13p. Bogotá.

Carvajal, J. H. (2003). Documentación detallada del modelo de datos para la faceta de geomorfología. Documento INGEOMINAS preliminar, sometido a discusión y modificaciones. 48p. Bogotá.

Carvajal, J. H. (2008). Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Documento inédito en preparación. 32 p.

Carvajal, J. H. (2012). Características de la actividad eruptiva del 11 de mayo de 2012 en el “volcán de lodo” El Reposo o Bajo Grande, Bayunca – municipio de Cartagena de Indias. Informe Servicio Geológico colombiano. 54 p. Bogotá.

Carvajal, J. H., Barboza, G., Molina, L. (1995). Amenazas Geológicas Potenciales y Aptitud Urbanística del Casco Urbano de Cartagena. Informe INGEOMINAS. Cartagena D.T. y C., 124 p.

Castellanos, R. (1996)- Lluvia Crítica en la Evaluación de Amenaza debida a Movimientos en Masa - Tesis de Magister. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. En: González, A. J. (2006). Ecuaciones del (SES) para su uso en SIG.

Castellanos, R., González A.J. (1997). Algunas Relaciones de Precipitación Crítica-Duración que Disparan Movimientos en Masa en Colombia. 2o. Simposio Panamericano de Deslizamientos. Vol. 2, pp. 863-878 - ABMS - Río de Janeiro, Nov. 1997. En: González, A. J. (2006). Ecuaciones del (SES) para su uso en SIG.

Castro-García, M.J. (2011). Implicaciones Económicas del Reglamento NSR-10 en el Diseño Sísmico de Edificaciones de Acero. Encuentro Internacional del Acero en Colombia (EAC 2011).

Chang, G., Bolívar, M. (1997). Establecimiento de relaciones entre las precipitaciones de 24 horas y las precipitaciones de una duración diferente Pt, para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Tesis para optar el título de Ingeniero civil de la Universidad de Cartagena. En: Arrieta, A. (2004). Diseño integral de obras de drenajes para carreteras (Diplomado Universidad de Cartagena). Componente hidráulica e hidrología. pp. 50-52.

Coates, D.R. (1977). Landslides perspectives. En: Coates, D. R. (Ed.), Landslides, Geological Society of America.

Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, CCCSR (1984). Decreto de Ley 1400 de 1984.

Consortio Consultores Cartageneros (2007). Estudios y Diseños del Plan de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena de Indias. Alcaldía Mayor de Cartagena, Departamento Administrativo de Valorización Distrital. Informe de Diagnostico. 275 p.

Cornforth, D. H. (2005). Landslides in practices: Investigación, analysis and remedial / preventative options in soils. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Corominas, J. (2004). Tipos de Rotura en Laderas y Taludes. Documento online. Disponible en: <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>. Consulta: 27 de Mayo de 2012, 1:30 p.m.

Courtoure, R. (2011). Landslide Terminology - National Technical Guidelines and Best Practices on Landslides. Geological Survey of Canada. 12 Open File 6824.



Crozier M. J., Glade T. (2004). Landslide hazard and risk: Issues, Concepts and approach, *Landslide Hazard and Risk*. Edited by Thomas Glade, Malcolm Anderson and Michael J. Crozier, 2004 Wiley, 2-40.

Crozier, M. (1986). *Landslides-causes, consequences and environment*. London and Sydney: Croom Helm Ltd. pp 0.7097-0.7099.

Crozier, M. J. (1984). Field Assessment of Slope Instability. en Brunsden, D; Prior, D.B. (Eds) (1984) - Chapter 4- pp. 103-142 - John Wiley & Sons. En: González, A. J. (2005). *Evaluación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa*.

Crozier, M.J. (1986). *Landslides: Causes, consequences & environment*. Croom Helm (London and Dover, N.H.). ISBN 0709907907. 252 pp.

Cruden D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bull Inter Assoc Engng Geol* 43, 27-29.

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

Cruden, D. M., Z. Q. Hu, and Z.Y. Lu. (1993). Rock Topples in the Highway Cut West of Clairvivaux Creek, Jasper, Alberta. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No.6, pp. 1016-1023. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Cruden, D.M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43, pp. 27-29. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Dalrymple, J., Blong, R. and Conacher A. (1968). An hypothetical nine unit landsurface model. *Z. Geomorphol.*, 12(1), pp. 60-70. En: Cortés, R. (1989). *Clasificación de Zonas Geotécnicamente Homogéneas*. En: González, A. J. (2006). *Ecuaciones del (SES) para su uso en SIG*.

Denness, B. (1973). *Estudio de deslizamientos en relación con la planeación de rutas y carreteras*. TRL-MOPT, Bogotá. En: García, M., Moya, J., Cañón J. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*, INVIAS.

Departamento Administrativo de Planeación Distrital (DAPD), Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá e INGEOMINAS. (1995). *Convenio Interadministrativo N° 017 de Diciembre 20 de 1993. Evaluación Preliminar de Susceptibilidad y Amenaza en las Localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe, Usme y San Cristóbal de Santafé de Bogotá D.C. Fase I. Documento técnico*. 91 p.

Di Fiore, V. (2010). Seismic site amplification induced by topographic irregularity: Result of a numerical analysis on 2D synthetic models. *Engineering Geology* 114 (2010). pp. 109 - 115.

Díaz, F. A. (2004). *Estudio Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Movimientos en masa aplicado al sector rural de Villavicencio*. Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Díaz, F. A. (2004). *Estudio Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Aplicado al Sector Rural de Villavicencio*. Trabajo de grado Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia – INGEOMINAS, Bogotá, Mayo de 2004. 300 p.

Díaz, F. A., Álzate, B. E., González, A. J., Ruíz, G. L. (2004). *Estudio Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Aplicado al Sector Rural de Villavicencio*. Artículo científico, Universidad Nacional de Colombia – INGEOMINAS, Bogotá, Julio de 2004. 12 p.



Duque-Caro, H. (1967). Informe Bioestratigráfico preliminar de los cuadrángulos D-8 y E-8. Servicio Geológico Nacional, Informe 1522. Bogotá.

Duque-Caro, H. (1979). Major structural elements and evolution on northwestern Colombia, in Watkins, J. S., and others, eds. Geological and geophysical investigations of continental margin: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 29, p. 329-351.

Duque-Caro, H. (1980). Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana. Boletín Geológico Ingeominas. Vol. 23, N° 3, pp 4 - 37. Bogotá.

Duque-Caro, H. (1984). Estilo estructural, Diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. Boletín Geológico Ingeominas. Vol. 27, N° 2, pp.1 - 29. Bogotá.

European Community Programme, EPOCH (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flageollet, J. C. (ed.), 3 volumes. Contract no. 90 0025.

Evans, S.G., Clague, J.J., Woodsworth, G.J. y Hungr, O. (1989). The Pandemonium Creek Rock Avalanche, British Columbia. Canadian Geotechnical Journal, 26 (3), 427- 446.

Faccioli, E., Resendiz, D. (1975). Soil Dynamics: Behavior Including Liquefaction. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería (México, D.F.). 70 p. En: Suarez J. (2012). La respuesta de sitio. Disponible en <<http://erosion.com.co/>> .

Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management, Proceedings International Conference on Landslide Risk Management, London, Taylor & Francis, pp. 3-25.

Flageollet, J.C. (1996). The time dimension in the study of mass movements. Geomorphology 15. pp 185 - 190.

Forero, E. y García, H. (1987). Zonas homogéneas de estabilidad. Metodología. Proyecto estudio de deslizamientos en la red vial Nacional. Ministerio del Transporte y Universidad Nacional. 27 p. Bogotá.

Forero-Dueñas, C. (1991). Informe Final del Estudio de Amenazas y Obras Alternativas de Protección para Útica, Departamento de Cundinamarca. INGEOMINAS, Santafé de Bogotá, 27 p.

Fournier, E. M. (1985). "The quantification of seismic hazard for the purposes of risk assessment", International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, noviembre, 1985.

Galli, M., Guzzetti, F. (2007). Landslide Vulnerability Criteria: A Case Study from Umbria, Central Italy. Environmental Management (October 2007) Volume 40, Issue 4, pp. 649-664.

García, M., Moya, J., Cañón J. (1998). Manual de Estabilidad de Taludes. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN 958-95941-2-3. Capítulo 2. Fenómenos de Inestabilidad de Taludes. p. 27-63.

Gary, M.; R. McAfee and C. L. Wolf. (1972). Glossary of Geology. American Geological Institute. Eds.

Gayet, J., Vernet, G. (1989). Les Lagunes Cotieres: Cours International d'Océanologie Cotiere en région Caribe, Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, No. 45, pp. 107-121.



Gómez, J., Carvajal, J. H., Otero, J. (2012). Propuesta de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias – Gobernación del Magdalena – Invemar. Serie de Publicaciones Especiales # XX. 110 p.

González, A. J., Millán, J. (2001). Evaluación de la Acción del Hombre en los Estudios de Amenaza y Riesgo por Deslizamientos en Bogotá – Colombia. III Simposio Panamericano de Deslizamientos - Vol. 1, pp.163-174. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Cartagena, Julio 2001.

González, A. J. (1989). Informe de Asesoría Geotécnica Zona de Útica para INGEOMINAS - Análisis Preliminares y Obras Preventivas Inmediatas - Deslizamientos de Santa Barbará, La Chorrera y La Platanera.

González, A. J. (1990b). Metodología para Evaluación de Riesgo por Deslizamientos a Nivel Intermedio. VI Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI) -Tomo II, Bogotá, Octubre de 1990.

González, A. J. (1991). Análisis Geotécnicos Colombianos Ltda. Informe de Consultoría en Geotecnia, Hidrología e Hidráulica para el Estudio de Amenazas y Obras Alternativas de Protección para Útica, a nivel de Prefactibilidad. Santafé de Bogotá, 214 p.

González, A. J. (1992). Avalanche Risk Evaluation at Utica - Colombia - 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) - pp. 356-378- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Bogotá, Abril 1992.

González, A. J. (1992). Avalanche Risk Evaluation at Utica - Colombia. 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). pp. 356-378. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Bogotá, Abril 1992.

González, A. J. (2005). Evaluación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa. III Curso Latinoamericano de Movimientos en Masa. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá - Colombia.

González, A. J. (2006). Ecuaciones del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad de Zonas Homogéneas (SES) para su uso en Sistemas de Información Geográfica (SIG). XI Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia. p. 109-116. ISBN 958-33-9676-1.

González, A. J., Millán, J. (1999a). Procedimiento para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá - Colombia. XI CPMSIF - Foz de Iguazú, Brasil.

González, A. J., Millán, J. (1999b). Resultados de la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá - Colombia. XI CPMSIF - Foz de Iguazú, Brasil.

González, A. J., Millán, J. A. (2001). Evaluación de la Acción del Hombre en los Estudios de Amenaza y Riesgo por Deslizamientos en Bogotá – Colombia. III Simposio Panamericano de Deslizamientos - Vol. 1, pp.163-174. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Cartagena, Julio 2001.

González, A.J. (1990a). Conceptos sobre la Evaluación de Riesgo por Deslizamientos. VI Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI) - Tomo I, pp. 153-170, Bogotá, Octubre de 1990.

González, A.J. (2005). Evaluación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa. III Curso Latinoamericano de Movimientos en Masa. Sociedad Colombiana de Geotecnia - Bogotá, Colombia.



González-Del Tágano, M. (1991). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo: Pasado, presente y futuro. *Revista Ecología*, N° 5, 1991. pp. 13-50.

González-Morantes, L. A. (2010). Análisis Comparativo de Metodologías de Zonificación de Amenaza por Deslizamiento a Escala Local, Aplicada en un Sector de la Zona de Cerros de la Ciudad de Bogotá D.C. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Goodman, R.E. y Bray, J.W. (1976). "Toppling of rock slopes". *Proceedings Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder, CO. ASCE. Vol. 2: 201-234. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Grant, K. (1976). The P.U.C.E. Program for Terrain Evaluation for Engineering Purposes, I: Principles, CSIRO, Division of Applied Mechanics, Technical Paper 19, 68 pp., Sydney - 1976. En: González, A. J. (2006). Ecuaciones del Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad de Zonas Homogéneas (SES) para su uso en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Guasch, F. (2011). Amenaza sísmica, avances de la ciencia y desafíos para Centroamérica y El Caribe. CENAI. Disponible en < <http://es.slideshare.net/comunicacionespfc/amenaza-ssmica>>. Consulta: 11 de Diciembre de 2014, 12:45 a.m.

Guzzetti F., Galli M., Reichebach P., Ardizzone F., Cardinali M. (2006). Landslide Hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:115-131.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31 (1999), Nr. 1-4, pp. 181-216.

Hansen, M. J. (1984). Strategies for Classification of Landslides. En: *Slope Instability*, (Eds) Brunsden, D. and Prior, D., John Wiley and Sons, 1-26.

Hauser, A., (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. *Boletín No. 45*, p. 7-29.

Hollenstein, K. (2005). Reconsidering the risk assessment concept: Standardizing the impact description as a building block for vulnerability assessment. *Natural Hazards Earth Syst, Sci.*, 5, 301-307.

Hu, X.Q., and D.M. Cruden. (1993). Buckling Deformation in the Highwood Pass, Alberta. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No.2, pp. 276-286. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Hutchinson, J. N. (1995). Landslide hazard assessment. En: *Proc VI Int Symp on Landslides*, Christchurch, 1: 1805-1842.

Hutchinson. J. N. (1988). "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology. En: Bonnard, C. (Ed.). *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands (1): 3-35.

INGEOCIM-UPES (1998). Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inestabilidad del Terreno para las Localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe, San Cristóbal, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba de Santafé de Bogotá. Octubre 1998.

Ingeominas (1993). Boletín de sismos registrados en el territorio Colombiano. Junio a Diciembre de 1993. *Red Sismológica Nacional de Colombia RSNC*. Vol. 1, No.1 y 2. Bogotá.



Ingeominas (2001-2003) Zonificación Integral por Amenazas Naturales para la Ciudad de Villavicencio – Meta. Fases I y II. 2001 – 2003.

Ingeominas (2001a). Zonificación Geotécnica, aptitud y uso del suelo en el casco urbano de Cartagena de Indias, DTC – Bolívar. Convenio interadministrativo 005/2000, Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. Documento técnico, p. 49-50. Cartagena de Indias – Colombia.

Ingeominas (2001b). Geología de las Planchas 23 Cartagena y 29-30 Arjona. Memoria Explicativa.

Ingeominas (2002). Metodología de cartografía geomorfológica con aplicación a zonificación geomecánica. Fase 1. Documento inédito y en revisión. Ingeominas. Bogotá.

Ingeominas (2003). Geología de las Planchas 23 Cartagena. Mapa. Compilado por Guzmán y otros.

Ingeominas (2007). Mapa Geológico de Colombia. Segunda edición. Compilado por Gómez-Tapia y otros.

Ingeominas (2009). Formulación de una Guía Metodológica para la Evaluación de la Amenaza por Movimientos en Masa Tipo Flujo: Caso Piloto Cuenca Quebrada La Negra, Útica – Cundinamarca. Tomo I. Evaluación de la Susceptibilidad.

Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental, IHSA. (2003). Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena. Estudio de los procesos costeros en Cartagena desde La Boquilla hasta El Laguito. Proyecto de Investigación, código 1107-09-028-99.

Ingeominas (2001). Convenio Interadministrativo N° 005 de 2000. Zonificación Geotécnica, Aptitud y Uso del Suelo en el Casco Urbano de Cartagena de Indias, DTC - Bolívar. Documento técnico. 216 p.

International Strategy for Disaster Reduction, ISDR (2004). Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, ONU. p. 16-19. ISBN / ISSN: 9211010640.

Keefer, D.K., and A.M. Johnson. (1983). Earthflows: Morphology, Mobilization and Movement. U.S. Geological Survey Professional Paper 1264, 56 pp. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). Landslide types and processes.

Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall. University of Washington. Lara, M., Sepúlveda, S. (2008). Remociones en masa, apuntes del curso año 2008 (GL62C). Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Leone, F. (1996). Concept de Vulnérabilité Appliqué a L'Evaluation des Risques Générés pour les Phénomènes des Mouvements de Terrain. Thèse Doctorat, Spécialité Géographie, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1996.

Lozano, J. A. (1996). Evaluación de Susceptibilidad y Amenaza Preliminar en las Localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe y San Cristóbal, Santafé de Bogotá, D.C. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Lozano, J., Millán J. (1995)- Evaluación de Estabilidad y Análisis de Susceptibilidad Geotécnica a Fenómenos de Remoción en Masa del Sector de Ciudad Bolívar - VIII Jornadas Geotécnicas - pp. 174-201- SCI-SCG- Octubre 1995.

Mancera, J. E. (2003). The contribution of mangrove outwelling to coastal food webs as a function of environmental settings. Tesis doctoral, University of Louisiana at Lafayette, Lafayette, EE.UU.



Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version). (1999). Prepared by Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4 -ISSMGE. Published by The Japanese Geotechnical Society. pp. 5-6.

Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (2013). *Landslide Science and Practice: Volume 4: Global Environmental Change*. Springer, Jul 1, 2013 - 448 pages.

McRoberts, E.C., and N.R. Morgenstern. (1974). Stability of Slopes in Frozen Soil, Mackenzie Valley, North West Territories. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No.4, pp. 554-573. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Meyer, L., Foster, G. y Romkens, M. (1975). Source of soil eroded by water from upland slopes. In: *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, USDA, Agr. Res. Serv. ARS-S-40: pp 177-189.

Middleton, B. A., McKee, K. L. (2001). Degradation of mangrove tissues and implications for peat formation in Belizean island forest. *J. Ecol.*, 89: 818-828.

Ministerio de Medio Ambiente (1998). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión, en terrenos forestales*. 2da edición. España. 945 p.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Capítulo 3. Precipitación. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. pp. 84 - 86.

Mora, S. (1990). Deslizamientos en el Alto Chicamocha - Informe de Asesoría - UNDRO-ONAD-Bogotá (1990). En: González, A.J. (2005). *Evaluación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa*.

Muñoz, F. A. (1997). Notes on communication and volcanic risk. En: B. M. Drottz Sjoberg (ed.) *New risk frontiers. 10th Anniversary*. The Society for Risk Analysis-Europe. Estocolmo, Center for Risk, pp. 123-128. En: Ojeda et al. (2001). *Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica*.

National Soil Survey Handbook, NSSH. (2008). Glossary of landform and geologic terms. Disponible en <<http://soils.usda.gov/technical/handbook/download.html>>. Fecha de Consulta: 03 de Julio de 2014, 2:30 p.m.

Ojeda, J., Castro, E., Valencia, A., Fonseca, S. (2001). *Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica*. Primera Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. p. 5, 23.

Organization of American States, OAS. (1991). *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning*, Department of Regional Development and Environment, Washington D.C. Chapter 10. *Landslide Hazard Assessment*. pp. 10.1 a 10.30.

Panizza, M. (1996). *Environmental Geomorphology, Developments in Earth Surface Processes; Vol 4*. Elsevier Science B. V. 263 pp.

Penck, A. (1894). *Morphologie der Erdoberfl* (2 vols). Ed. Stuttgart, J. Engelhorn. 421-696.

Pérez, G., Mejía, I. (2007). *La pobreza en Cartagena: Un análisis por barrios*. Documentos de trabajo sobre la economía local, Banco de La República, Centro de Estudios Económicos Regionales - Cartagena.

Pierson, T.C. and Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation* (J.E. Costa and G.P.



Wieczorek, eds.), *Reviews in Engineering Geology*, Vol. 7, Geological Society of America, Boulder, Colo., pp.1-12. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias (2001). Síntesis del Diagnostico. Decreto N° 0977 de 2001. 186 p.

Portilla, M. (2002). Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la zonificación geotécnica por fenómenos de remoción en masa y erosión superficial en el municipio de Villa de Leiva (Boyacá, Colombia): Base técnica para la formulación del Plan de Ordenamiento Territorial. Tesis de Maestría en Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA-GCA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.

Ramírez, F. (1988). Investigación de deslizamientos en la red vial nacional: Sistema semi-cuantitativo de evaluación a escala intermedia de zonas homogéneas de estabilidad. Tesis de Maestría en Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Ramírez, F.; González, A. J. (1989). Evaluación de Estabilidad para Zonas Homogéneas. I Simposio Suramericano de Deslizamientos- Vol. I, pp. 174 - 192, SCG.- Paipa, Agosto 1989.

Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 pp. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*.

Reyes, G., Clavijo, J. (1996). *Geología Estructural de los Cinturones de San Jacinto y Sinú Norte*. 7mo. Congreso Colombiano de Geología.

Rodríguez-Pineda, C.E. (2001). *Hazard Assessment of Earthquake Induced Landslides on Natural Slopes*. Thesis Submitted to The University of London, for degree of Doctor of Philosophy. Department of Civil Engineering. Imperial College of Science, Medicine and Technology. London.

Rodríguez-Pineda, C.E. (2012). *Apuntes de Clases de la Asignatura Estabilidad de Taludes*. Maestría en Ingeniería - Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Sassa, K. (1989). Geotechnical classification of landslides. *Landslide News*, 3: 21-24

Sauter, F. (1989). *Fundamentos de Ingeniería sísmica. Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 271 p.

Scheidegger, A. E. 1998. Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya. *Geomorphology* 26, 37-46.

Servicio Geológico Colombiano, SGC. (2010). Investigación del Diapirismo de Lodo y Evolución Costera del Caribe Colombiano, *Geomorfología Sector 1*. pp. 25-32

Sharpe, C.F.S. (1938). *Landslides and related phenomena*. Columbia University Press, N.Y.

Shuk E., T. (1968). Un Método Sencillo de Diseño para Minimizar el Costo de Taludes en Roca. Primer Simposio de Ingeniería Geológica, Vol. II, MOPT-SCI, Bogotá, 1968.

Shuk E., T. (1970). Optimization of Slopes Designed in Rock. *Proceedings 2nd. Intl. Congress on Rock Mechanics*. Vol. 3. Paper 7-2- pp. 275-280.-ISRM, Beograd.



Skempton, A.W. and Hutchinson, J. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. State of the Art Volume, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City.

Spence, R.J.S. (1990). "Seismic risk modelling - A review of methods", contribution to "Velso il New Planning", University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge. En: Cardona, Omar Darío. (1993). Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo. En: Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Suarez J. (2012). La respuesta de sitio. Disponible en <<http://erosion.com.co/>>. Consulta: 06 de Diciembre de 2014, 11:20 a.m.

Suarez, J. (1997). Deslizamientos volumen I, Análisis Geotécnico. Capítulo 1. Nomenclatura y Clasificación de los movimientos. Editorial UIS. Disponible en: www.erosion.com.co. Consulta: 25 de Mayo de 2012, 9:30 a.m.

Terlien, M.T.J., (1996). Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides. PhD thesis, ITC Publ. Nr. 32, Enschede, The Netherlands, 254 Pages.

Terlien, M.T.J., (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. Environmental Geology, Volume 35, Issue 2-3, pp 124-130.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. En: Paige, S. (Ed.). Applications of geology to Engineering Practice. Geological Society of America. New York: 83-123.

Travieso, A. (2005). Manglares. En: Manejo costero integral: El enfoque municipal. Instituto de Ecología, A.C. Inecol, ISBN 970-709-039-1. 1266 pp.

Tsige, M., García-Flórez, I. (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. Geogaceta, 40 (2006), 39-42. ISSN: 0213683X

UNDRO (1979). Natural disaster and vulnerability analysis. Informe de reunión de expertos. Ginebra, Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre.

UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, ISDR. Naciones Unidas. p. 43.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2004). Convenio interadministrativo. Revisión y actualización de los estudios del fenómeno de sedimentación en la boca del Laguito. Informe final. 78 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Planeación), UDC-AMC. (2009a). Convenio interadministrativo N° 09- 430- 431. Evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en tres sitios críticos del cerro de La Popa - sitios: Loma del Diamante, sector sur Salto del Cabrón y Lo Amador calle Ricaurte. Informe final. 3 tomos. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2009b). Convenio interadministrativo N° 6- 002- 266. Estudios y diseños de riesgos que determinen las obras de estabilización de la loma del Marión, sector comprendido entre los barrios Nueva Granada y Nueve de Abril de la ciudad de Cartagena. Informe final. 202 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2011). Convenio interadministrativo N° 6- 063- 94. Evaluación geotécnica y diseños de



obras de estabilización de las laderas del sector nororiente del cerro La Popa, en el barrio San Francisco. Informe final. 248 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2004). Convenio interadministrativo. Revisión y actualización de los estudios del fenómeno de sedimentación en la boca del Laguito. Informe final. 78 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Planeación), UDC-AMC. (2009a). Convenio interadministrativo N° 09- 430- 431. Evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en tres sitios críticos del cerro de La Popa - sitios: Loma del Diamante, sector sur Salto del Cabrón y Lo Amador calle Ricaurte. Informe final. 3 tomos. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2009b). Convenio interadministrativo N° 6- 002- 266. Estudios y diseños de riesgos que determinen las obras de estabilización de la loma del Marión, sector comprendido entre los barrios Nueva Granada y Nueve de Abril de la ciudad de Cartagena. Informe final. 202 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2011a). Convenio interadministrativo N° 6- 063- 94. Evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización de las laderas del sector nororiente del cerro La Popa, en el barrio San Francisco. Informe final. 248 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2011b). Convenio interadministrativo N° 6- 208- 381. Evaluación geotécnica y Diseños de las obras de estabilización de las laderas de la Loma del Marión, sector Manzanares en el barrio Nuevo Bosque, Casco urbano de Cartagena. Informe final. 158 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2012a). Convenio interadministrativo N° 6- 208- 504. Evaluación geotécnica y Diseños de las obras de estabilización de las laderas del sector nororiente del Cerro La Popa en el barrio San Francisco, Cartagena, FASE II. Informe final. 192 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2012b). Convenio interadministrativo N° 6- 042- 229. Evaluación geotécnica y diseños de obras de mitigación de los procesos de inestabilidad de taludes que afectan el barrio Piedra de Bolívar, sector comprendido entre la Carrera 49B y Diagonal 28 y 26, casco urbano de Cartagena. Informe final. 102 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Alcaldía Mayor de Cartagena (Secretaría de Infraestructura), UDC-AMC. (2012c). Convenio interadministrativo N° 6- 041- 230. Evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en las laderas del noroccidente del Cerro de La Popa, sector Rincón Guapo, Calle Guillermo Posada, en el barrio Paseo de Bolívar, casco urbano de Cartagena. Informe final. 95 p. Cartagena.

Universidad de Cartagena - Plan de las Naciones Unidas para el Desarrollo, UDC-PNUD. (2014). Fortalecimiento de las capacidades institucionales para la gestión del riesgo y el mejoramiento de los medios de vida de la comunidad vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa, asentada en el sector denominado Lomas del Peyé, casco urbano de Cartagena, departamento de Bolívar. Informe final. 339 p. Cartagena.

Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería) - CORMAGDALENA, LEHUN-CM-I. (2005). Convenio Interadministrativo N° 37. Estudios e Investigaciones de las Obras de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique. Recopilación y síntesis de la información geológica y geomorfológica de la ecorregión del Canal de Dique. Informe CM - CD - 5 (Enero de 2007). pp. 44-52



Universidad Nacional del Nordeste, UNNE (2007). Guía del trabajo práctico N° 2. Facultad de Ingeniería, departamento de hidráulica, cátedra de Hidrología. 9 p. Ciudad de Corrientes, Argentina.

USGS. (2008). Landslides Types and Process. The U.S. Geological Survey Landslide Program. US Department of Interior Geological Survey.

USGS. (2004). Landslides Types and Process. The U.S. Geological Survey Landslide Program. Fact Sheet 2004-3072. US Department of Interior Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/.4> pp.

Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. En: Eckel, E. B., Ed., Landslides and engineering practice: Highway Research Board, Special Report 29.

Varnes, D. J. (1984). Landslide Hazard Zonation. A Review of Principles and Practice. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO. p. 10. ISBN 92-3-101895-7.

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. En: R.L. Schuster y R. J. Krizek (Ed s.) Landslides: analysis and control. Transportation Research Board. Special report 176: 11-33.

Vernette y Otros. (1990). El frente de deformación sur – Caribe en la región de Cartagena. Posición y relación con la plataforma. Memorias del VII Seminario de Ciencias y Tecnologías del mar. Comisión Colombiana de Oceanografía. pp 195 – 209. Cali.

Vernette, G. (2003). El Diapirismo de Lodo en el Margen Colombiano del Caribe. Memorias del Seminario-Taller Internacional de Geología Marina y Costera, SIGMAR 1. INVEMAR. pp 1-33. Santa Marta.

Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz Volcano Catastrophe: Anatomy and Retrospection. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 44, No. 1-2, pp. 349-386. En: Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). Landslide types and processes.

Walker, H. J. (1983). Erosion in a permafrost - dominated delta. Permafrost, 4th Int. Conf. Proc.: 1344-1349. En: Hutchinson. J. N. (1988). "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology".

Wikipedia, La enciclopedia libre. (2014). Cartagena de Indias. Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Cartagena_de_Indias>. Fecha de consulta: 18 de julio de 2014.

Wischmeier, W., Smith, D. (1958). Rainfall Energy and its Relationship to soil loss, transactions. American Geophysical Union, Vol 39, N° 2. In: Pérez, J., Mesa, O. (2002). Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 12 p.

Wischmeier, W., Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. USDA Agr. Res. Serv. Handbook, 537 p. En: González-Del Tágano, M. (1991). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo: Pasado, presente y futuro.

Záruba, Q. and V. Mencl. (1969). Landslides and their control: Nueva York, Elsevier y Academia de Ciencia de Checoslovaquia. 205 pp.



Anexo A. Inventario de Deslizamientos 2001-2014



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

EVENTO				PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN			OBSERVACIONES			
Municipio	Sitio	Tipo	FECHA d/m/a	HUMANAS (No)		Información cualitativa (marque con x)										NOMBRE		OTROS	FECHA d/m/a	
				Vidas	Heridos	Dannificados	Infraestructura vial	Servicios Públicos	Obras Lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosques	Semovientes	Otros						
CIGENA	CERRO LA POPA, SALTO DEL CABRON	DESLIZAMIEN	01-Abr-45														EL TIEMPO		05-Ene-45	No hubo daños
CIGENA	SANTA RITA	DESLIZAMIEN	04-Dic-60	2	3												EL TIEMPO		05-Dic-60	
CIGENA	RODRIGUEZ TORICES	DESLIZAMIEN		3	1												EL COLOMBIANO		02-Dic-60	
CIGENA	BARRIO BOSQUECITO	DESLIZAMIEN	12-Ago-95							X							EL UNIVERSAL		14-Ago-95	Causado por las lluvias
CIGENA	BARRIO LAS COLINAS	DESLIZAMIEN								X							EL TIEMPO		16-Ago-95	Por el invierno, 25 casas afectadas
CIGENA	BARRIOS LA MARIA, LAS COLINAS	DESLIZAMIEN	19-Ago-95														EL UNIVERSAL		20-Ago-95	Como consecuencia del aguacero
CIGENA	BARRIO DANIEL LEMAITRE	DESLIZAMIEN								X							EL PERIODICO		26-Ago-95	Por lluvias, tres casas destruidas
CIGENA	NUEVO BOSQUE	DESLIZAMIEN				2 F				X							EL PERIODICO		26-Ago-95	El des/fo se presenta en las Colinas y afecta el N. Bosque
CIGENA	BARRIO ZARAGOCILLA	DESLIZAMIEN	18-Oct-96			20H				X							EL UNIVERSAL		19-Oct-96	2 viviendas destruidas, 3 averiadas debido a un aguacero
CIGENA		DESLIZAMIEN	18-Oct-96														EL UNIVERSAL		19-Oct-96	Deslizamiento debido a la influencia del huracán Lili
CIGENA	LA POPA	DESLIZAMIEN															EL TIEMPO		18-Nov-99	Por Hur. Lenny, 9 viviendas derrumbadas

Cuadro A-1. Inventario de Deslizamientos registrados 1945 - 2000

Fuente: Tomado de Ingeominas (2001a)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

EVENTO			PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN		OBSERVACIONES	
N°	Sitio	Fecha d/m/a	HUMANAS (N°)			Información cualitativa (Marque con X)							Nombre	Fecha d/m/a		
			Vidas	Heridos	Dañificados	Infraestructura vial	Servicios públicos	Obras lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosque	Semovientes				Otros
1	BARRIO SAN FRANCISCO	27/06/2001			1F				X					El Universal	24/05/2004	Se presentó un deslizamiento de tierra por efecto de las lluvias que afectó una vivienda y derrumbó un muro de contención (un perro murió)
2	BARRIO DANIEL LEMAITRE	20/05/2002			X				X					El Universal	23/05/2002	Se presentaron deslizamientos por efecto de un aguacero. En el año 2001 se había desplomado parte de un muro de contención
3	BARRIO LO AMADOR	31/07/2003			24F				X					El Universal	01/08/2003	Derrumbe de la terraza de una vivienda por un aguacero que generó un deslizamiento y varias viviendas averiadas
4	BARRIO LA QUINTA, SECTOR EL TORIL	12/08/2003			1F				X					El Universal	13/08/2003	Deslizamiento de tierra afectó una vivienda cuyo patio hace parte de las faldas del cerro de la popa
5	BARRIO DANIEL LEMAITRE	12/09/2003							X					El Universal	14/09/2003	Se presentó un deslizamiento de tierra en los patios de 4 casas por causa de un aguacero
6	BARRIO SAN FRANCISCO	09/11/2004	1		1F				X					El Universal	10/11/2004	Un alud de tierra causado por una lluvia de 10 horas arrastró una vivienda y sepultó a una persona, causándole la muerte
7	BARRIO NUEVA GRANADA	09/11/2004			1F				X					El Universal	10/11/2004	Se registró un deslizamiento causado por una lluvia, que sepultó una vivienda habitada por una familia
8	SINAÍ, SECTOR 20 DE JULIO	09/11/2004							X					El Universal	11/11/2004	Se presentaron deslizamientos de tierra por una lluvia de 10 horas, que destruyeron más de 3 viviendas.
9	BARRIO LAS BRISAS	09/11/2004												El Universal	11/11/2004	Se presentaron deslizamientos
10	BARRIO 9 DE ABRIL	09/11/2004												El Universal	11/11/2004	Se presentaron deslizamientos
11	CERRO DE LA POPA, SALTO DEL CABRÓN	-							X					El Universal	12/11/2004	Se registraron deslizamientos en el Salto del Cabron y sobre algunas viviendas de la segunda curva de la vía de acceso principal al cerro.
12	LOMA DEL COLEGIO SALLE	-												El Universal	15/11/2004	Se presentaron deslizamientos por efecto de las lluvias.
13	BARRIO LOS CERROS	-				X								El Universal	18/11/2004	Se presentó deslizamiento de tierra por las lluvias y se cerró la calle afectando la movilidad.
14	BARRIO NARIÑO	-				X								El Universal	19/11/2004	Se presentó deslizamiento de tierra por las lluvias y destruyó una acera.
15	LA MARÍA, SECTOR EL ABANICO	-		5H	1F				X					El Universal	21/11/2004	Se presentó deslizamientos por lluvias que afectó viviendas, una familia de 5 miembros salieron con heridas leves.
16	LOMA DEL DIAMANTE	-							X					El Universal	25/11/2004	Se presentaron derrumbes y deslizamientos que afectaron las viviendas del pie de la ladera.
17	NELSON MANDELA	-							X					El Universal	27/11/2004	Se presentaron deslizamientos por las lluvias que han afectado algunas viviendas en varios sectores
18	BARRIO LO AMADOR	-							X					El Universal	29/11/2004	Se presentaron deslizamientos por las lluvias que han afectado algunas viviendas.

Cuadro A-2. Inventario de Deslizamientos registrados 2001 - 2004

Fuente: El autor (2014)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

N°	EVENTO Sitio	Fecha d/m/a	PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN		OBSERVACIONES	
			HUMANAS (N°)			Información cualitativa (Marque con X)							Nombre	Fecha d/m/a		
			Vidas	Heridos	Dañificados	Infraestructura vial	Servicios públicos	Obras lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosque	Semovientes				Otros
19	LA MARÍA, SECTOR EL ABANICO	?/12/2004	1						X					El Universal	16/08/2005	Deslizamientos a causa del invierno ocurridos entre Noviembre y Diciembre de 2004 en las faldas del pie de la popa
20	1ERA CURVA - CERRO DE LA POPA	24/05/2005			3F				X					El Universal	25/11/2005	Un deslizamiento producto de una lluvia por 10 horas derrumó la terraza y patio de una vivienda (Accesorias), en donde vivían 3 familias.
21	2DA SUBIDA - CERRO DE LA POPA	24/10/2005			X				X					El Universal	26/10/2005	Se presentaron deslizamientos de tierra por lluvias prolongadas que afectaron dos casas y derrumbaron un muro de contención
22	BARRIO LA QUINTA	14/10/2006			X				X					El Universal	16/10/2006	Se presentó alud de tierra por aguaceros
23	SINAÍ	14/10/2006			X				X					El Universal	16/10/2006	Se presentó alud de tierra por aguaceros
24	BARRIO LO AMADOR	14/10/2006			X				X					El Universal	16/10/2006	Se presentó alud de tierra por aguaceros
25	LAS DELICIAS	14/10/2006			X				X					El Universal	16/10/2006	Se presentó alud de tierra por aguaceros
26	SINAÍ, SECTOR EL PESEBRE	09/12/2006												El Universal	18/12/2006	Deslizamiento de tierra por aguacero, evidenciando un gran escarpe en la parte alta de la ladera
27	VILLA ESTRELLA	29/05/2007	1						X					El Universal	30/05/2007	Se presentó deslizamiento por fuerte aguacero en el patio de una vivienda
28	LA MARÍA, SECTOR EL ABANICO	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
29	HABITAT 89	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
30	SINAÍ	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
31	PARAISO II	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
32	LOMA FRESCA	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
33	NARIÑO	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
34	LAS DELICIAS	16/09/2007			X									El Universal	17/04/2007	-
35	PETARE	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
36	LA PAZ	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
37	PARAISO I Y II	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
38	LA MARÍA	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
39	SINAÍ, SECTOR 20 DE JULIO	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
40	BARRIO LA QUINTA, SECTOR EL TORIL	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
41	NARIÑO	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-
42	PIEDRA DE BOLIVAR	25/10/2007			X	X								El Universal	26/10/2007	-

Cuadro A-3. Inventario de Deslizamientos registrados 2004 - 2007

Fuente: El autor (2014)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

N°	EVENTO Sitio	Fecha d/m/a	PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN		OBSERVACIONES		
			HUMANAS (N°)			Información cualitativa (Marque con X)							Nombre	Fecha d/m/a			
			Vidas	Heridos	Dañificados	Infraestructura vial	Servicios públicos	Obras lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosque	Semovientes				Otros	
43	BARRIO LO AMADOR	30/10/2007		1H	3F						X				El Universal	31/10/2007	Un alud de tierra producto de las lluvias arrastró 3 viviendas.
44	BARRIO 9 DE ABRIL	31/10/2007			7F						X				El Universal	03/11/2007	Deslizamientos de tierra por lluvias recurrentes de 9 días
45	BARRIO PIEDRA DE BOLIVAR	?/10/2007			1F						X				El Universal	03/11/2007	Una vivienda afectada por deslizamiento a causa de las lluvias
46	BARRIO NUEVA GRANADA	-				X									El Universal	03/11/2007	Una calle de la 2da Etapa de Nueva Granada quedo tapada por un derrumbe
47	BARRIO SAN FRANCISCO	14/11/2007			1F						X				El Universal	15/11/2007	Una avalancha de tierra proveniente de las faldas de la popa destruyó una vivienda por causa de las lluvias
48	VARIANTE MAMONAL - TURBACO	?/09/2008				X									El Universal	26/09/2008	Derrumbe (flujo de Material) en la via circunvalar Variante Mamonal - Turbaco
49	CANAPOTE	15/10/2009									X				El Universal	16/10/2009	Se presentó deslizamiento originado por un aguacero, afectando 3 viviendas (calle 63 y 64)
50	PASEO BOLIVAR, CALLE GUILLERMO POSADA	?/11/2009													El Universal	05/11/2009	Pequeños deslizamientos de tierra en los patios de algunas viviendas del sector
51	NELSON MANDELA	30/07/2010									X				El Universal	03/08/2010	Se presentó alud de tierra que afectó la pared del patio de una casa (sector Los deseos)
52	BARRIO NUEVO BOSQUE	8/08/2010			X						X				El Universal	10/08/2010	Se presentó un deslizamiento de tierra de la loma del marión que afectó la pared de una vivienda (6ta etapa)
53	LOMA FRESCA	18/09/2010									X				El Universal	20/09/2010	Se presentaron deslizamientos de tierra que afectaron 10 viviendas de sectores cercanos (Los ciruelos, La paz y Nariño)
54	BARRIO 3 DE JUNIO (HENEQUEN)	05/10/2010				X					X				El Universal	06/10/2010	Se presentaron deslizamientos de tierra por una lluvia de más de 7 horas, afectando 4 casas
55	3ERA SUBIDA - CERRO DE LA POPA	07/10/2010				X					X				El Universal	08/10/2010	Un alud de tierra debido a las lluvias sepultó 4 viviendas
56	BARRIO LA ESPERANZA, SECTOR EL CIELO	07/10/2010									X				El Universal	08/10/2010	Un deslizamiento de tierra proveniente de una estribación del Cerro de La Popa afectó la parte trasera de una vivienda
57	LOMA DEL DIAMANTE	07/10/2010									X				El Universal	08/10/2010	Un deslizamiento de tierra de la loma producto de las lluvias afectó la parte trasera de una vivienda
58	BARRIO NUEVA GRANADA	15/10/2010									X				El Universal	17/10/2010	Un deslizamiento de tierra de la loma del Marión producto de las lluvias afectó 2 viviendas
59	BARRIO 3 DE JUNIO (HENEQUEN)	24/10/2010									X				El Universal	25/10/2010	Un deslizamiento producto de las lluvias causo daños a por lo menos 6 casas
60	MIRADOR DE ZARAGOCILLA	31/10/2010									X	X			El Universal	01/11/2010	Derrumbe de un muro de contención por lluvias (Manzana D y C)
61	BARRIO NARIÑO, SECTOR 12 DE OCTUBRE	01/11/2010			3F						X				El Universal	02/11/2010	Se presentaron deslizamientos locales de tierra por las lluvias, afectando 3 viviendas

Cuadro A-4. Inventario de Deslizamientos registrados 2007 - 2010

Fuente: El autor (2014)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

EVENTO			PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN		OBSERVACIONES	
N°	Sitio	Fecha d/m/a	HUMANAS (N°)			Información cualitativa (Marque con X)							Nombre	Fecha d/m/a		
			Vidas	Heridos	Dañificados	Infraestructura vial	Servicios públicos	Obras lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosque	Semovientes				Otros
62	MIRADOR DE ZARAGOCILLA	02/11/2010						X	X					El Universal	03/11/2010	Deslizamientos generaron derrumbe de otro muro de contención por las lluvias del 2 de Noviembre (Manzana G)
63	2DA SUBIDA - CERRO DE LA POPA	02/11/2010			4F				X					El Universal	03/11/2010	Deslizamiento por lluvias destruyó 3 viviendas y dejó 2 viviendas muy afectadas
64	BARRIO 3 DE JUNIO (HENEQUEN)	?/11/2010												El Universal	06/11/2010	Deslizamientos continuos de tierra por lluvias
65	BARRIO ZARAGOCILLA	02/11/2010							X					El Universal	07/11/2010	En la calle 19 se presentó un alud de tierra de la loma del Marion por efecto de las lluvias, dejó muy averiadas 3 casas que luego fueron derrumbadas
66	BARRIO LO AMADOR	?/11/2010			2F									El Universal	07/11/2010	Deslizamientos de tierra por lluvias afectó por lo menos 4 viviendas
67	URBANIZACIÓN LA ESPAÑOLA	02/11/2010							X					El Universal	29/11/2010	Un deslizamiento de tierra proveniente de la loma del Colegio de La Salle afectó la parte posterior de una vivienda de la Urbanización.
68	BARRIO NUEVO BOSQUE	08/11/2010			2F									El Universal	09/11/2010	Un alud de tierra de la loma del Marion generado por las lluvias, dejó semidestruidas 2 viviendas
69	PASEO BOLIVAR	08/11/2010			1F				X					El Universal	09/11/2010	Un deslizamiento de tierra por efecto de las lluvias derribó la pared de la cocina de 1 vivienda
70	BARRIO SAN FRANCISCO	08/11/2010												El Universal	09/11/2010	Deslizamiento de tierra por lluvias en una sector cercano a la Sede de la Cruz Roja.
71	PASEO BOLÍVAR, CALLE GUILLERMO POSADA	?/11/2010			3F				X					El Universal	14/11/2010	Deslizamiento tipo flujo de lodo afectó las viviendas de 3 familias
72	BARRIO PABLO VI	?/11/2010			X				X					El Universal	14/11/2010	Deslizamiento afectó 2 viviendas levantadas en lo alto de una loma
73	BARRIO NUEVO BOSQUE	13/11/2010			X				X					El Universal	13/11/2010	Deslizamiento ocasionado por lluvias afectó 5 viviendas en la loma del Marion, sector Manzanares
74	NARIÑO	?/11/2010			X				X					El Universal	16/11/2010	Deslizamiento por lluvias afectó 6 viviendas
75	LOMA DEL PEYÉ	?/11/2010			X				X					El Universal	17/11/2010	Deslizamiento por lluvias afectó mas de 30 viviendas
76	BARRIO LO AMADOR	16/11/2010			X			X	X					El Universal	17/11/2010	Un deslizamiento de tierra afectó 5 inmuebles y agrietó un muro de contención
77	SUBIDA DEL CERRO DE LA POPA	16/11/2010			X				X					El Universal	18/11/2010	Deslizamiento (tipo caída de rocas) afectó una vivienda, se desprendieron 2 bloques de roca de gran tamaño
78	LA MARÍA, SECTOR LOS CORALES Y LA PAZ	?/11/2010			X				X					El Universal	20/11/2010	Un deslizamiento de tierra afectó varias viviendas
79	PASEO BOLIVAR	30/11/2010			5F				X					El Universal	01/12/2010	Se presentó deslizamiento de tierra proveniente de las faldas del cerro de La Popa que afectó 5 viviendas y generó caídas de rocas.
80	BARRIO TORICES	1/12/2010			X				X					El Universal	02/12/2010	Deslizamiento por efecto de un aguacero afectó 4 casas, se presentó desprendimiento de fragmentos de roca
81	LA MARÍA	18/10/2011							X					El Universal	19/10/2011	Alud de tierra afectó el patio de una vivienda (Calle 47)

Cuadro A-5. Inventario de Deslizamientos registrados 2010 - 2011

Fuente: El autor (2014)



Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena

EVENTO			PERDIDAS Y DAÑOS										FUENTE DE INFORMACIÓN		OBSERVACIONES	
N°	Sitio	Fecha d/m/a	HUMANAS (N°)			Información cualitativa (Marque con X)							Nombre	Fecha d/m/a		
			Vidas	Heridos	Damnificados	Infraestructura vial	Servicios públicos	Obras lineales	Edificaciones	Cultivos	Bosque	Semovientes				Otros
82	PASEO BOLÍVAR	18/10/2011			X				X					El Universal	19/10/2011	Deslizamiento por lluvias afectó 3 viviendas (Calle Santander)
83	PIEDRA DE BOLÍVAR	?/10/2011			X				X					El Universal	23/10/2011	Deslizamiento por lluvias afectó 14 viviendas y un centro de vida en la calle de Las Mercedes
84	BARRIO NUEVA GRANADA	19/10/2011							X					El Universal	27/10/2011	Deslizamiento (flujo de material) por lluvias afectó varias viviendas
85	BARRIO 3 DE JUNIO (HENEQUEN)	8/11/2011							X					El Universal	09/11/2011	Se presentó un alud de tierra producto de los aguaceros, que afectó 13 viviendas, destruyendo paredes y techos
86	BARRIO SAN BERNARDO	29/11/2011							X					El Universal	01/12/2011	Se presentaron derrumbes por causa de una lluvia de 48 horas que afectaron 7 viviendas
87	SUBIDA DEL CERRO DE LA POPA	29/11/2011				X		X	X					El Universal	01/12/2011	Se presentó un alud de tierra por causa de una lluvia de 48 horas que generó un enorme agujero en la calzada y averió un muro de contención
88	BARRIO SAN BERNARDO	18/10/2012			X				X					El Universal	20/10/2012	Un alud de tierra (barro amarillo) debido a las lluvias destruyó parte de una vivienda. También se desprendió una roca grande (caída de rocas).
89	PASEO BOLÍVAR, CALLE GUILLERMO POSADA	18/10/2012			1F				X					El Universal	20/10/2012	Deslizamiento de tierra (flujo de material) por lluvias en los patios de varias viviendas
90	SINAÍ	31/08/2013			1F				X					El Universal	01/09/2013	Se presentó un deslizamiento de tierra provocado por las lluvias que afectó una vivienda
91	LOMA DEL DIAMANTE	19/03/2014	1		2F				X					El Universal	19/03/2014	Se presentó un alud de tierra que afectó 5 viviendas, cobrando la vida de un anciano

Cuadro A-6. Inventario de Deslizamientos registrados 2011 - 2014

Fuente: El autor (2014)



Anexo B. Otros Métodos de Evaluación de la Amenaza por PRM



B. Otros Métodos de Evaluación de la Amenaza por PRM

En la actualidad la predicción y monitoreo de amenazas por deslizamientos es foco de investigación en las comunidades científicas (Jian y Xiang-guo 2009), por ello con el desarrollo de técnicas de observación satelital y herramientas avanzadas de análisis de datos, las nuevas teorías de modelamiento han integrado todas las fuentes de datos que se utilizan para zonificar las amenazas por deslizamientos (Godschalk et al. 2003; Oštir y Veljanovski 2003).

Para Pardeshi et al. (2013) hay numerosos métodos de zonificación de la amenaza a los PRM, sin embargo ningún método es aceptado universalmente para la evaluación efectiva de la amenaza por deslizamientos. En los últimos años, se han hecho varios intentos de aplicar diferentes metodologías de evaluación y comparar los resultados con el fin de encontrar el mejor modelo (más adecuado), sin embargo aún los resultados no son totalmente concluyentes.

En el trabajo de Pardeshi et al. (2013) se presenta una revisión detallada de investigaciones sobre la zonificación de la amenaza por deslizamientos publicadas en los últimos años, la cual se presenta a continuación, es traducida por Aguilar-Collazo (2014) y complementada con información bibliográfica adicional.

B.1. Inventario de Movimientos en Masa

El inventario de movimientos en masa se presenta como el medio adecuado para el conocimiento de los procesos que caracterizan la ocurrencia de deslizamientos, en diferentes ambientes geológicos, climáticos y urbanos. Este método se basa en un trabajo de fotointerpretación y de reconocimiento de campo y en la conformación de una base de datos históricos; la idea principal es generar un mapa de inventario de procesos actuales que representa un mapa de amenaza actual y debe utilizarse como tal (Millan y Vesga 1998).

Esta técnica de inventario ó análisis de distribución es un enfoque cualitativo simple para cartografiar la amenaza por PRM. En este análisis, los mapas de inventario de movimientos en masa son producidos para que representen los patrones espaciales y temporales de la distribución de los deslizamientos, tipo y velocidad del movimiento, tipo de material desplazado, entre otros rasgos. Los datos de los movimientos en masa se obtienen a través del mapeo de reconocimiento de campo, registros históricos e interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Los mapas de distribución y densidad de movimientos en masa proporcionan una base para otros métodos de susceptibilidad de movimientos en masa.

Para Cruden (1991) este método es la forma más simple de información sobre la ubicación, fecha de ocurrencia y tipo de movimiento en masa. Los mapas de inventario de movimientos en masa muestran fallas de taludes por un evento o efectos acumulativos de muchos eventos (Guzzetti et al. 2005a). En Italia, Guzzetti et al. (2003) estudiaron tres inventarios de eventos de movimientos en masa y los compararon usando estadísticas de frecuencia de áreas. Por otro lado, Colombo et al., (2005) realizaron inventarios de movimientos en masa a través de inspección sistemática interpretando fotografías aéreas y utilizando una base de datos en SIG, para procesar dichos datos



usando los archivos del ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, en italiano).

B.2. Enfoque Estadístico

En los últimos años, la visión de zonificar la amenaza por PRM ha cambiado del enfoque heurístico (basado en el conocimiento de un experto) al enfoque estadístico (basado en datos) para reducir al mínimo la subjetividad en el procedimiento de asignación de puntajes de ponderación y producir resultados más objetivos y reproducibles (Kanungo et al. 2009). Actualmente se prefieren los métodos basados en el análisis estadístico de las variables geoambientales relacionadas con la ocurrencia de deslizamientos. De acuerdo con Pardeshi et al. (2013) los métodos estadísticos para zonificar la amenaza por PRM se pueden dividir en dos grupos: Análisis Estadístico Bivariado y Análisis Estadístico Multivariado. Es importante mencionar que Ojeda et al., (2001) categoriza estos dos tipos de análisis para zonificar la amenaza por deslizamientos a escala regional como Métodos Explícitos Semianalíticos. Según Pardeshi et al. (2013) entre los métodos estadísticos bivariados de importancia se encuentran los siguientes:

- Enfoque de Análisis de Frecuencias
- Modelo de Información de Valor (IVM)
- Modelo de Pesos de Evidencia
- Modelo de Superposición Ponderada.

□ Enfoque de Análisis de Frecuencias

Este enfoque bivariado para evaluar la susceptibilidad a los PRM, se basa en las relaciones observadas entre la distribución de movimientos en masa y cada factor causal en relación con estos movimientos. Este método puede ser usado para establecer una correlación espacial entre la ubicación de los movimientos en masa y los factores explicativos de estos movimientos (Lee 2005).

La relación de frecuencia para cada sub-clase de cada factor causal es calculada en función de su relación con la ocurrencia de los movimientos en masa. Finalmente existe un Índice de Susceptibilidad a los Movimientos en masa (LSI) que se calcula mediante la suma de valores de la relación de frecuencia de cada factor.

Este enfoque ha sido aplicado de buena forma por Lee (2005) y nuevamente por Lee y Pradhan (2006) para evaluar la susceptibilidad a los PRM en Penang, Malasia, encontrando para el caso de estudio que al incorporar datos de precipitación en la zonificación, se mejoró el nivel de predicción de la cartografía de susceptibilidad por PRM. También ha sido utilizado más recientemente por Balteanu et al. (2010) y Goswami et al. (2011) para cartografiar la susceptibilidad a los PRM en Rumania y evaluar la distribución espacial de los movimientos en masa en el Suroeste de Calabria (Italia) respectivamente.

□ Modelo de Información de valor (IVM)

Es un método estadístico bivariado usado para la predicción espacial de los movimientos en masa, basado en las relaciones entre la ocurrencia de estos movimientos y parámetros relacionados (Sarkar et al. 2006). Los valores de la información se determinan para cada subclase de parámetro de movimiento en masa relacionado sobre la base de la presencia de deslizamientos en una unidad cartográfica dada.



Este método ha sido aplicado en varios estudios para elaborar la cartografía de zonificación de la amenaza por PRM, entre ellos está el estudio de Zezere (2002), quien llevó a cabo la evaluación de la susceptibilidad a los PRM teniendo en cuenta la tipología de los movimientos en masa en el norte de Lisboa, Portugal. Este autor encontró que los valores de información para carreteras y canales fluviales se encuentran en una clase alta de susceptibilidad de los PRM. El estudio reveló que las actividades antropogénicas desempeñan un papel significativo en la ocurrencia de PRM y la magnitud de los deslizamientos depende en gran medida de la tipología de estos movimientos. Wang y Sassa (2005) compararon los mapas de susceptibilidad a los PRM para el área de Minamata (Japón) generados por Regresión Logística y por el Modelo de Información de Valor (IVM) en un ambiente SIG. Sarkar et al. (2006) presentaron un análisis de datos espaciales en SIG para la cartografía de la amenaza por PRM en el estado de Sikkim en el Himalaya (India); utilizaron este método para integrar las capas temáticas de datos y los pesos numéricos asignados. Sharma et al. (2009) realizaron la zonificación de la susceptibilidad a PRM del estado de Sikkim (Himalaya) usando el Modelo de Información de Valor (IVM) con SIG.

Akbar y Ha (2011) desarrollaron un modelo integrado de zonificación de la susceptibilidad a PRM usando un dispositivo GPS, SIG y datos de sensores remotos. Se utilizó una forma modificada del Modelo de Información de Valor basado en píxeles para mapear la susceptibilidad a los PRM. El estudio reveló que factores como el uso del suelo, intensidad de las precipitaciones y distancia a la carretera o río (elementos) influyen más los PRM que otros factores. Pereira et al. (2012) utilizaron este modelo para evaluar el papel de las diferentes combinaciones de factores que inducen PRM en la ocurrencia de deslizamientos superficiales al norte de Portugal. Se elaboraron 120 mapas de susceptibilidad a los PRM basados en el Modelo de Información de Valor y se compararon para determinar el "mejor modelo de ajuste" para evaluar la susceptibilidad a los PRM en el área de estudio. Recientemente, Balsubramani y Kumaraswamy (2013) aplicaron el Modelo de Información de Valor para la cartografía de la zonificación de la amenaza por PRM en el valle Giri de Himachal Pradesh (India), a partir de datos satelitales de alta resolución.

El Modelo de Información de Valor (IVM) ha sido probado como un método útil para determinar el grado de influencia de cada factor causal responsable de la ocurrencia de los PRM (Kanungo et al. 2009; Champatiray 2000; Champatiray et al. 2007; Arora et al. 2004).

Modelo de Pesos de Evidencia

Este método es una forma logarítmica lineal del modelo de probabilidad bayesiana para la evaluación de la susceptibilidad a PRM y utiliza la ocurrencia de deslizamientos como puntos de formación para obtener salidas de predicción. Este modelo se basa en el cálculo de los pesos positivos y negativos de cada variable o factor causante de los deslizamientos basado en la presencia o ausencia de estos movimientos en un área dada (probabilidad incondicional y condicional). Así los datos históricos de eventos son esenciales para la ponderación de los factores.

A partir del cálculo de los pesos, es posible definir el grado de asociación espacial entre la ocurrencia de los deslizamientos y cada clase explicativa de las variables. Para un determinado número de unidades de celdas, $N \{D\}$, que contiene una ocurrencia, D , la probabilidad previa de ocurrencia en $N \{T\}$ (superficie total estudiada) se expresa por:

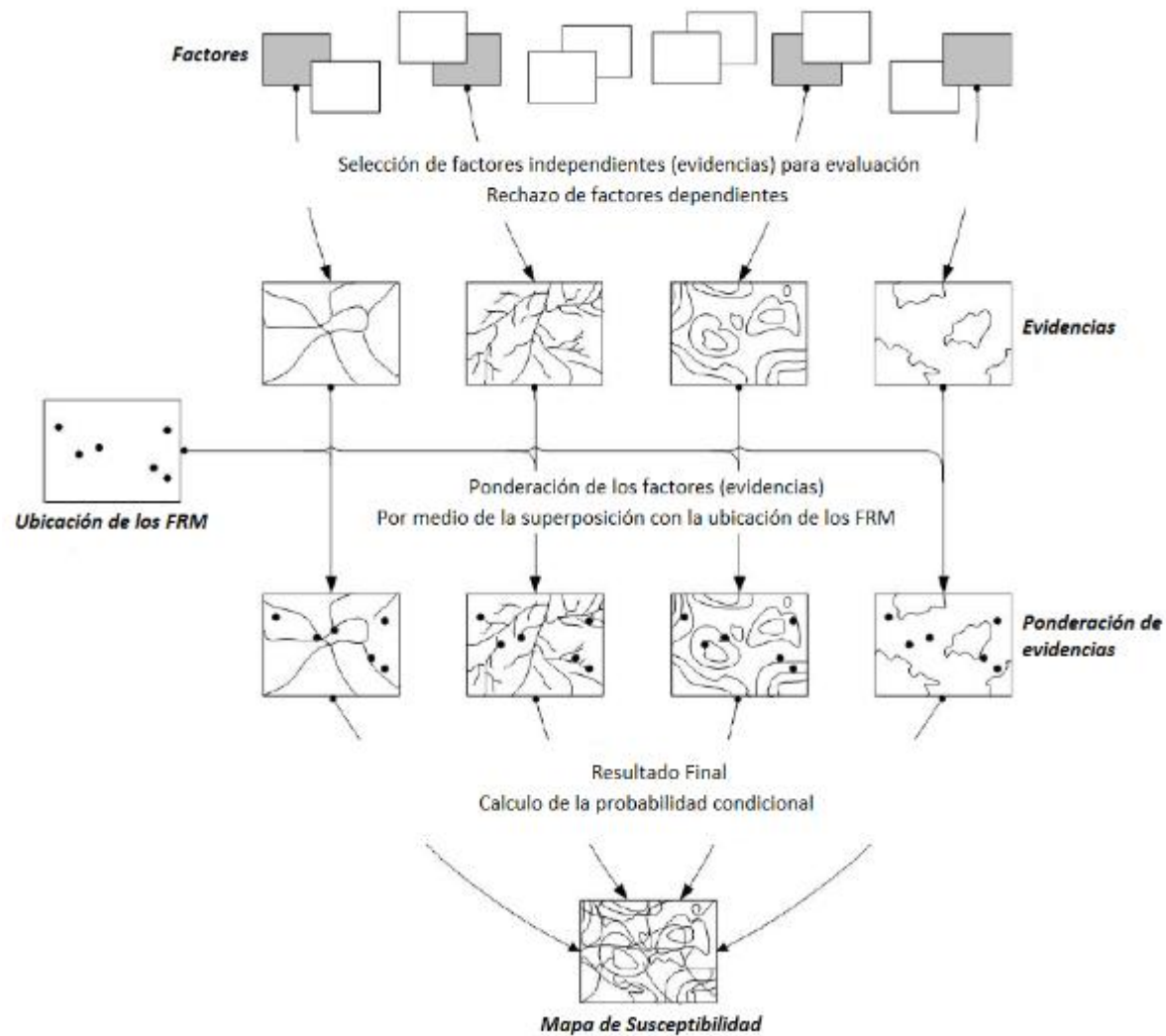


Figura B-1. Esquematación del Modelo de Pesos de Evidencia

Fuente: Tomado de Romero et al. (2014)



$$P\{D\} = \frac{N\{D\}}{N\{T\}} \quad [1]$$

Los modelos de pesos de evidencia se han utilizado para evaluar la susceptibilidad a los PRM desde la década de los 90's (Blahut et al. 2010). Se utilizan diferentes combinaciones de factores causantes de los deslizamientos, con el fin de describir su interrelación con la distribución de estos movimientos.

❑ **Modelo de Superposición Ponderada**

Es un método bivariado sencillo en el que los pesos se asignan sobre la base de la relación de los factores causantes de los deslizamientos con la frecuencia de estos movimientos. Sarkar et al. (1995) desarrollaron una metodología para zonificar la amenaza por PRM en el Distrito Rudrapeyag en Garhwal Himalaya (India), asignando pesos numéricos a los factores causales sobre la base de su relación con la frecuencia de los PRM y superponiendo las capas de datos para obtener un mapa de zonificación de dicha amenaza. Panikkar y Subramaniyan (1997) llevaron a cabo una evaluación de la amenaza por PRM en el área alrededor de Dehradun y Massori de Uttar Pradesh, actualmente Uttarakhand (India), usando SIG por medio del método de superposición ponderada.

El estudio reveló que la rápida deforestación y urbanización han provocado movimientos en masa en el área de estudio. Este método se utiliza para determinar la importancia relativa de los factores causantes de los PRM en la ocurrencia de movimientos en masa (Parise 2002; Preuth et al. 2010; Cardinali et al. 2002).

B.3. Método del Factor de Evaluación de Amenaza por Deslizamiento (LHEF)

La Bureau of Indian Standards, BIS (1998) ha dado directrices en la zonificación de la amenaza por movimientos en masa a nivel macro en la India. El esquema de calificación de este método de zonificación se considera heurístico. Según la BIS (1998) el procedimiento para zonificar se puede realizar usando una calificación del factor LHEF para diferentes factores causantes de los deslizamientos. La BIS identificó seis factores causantes de estos movimientos para evaluar la zonificación de la amenaza: Litología, Estructura, Morfometría del talud, Relieve relativo, Cobertura y Uso del suelo y Condición hidrológica. En este método, el área de estudio se divide en pequeñas unidades de terreno a las que se asignan pesos numéricos para cada capa temática de datos y finalmente se obtiene un estimado total de la amenaza mediante la suma de los pesos de todas las variables para cada unidad de terreno y se genera un mapa de la amenaza por movimientos en masa.

Anbalagan et al. (2008) aplicaron este método para cartografiar la susceptibilidad a los movimientos en masa a una meso-escala en Nainital, Kumaun Himalaya (India). El mapa de pendientes se consideró mapa base para preparar las capas temáticas de datos. También se han realizado unos pocos intentos por aplicar este método en varias partes de la India (Naithani 2007; Singh et al. 2011; Champatiray et al. 2007; Kannan et al. 2011).

El esquema de calificación de este método es muy sencillo y su costo es moderado para cartografiar la amenaza por deslizamientos. Sin embargo existe subjetividad en el



procedimiento de asignación de los pesos, lo cual puede afectar el nivel de precisión del mapa de zonificación de la amenaza. Por otra parte, este método no tiene en cuenta la distribución espacial de los movimientos en masa y por lo tanto es muy difícil de comprobar su validez.

Ghosh et al. (2009) evaluaron la eficacia de este método en Darjeeling, Himalaya (India) adoptando un modelo de Pesos de Evidencia extendido (WofE). Los autores propusieron un modelo modificado basado en las relaciones entre los factores causantes de los deslizamientos, con la distribución de estos movimientos, y encontraron que el método modificado es más eficaz para zonificar la amenaza por PRM.

B.4. Método de la Lógica Difusa

La idea de la lógica difusa es introducida por el profesor Lotfi A. Zadeh de la Universidad de Berkeley, California. La lógica difusa es una forma de lógica de múltiples valores derivada de la teoría de conjuntos difusos que se trata con razonamiento aproximado. Proporciona los medios para representar y procesar la información lingüística y atributos subjetivos del mundo real (Poonam et al. 2012). El método de la lógica difusa para zonificar la amenaza por movimientos en masa se basa en el análisis bivariado, donde cada variable explicativa de estos movimientos está representada por un valor entre 0 y 1 en función del grado de asociación de estos parámetros con la ocurrencia de deslizamientos (Champatiray 2000). Estos valores entre 0 y 1 están integrados mediante el uso del operador "Fuzzy gama" o " Fuzzy Algebric Sum" para producir mapas de zonificación de la amenaza por deslizamientos.



Figura B-2. Esquema general de un sistema basado en Lógica Difusa

Fuente: Tomado de Portilla (2002)

Según Pradhan (2010), este método permite más combinaciones flexibles de mapas ponderados, y podría ser implementado fácilmente con un lenguaje de modelado SIG. Este método es diferente de los enfoques basados en datos tales como el Modelo de Pesos de Evidencias o de regresión logística, que utilizan las ubicaciones de los objetos conocidos, como los deslizamientos para estimar los pesos o coeficientes. La idea de usar el método de la lógica difusa en la zonificación de la amenaza por deslizamientos, es considerar todos los objetos espaciales en un mapa, como miembros de un conjunto.

Para Marjanovic y Caha (2011), el enfoque de lógica difusa presenta subjetividad en relación con los atributos de entrada, debido a la incapacidad de este método para manejar variables numéricas continuas. Los autores consideran que para mejorar los resultados del método de lógica difusa, éste se debe combinar con otras técnicas (p.e. método heurístico).



Champatiray et al. (2007) aplicaron este método para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en Garhwal Himalaya (India). Schernthanner (2007) también evaluó la susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de Río Blanco en Nicaragua donde se presentaron en el año 2004 más de 700 movimientos en masa de diferente tamaño y tipo que causaron gran impacto en los habitantes e infraestructura relacionada.

B.5. Análisis Estadístico Multivariado

El Análisis Estadístico Multivariado para zonificar la amenaza por deslizamientos considera la contribución relativa de cada capa temática de datos a la susceptibilidad total a los PRM (Kanungo et al. 2009). Estos métodos calculan el porcentaje de área de deslizamiento para cada píxel y la ausencia de deslizamientos; se produce una capa de datos seguida por la aplicación del método estadístico multivariado para la reclasificación de la amenaza en un área dada. Entre los métodos multivariados más comunes para zonificar la amenaza a los movimientos en masa se citan los siguientes:

- Análisis de Regresión Logística
- Análisis Discriminante
- Redes Neuronales Artificiales (ANN)
- Análisis Condicional
- Modelos de Regresión Múltiple

□ Análisis de Regresión Logística

La regresión logística es útil para predecir la presencia o ausencia de una característica o resultado basado en valores de un conjunto de variables predictoras. Este modelo es adecuado cuando la variable dependiente (p.e. eventos de deslizamientos) es dicotómica (Wang y Sassa 2005). La regresión logística puede ser de dos tipos a saber: Logística binaria (cuando la variable dependiente es dicotómica y la variable independiente es de cualquier tipo) y la regresión logística multinomial (variable dependiente con más de dos categorías). Al cartografiar la susceptibilidad a los movimientos en masa, este análisis de regresión encuentra el mejor modelo de ajuste para describir la relación entre la presencia y ausencia de los movimientos en masa y el conjunto de variables independientes como ángulo y aspecto de la pendiente, litología y uso del suelo (Ayalew y Yamagishi 2005). Este análisis genera las estadísticas del modelo y coeficientes de fórmulas útiles en la definición de la susceptibilidad. Si el coeficiente es positivo, el evento de deslizamiento es probable que se produzca. La regresión logística es un modelo estadístico de inestabilidad de ladera construido en el supuesto de que los factores iniciales que causaron la falla de la ladera en una región dada son los mismos que generarán la falla en el futuro (Guzzetti et al. 1999).

Guzzetti et al. (1999) aplicaron este método para modelar la susceptibilidad a los deslizamientos en la región de Umbría, en Italia central. Rowbotham y Dudycha (1998) aplicaron el modelo de regresión logística en la zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en Hong Kong, clasificando la región en unidades de terreno sobre la base de un modelo de elevación digital en un entorno SIG. Tolga et al. (2005) también aplicaron este modelo en la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la región del Mar Negro en Turquía, utilizando la unidad de "condición única" como una unidad de mapeo para la clasificación de susceptibilidad.



Recientemente, se han realizado varios análisis de susceptibilidad a los deslizamientos basados en SIG usando píxel como unidad cartográfica. Algunos estudios han aplicado el modelo de regresión logística en la zonificación de la amenaza por movimientos en masa, obteniendo comparativamente altas tasas de éxito (Chau et al. 2004; Wang y Sassa 2005; Ayalew et al. 2005; García-Rodríguez et al. 2008; Ghosh 2011; Ohlmacher y Davis 2009; Hakan et al. 2008; Chang et al. 2007; Das et al. 2011; Akgun 2011; Mancini et al. 2010; Erner et al. 2010; Ayalew y Yamagishi 2005; Guzzetti et al. 1999; Das 2011; Atkinson y Massari 1998; Greco et al. 2007; Chang y Chiang 2009; Lee 2005; Atkinson y Massari 2011; Schicker y Moon 2012; Das et al. 2012; Meusburger y Alewell 2009; Lee et al. 2010; Dai y Lee 2002; Xu et al. 2012).

❑ **Análisis Discriminante**

El análisis discriminante es uno de los modelos estadísticos utilizados con frecuencia para zonificar la amenaza a los movimientos en masa. Este análisis nos permite determinar la diferencia máxima para cada variable independiente (p. e. factor causante de deslizamiento) entre el grupo "deslizamiento" y el grupo "sin deslizamiento" y para determinar los pesos de estos factores (Lee et al. 2008). Las unidades de ladera son clasificadas en clase afectada por deslizamientos y clase libre de deslizamientos y la importancia relativa de cada variable se expresa mediante el cálculo del coeficiente estandarizado de la función discriminante (SDFC). Este coeficiente muestra la importancia relativa de cada variable en la función discriminante como predicción de la inestabilidad de laderas. Las variables con un coeficiente alto están fuertemente asociadas con la presencia o ausencia de deslizamientos.

En diferentes partes del mundo se han llevado a cabo varias investigaciones para evaluar la susceptibilidad a los movimientos en masa por medio del Análisis Discriminante. Guzzetti et al. (2005b) aplicaron el método del Análisis Discriminante en la zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos usando 46 variables temáticas en un entorno SIG, en el cual el porcentaje de área de deslizamientos y la variable independiente individual se calcularon para cada píxel. Calvello et al. (2013) llevaron a cabo la zonificación de la susceptibilidad a los movimientos en masa por medio del Análisis Discriminante en Tammaro, cuenca del sur de Italia, dividiendo la región en unidades hidrológicas con base en la red de drenaje y geología de la zona para definir la unidad de mapeo. Se utilizó la función discriminante para definir la unidad de terreno con base en la clasificación para zonificar la amenaza por movimientos en masa.

Lee et al. (2008) utilizaron el Análisis Discriminante para la zonificación de la amenaza por deslizamientos de un sector del centro-occidente de Taiwán. Los resultados indican que el factor de inclinación del talud tiene el coeficiente más alto y el mayor porcentaje de ponderación seguido del Índice Normalizado de Vegetación Diferencial (NDVI). La tasa de éxito para el mapa de susceptibilidad por deslizamientos producido por este método fue alta. Por otro lado, Ohlmacher y Davis (2009) prepararon un mapa de zonificación de la amenaza por deslizamientos en la cuenca de Kanas (EE.UU.) usando Regresión Logística y Análisis Discriminante en un entorno SIG. Eckhaut et al. (2009) aplicaron el Análisis Discriminante en la evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos con base en diferentes unidades de mapeo, comparando los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos generados usando un Enfoque Multivariado para las siguientes unidades de mapeo: Celdas en cuadrícula (píxel), Unidad de Cartografía Topográfica (TMU) y unidades de pendiente. El estudio reveló que el mapa de susceptibilidad utilizando Unidad de Cartografía Topográfica (TMU) muestra mayor área de susceptibilidad a los deslizamientos que el mapa de susceptibilidad basado en cuadrículas.



❑ Método de Redes Neuronales Artificiales

Los movimientos en masa se rigen por diversos factores preliminares y desencadenantes que están complejamente interrelacionados. Las interrelaciones entre estos factores y los movimientos en masa son no lineales en la naturaleza (Ercanglu 2005). Para evaluar de forma precisa la susceptibilidad a los deslizamientos se necesitan de igual modo métodos más precisos.

En los últimos años un grupo de investigadores ha perseguido la creación de un modelo de computador que iguale o adopte las distintas funciones básicas del cerebro. El resultado ha sido una tecnología de reciente aparición llamada Computación Neuronal o también Redes Neuronales Artificiales (Basogain 1998).

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN) es un sistema basado en la capacidad de aprender, generalizar y abstraer características de un fenómeno particular, de forma similar a lo que hace el cerebro humano. Este modelo tiene más de tres capas de neuronas artificiales que están conectadas por pesos; utiliza el Algoritmo de Aprendizaje de Retropropagación, el cual define las reglas para la asignación de pesos. Posteriormente el peso de cada variable se ajusta para minimizar los errores. La Red Neuronal Artificial (ANN) es un modelo no lineal que ha demostrado ser eficaz en la evaluación de la amenaza por movimientos en masa (Catani et al. 2005; Ercanglu 2005; Pradhan y Lee 2009, 2010; Bui et al. 2012).

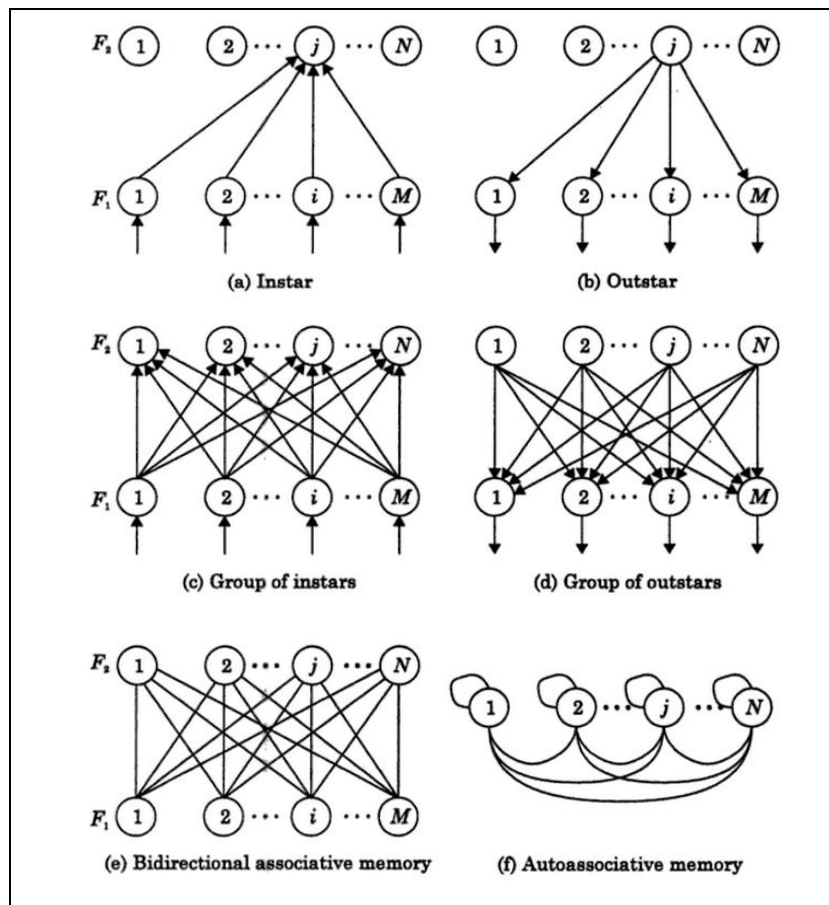


Figura B-3. Algunos Esquemas de Redes Neuronales Artificiales

Fuente: Tomado de Yegnanarayana (2009)



Ercanglu (2005) generó mapas de susceptibilidad por deslizamientos usando un modelo tipo ANN de Retropropagación en el módulo NeuralNet de Idrisi Kilimanjaro en un área al Oeste del Mar Negro, Turquía. El autor consideró seis parámetros (ángulo y aspecto de la pendiente, elevación topográfica, perfil topográfico, índice de humedad e Índice Normalizado de Vegetación Diferencial) para la determinación de los pesos en la fase de prueba del modelo ANN. El resultado del modelo después de su validación mostró un 82,5% de los resultados correctos. Catani et al. (2005) aplicaron un modelo ANN para zonificar la susceptibilidad por deslizamientos en la Cuenca del Río Arno en Italia central, en el cual las capas de los factores preliminares de movimientos en masa fueron superpuestos para definir las unidades de "condición única", obteniendo un mapa de susceptibilidad final con más del 85% de resultados correctos en relación con el reconocimiento de las áreas susceptibles a los PRM.

Chang y Liu (2004) implementaron un modelo ANN para zonificar la susceptibilidad a los movimientos en masa en Taiwán central, usando datos satelitales de alta resolución y concluyendo que el método ANN es mucho mejor que el método estadístico de la máxima verosimilitud. Pradhan y Lee (2009) encontraron entre 72 a 81% de coincidencia con la susceptibilidad por deslizamientos de cinco sitios de prueba de la isla de Penang (Malasia) al aplicar un modelo ANN en un entorno SIG. Pradhan y Lee (2010) también aplicaron esta metodología para evaluar la susceptibilidad a los movimientos en masa en tres áreas de prueba en Malasia. Bui et al. (2012) realizaron la cartografía para zonificar la amenaza a los PRM en Malasia utilizando Redes Neuronales Artificiales con Regulación Bayesiana y Redes Neuronales con el algoritmo de aprendizaje Levenberg Marquardt y encontraron una precisión de hasta el 90,3% y 86,1% respectivamente, por lo tanto, un modelo ANN en un entorno SIG se puede implementar de modo eficaz en la evaluación de la amenaza por deslizamientos, para mejorar la capacidad de predicción de estos movimientos.

Arora et al. (2004) propusieron un enfoque ANN de ajuste de modelos tipo caja negra para la zonificación de la amenaza a los PRM en Bhagirathi (Ganga) valle, India. Este enfoque determina los pesos que permanecen ocultos durante la etapa de ensayo. Después del ensayo y las pruebas de los diferentes archivos de redes neuronales, la mejor opción se selecciona en función de la precisión.

□ Otros Enfoques Multivariados

Rotigliano et al. (2011) estudiaron el papel de las áreas de diagnóstico en la zonificación de la susceptibilidad a los PRM en Sicilia, Italia. Se combinaron los factores causantes de los movimientos en masa para identificar las unidades de terreno de "condición única" y luego se seleccionaron las áreas de diagnóstico con base en los tipos de movimientos en masa. Finalmente, el modelo fue validado utilizando curvas de tasa de predicción y de éxito. La selección de las áreas de diagnóstico es uno de los pasos más importantes en la evaluación de la amenaza a los PRM, sin embargo desafortunadamente ha recibido muy poca atención (Rotigliano et al. 2011).

Clerici et al. (2002) aplicaron el método de Análisis Condicional en un entorno SIG para cartografiar la susceptibilidad a los movimientos en masa en la cuenca del Río Parma en los Apeninos septentrionales de Italia, usando comandos tipo GRASS (Sistema de Soporte de Análisis de Recursos Geográficos).

El enfoque multivariado para zonificar la susceptibilidad por deslizamientos ha sido ampliamente utilizado en los últimos años y ha demostrado ser el método más objetivo



para evaluar la amenaza a los movimientos en masa en escenarios geo-ambientales complejos (Conoscenti et al. 2008; Eckhaut et al. 2009; Ercanglu et al. 2003; Ayalew y Yamagishi 2005).

La aplicación de métodos estadísticos multivariados en la cartografía de la zonificación de la amenaza por PRM ofrece resultados más precisos, aunque incluye cálculos complejos. Estos métodos permiten evaluar la contribución comparativa de cada factor causal en la ocurrencia de movimientos en masa, por lo tanto, estos métodos son más objetivos en la asignación del coeficiente de ponderación en el procedimiento de mapeo de la zonificación en mención.

En tiempo reciente son pocos los estudios que han evaluado la susceptibilidad a los PRM usando mapeo dendrogeomórfico (sistemático y extenso). Saez et al. (2012) han intentado mapear la probabilidad de reactivación de movimientos en masa, utilizando los registros de los anillos de los árboles para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa en el sur de los Alpes franceses, estableciendo la relación entre la frecuencia de los movimientos en masa y la estructura de edades de soporte y perturbaciones utilizando análisis dendrogeomórfico.

B.6. Enfoque Probabilístico

La evaluación probabilística de la amenaza a los movimientos en masa ayuda a determinar la probabilidad espacial, temporal y tamaño de estos movimientos (Guzzetti et al. 2005b). Los métodos probabilísticos para cartografiar la zonificación de la amenaza a los movimientos en masa traen consigo objetividad en la asignación de pesos. En los enfoques probabilísticos para zonificar la susceptibilidad por deslizamientos, la distribución espacial de estos movimientos se compara con diversas variables explicativas dentro del marco probabilístico (Kanungo et al. 2009). Se incluye la probabilidad bayesiana, factor de certidumbre, función de favorabilidad, etc. El nivel de relación entre cada capa temática de datos y la distribución de deslizamientos se transforma en un valor basado en la función de distribución de probabilidad. Este enfoque es cuantitativo, sin embargo existe cierto grado de subjetividad en el procedimiento de asignación de los pesos (Kanungo et al. 2009).

Guzzetti et al. (2005b) evaluaron la amenaza a los PRM en la cuenca del Río Staffora al norte de los Apeninos Italianos utilizando un modelo probabilístico, calculando la probabilidad del tamaño de los deslizamientos y la probabilidad temporal y espacial de estos movimientos, a través de la función de distribución de frecuencia. El modelo de probabilidad de Poisson fue aplicado para determinar la probabilidad de excedencia de un movimiento en masa en cada unidad de mapeo.

Jaiswal et al. (2010a) llevaron a cabo una evaluación cuantitativa de la amenaza a los deslizamientos a lo largo de la ruta de transporte en las colinas de Nilgiri, India. Se obtuvieron las estadísticas de frecuencia-volumen para determinar la probabilidad de la magnitud de los deslizamientos para diferentes períodos de retorno. Los resultados del estudio indicaron que la variación anual de la frecuencia de deslizamientos y su volumen están relacionados con la cantidad de lluvia. Por lo tanto, la probabilidad del tamaño de los deslizamientos con base en el porcentaje de frecuencia de deslizamientos se puede estimar mediante la incorporación de datos de magnitud de lluvia.



Das et al. (2011) evaluaron la Unidad de Susceptibilidad Homogénea (HSU) con base en la amenaza por deslizamientos usando probabilidad espacial, temporal y de tamaño de los deslizamientos en la cuenca del Río Bhagirathi al norte del Himalaya (India). Un conjunto de datos satelitales de alta resolución se utilizaron para definir la Unidad de Susceptibilidad Homogénea (HSU) para el mapeo de la zonificación de la amenaza a los deslizamientos. Recientemente, Jaiswal et al. (2010b) trataron de evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos en las colinas de Nilgiri (India) utilizando la probabilidad espacial para producir información de la amenaza y del riesgo para la definición de las medidas de planificación en la reducción de riesgo. Adicionalmente los autores desarrollaron un sistema de alerta temprana de deslizamientos a partir de una base de datos de ocurrencia de lluvias.

En tiempo reciente, varios estudios han intentado aplicar el enfoque probabilístico en la zonificación de la amenaza a los deslizamientos desde un punto de vista cuantitativo (Ghosh 2011; Floris y Bozzano 2008; Das 2011; Jaiswal y Van Westen 2013; Guzzetti et al. 2006; Polemio y Sdao 1999; Chelboard et al. 2006).

B.7. Metodología de los Taludes Naturales (MTN)

Según Shuk (1999), la aplicación de la MTN funciona como una herramienta por sí sola, o complementaria, adicional y equiparable a las de las metodologías geotécnicas convencionales para la zonificación geotécnica cuantitativa. La MTN se enmarca dentro del campo conceptual de la Macrogeotecnia y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, solamente con base en planos topográficos de escala y calidad adecuada, y que indiquen los contactos entre las diferentes formaciones geológicas.

La MTN utiliza el análisis de la observación y medición organizada y sistemática de dos parámetros geométricos cuantitativos (L, H), que se obtienen de agrupaciones adecuadamente delimitadas en los niveles de medición de taludes naturales (familia, subpoblación, población o universo). En general, el uso de la MTN no requiere de informaciones adicionales, de sondeos, ni de ensayos de laboratorio o in situ, por lo tanto es un método económico y rápido de ejecutar con respecto a otras metodologías convencionales. Aunque la MTN se desarrolló inicialmente para el estudio de la estabilidad de taludes, su aplicación ha ampliado sus campos de acción como herramienta auxiliar para exploración geológica y detección de rasgos geoestructurales, para exploración de yacimientos de minerales pesados y agregados de concreto y en el planeamiento, exploración y diseño de obras subterráneas.

B.8. Enfoque del Proceso Analítico Jerárquico

La evaluación de la amenaza por deslizamientos implica la consideración de diversas variables explicativas de estos movimientos. Se trata de una tarea crítica para determinar la contribución relativa de un parámetro individual en la ocurrencia de deslizamientos. Por lo tanto, la aplicación del Enfoque Multicriterio para la toma de decisiones (MCDA) es de suma importancia en la cartografía para zonificar la amenaza por PRM. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un proceso multicriterio de medición a través de pares de comparación (acertados) y depende del juicio de expertos para deducir escalas de prioridad (Saaty 2008). El Proceso Analítico Jerárquico opera en cuatro niveles a saber: Problema de definición, Determinación de objetivos y alternativas, Construcción de la



matriz de pares de comparación y Determinación de los pesos y obtención de prioridad general. En una zonificación de la amenaza por PRM, los diferentes factores causantes de los movimientos en masa se consideran como alternativas. Se asignan números absolutos (de 1 a 9) a cada parámetro relacionado con los movimientos en masa en función de su importancia relativa y se construyen las matrices de comparación para calcular el Radio de Consistencia (CR) y el Índice de Consistencia (CI). Akgun (2011) comparó los mapas de amenaza por deslizamientos generados por regresión logística (LR), Proceso Multicriterio para la toma de decisiones (MCDA) y Método de la Razón de Verosimilitud (LRM) en Azmir (Turquía), utilizando el método del Área Bajo la Curva, encontrando coeficientes de correlación (r) entre 0,58 y 0,86, y que la metodología LRM y MCDA mostraron resultados similares.

Ayalew et al. (2005) compararon los mapas de zonificación de la susceptibilidad por deslizamientos usando regresión logística (LR) y el modelo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para evaluar la amenaza por deslizamientos. El estudio reveló que si hay un incremento en el número de categorías de vulnerabilidad, el modelo LR brinda más detalles que el modelo AHP. Sin embargo cuando estos mapas se compararon con los mapas de actividad de deslizamientos, el mapa basado en el modelo AHP se comportó mejor que el mapa del modelo LR. En tiempo reciente, se han hecho varios intentos para aplicar el modelo AHP en un entorno SIG en la cartografía de la susceptibilidad por deslizamientos en diferentes partes del mundo (Mondal y Maiti 2012; Ma et al. 2013; Kavzoglu et al. 2013).

B.9. Modelo de Umbrales de Lluvia

El umbral de lluvia para deslizamientos se refiere a la mínima intensidad o duración de la lluvia necesaria para causar movimientos en masa (Varnes y IAEG 1984). La precipitación acumulada, la precipitación antecedente, la intensidad de la precipitación y la duración de la precipitación son los parámetros más comunes que se utilizan para determinar el umbral de lluvia. El modelo del umbral crítico de lluvia (Q_{cr}) se basa en las propiedades del suelo, ángulo de la pendiente, pendiente de drenaje, densidad aparente del suelo y densidad del agua. Varios estudios sobre la evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos han utilizado el modelo de umbrales de lluvia para predecir estos movimientos. En el Himalaya (Nepal), el umbral de precipitación disminuye con el incremento de la acumulación de temporada y se vuelve constante a 11 mm/día (Gabet et al. 2004).

Chelboard et al. (2006) aplicaron el umbral de lluvia acumulada para la predicción de movimientos en masa en Seattle (Washington), EE.UU. El modelo se comparó con los registros históricos de eventos de lluvias y de movimientos en masa. Los resultados indicaron que el umbral de lluvia acumulada captura más del 90% de los eventos históricos de movimientos en masa. Los autores concluyeron que tanto el umbral de lluvia acumulada como el umbral de excedentes de lluvia (intensidad-duración) se deben utilizar conjuntamente para la predicción de movimientos en masa.

Floris y Bozzano (2008) propusieron una modificación en el modelo convencional de umbral de lluvia para la evaluación de la amenaza a los movimientos en masa. Con base en los registros históricos de eventos de deslizamientos y lluvias, los umbrales de excedentes de lluvia se calcularon para dos movimientos en masa tipo complejo en el sur de los Apeninos Italianos. Chang y Chiang (2009) propusieron un modelo integrado para evaluar la susceptibilidad por deslizamientos inducidos por un tifón en Taiwán,



combinando modelos determinísticos, estadísticos y de umbral de lluvia. Gabet et al. (2004) aplicaron el umbral de lluvia para movimientos en masa en Nepal (Himalaya) considerando precipitaciones diarias y estacionales en el modelo y sugirieron que suficiente lluvia antecedente es necesaria para producir presiones de poros y mecanismos de activación de los movimientos en masa.

Dahal y Hasegawa (2008) estudiaron más de 670 movimientos en masa ocurridos desde 1951 hasta 2006 en Nepal (Himalaya), con el propósito de analizar el umbral de lluvia. Coe et al. (2004) y por otro lado Polemio y Sdao (1999) también han aplicado el umbral de lluvia para la evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en Guatemala e Italia respectivamente.

B.10. Modelos de Base Física para evaluar la Susceptibilidad por Deslizamientos

Los modelos de base física usados para evaluar la amenaza por deslizamientos describen los procesos físicos que conducen a un movimiento en masa y se basan en las leyes mecánicas básicas. Estos modelos representan la respuesta transitoria del agua subterránea cuando llueve en un talud o ladera (Kuriakose 2010). Estos modelos no necesitan datos históricos de movimientos en masa de mucho tiempo atrás y por lo tanto también pueden ser aplicables a las zonas con inventarios incompletos de movimientos en masa (Kuriakose 2010).

Salciarini et al. (2006) aplicaron un programa en Fortran denominado TRIGRS desarrollado por Baum et al. (2002), que se basa en un modelo de infiltración transitoria vertical unidimensional de la lluvia con un modelo de cuadrícula de estabilidad de taludes, para modelar deslizamientos superficiales inducidos por lluvia en la región central de Umbría (Italia), asumiendo condiciones saturadas o muy cercanas al saturamiento. Los autores han elegido los eventos conocidos de lluvia y los registros históricos de deslizamientos para calibrar el modelo y realizar las simulaciones; concluyeron que se necesitan modelos de elevación digital de alta resolución e información sobre la distribución espacial de las propiedades físicas de la superficie para una mejor simulación en el modelo TRIGRS.

La susceptibilidad en tiempo real de deslizamientos superficiales en el Parque Natural de los Apeninos Emilianos (Italia) ha sido estudiada por Montrasio et al. (2011), comparando dos modelos de análisis de susceptibilidad por deslizamientos en un entorno SIG. Se utilizó el modelo de Predicción de la Inestabilidad de Movimientos en masa Superficiales (SLIP) y el modelo en Fortran TRIGRS. Los resultados del estudio indican que ambos modelos tienen una capacidad de predicción similar.

Kuriakose (2010) llevó a cabo un estudio detallado para comparar cuatro modelos de base física en un área del occidente de Ghats of Kerala (India): SHALSTAB (Estabilidad de Movimientos en masa Superficiales), SINMAP (Mapeo del índice de Estabilidad), STARWAR+PROBSTAR (Deposito y Redistribución de Agua en Taludes de Agricultura y Revegetalizados + Probabilidad de Estabilidad) y TRIGRS. El estudio reveló que STARWAR+PROBSTAR es el modelo más adecuado para evaluar las probabilidades espacio-temporales de ocurrencia de movimientos en masa superficiales en esa zona.



Recientemente, se utilizó un modelo de Simulación de la Estabilidad de Taludes de Alta Resolución (HIRESSES) para predecir movimientos en masa con base en parámetros hidrológicos (Mercogliano et al. 2013). El estudio también incorpora un Modelo de Circulación Global para el análisis de los parámetros de lluvia.

Rossi et al. (2013) también utilizaron el modelo HIRESSES a través de aplicaciones computacionales de alto rendimiento (HCP) para analizar condiciones desencadenantes de movimientos en masa en tiempo real para grandes áreas en la cuenca de Armea, la isla de Ischia y en las áreas de provincia de Lucca, Pistoia y Prato (Italia), para generar mapas de probabilidad de inestabilidad y evaluar los resultados de la simulación realizada con la metodología de Monte Carlo.

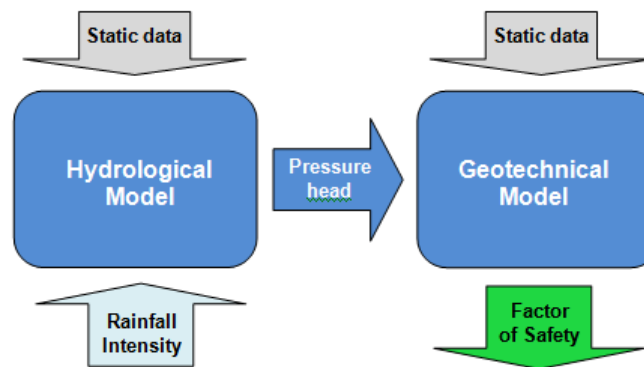


Figura B-4. Esquema del Código HIRESSES para Análisis de Estabilidad

Fuente: Tomado de Margottini (2013)

Entre los últimos avances que se han realizado, se encuentra el trabajo de Wu et al. (2014) que está enfocado en el planteamiento de un sistema de predicción de la amenaza por deslizamientos basado en SIG, realizando pruebas en tiempo real durante la ocurrencia de un tifón o tormenta en China. La predicción de la amenaza por deslizamientos se basa en las precipitaciones y está fundamentada en la combinación del espacio y el tiempo. A partir de una base de datos de SIG y análisis espacial en SIG, el sistema de índice de valoración se construye mediante el análisis de formación de mecanismos de deslizamientos. Mientras tanto, el objetivo clave (susceptible) se calcula con base a la predicción espacial.

Por otra parte, la amenaza por deslizamiento se predice usando los datos en tiempo real de las precipitaciones y un modelo de lluvia efectiva. Durante un tifón o tormenta, se lleva a cabo la predicción de la amenaza por deslizamiento (en tiempo real) a través del sistema en mención (Wu et al. 2014). El diagrama de flujo del sistema de predicción de la amenaza por deslizamientos basado en SIG aparece en la figura B-5.

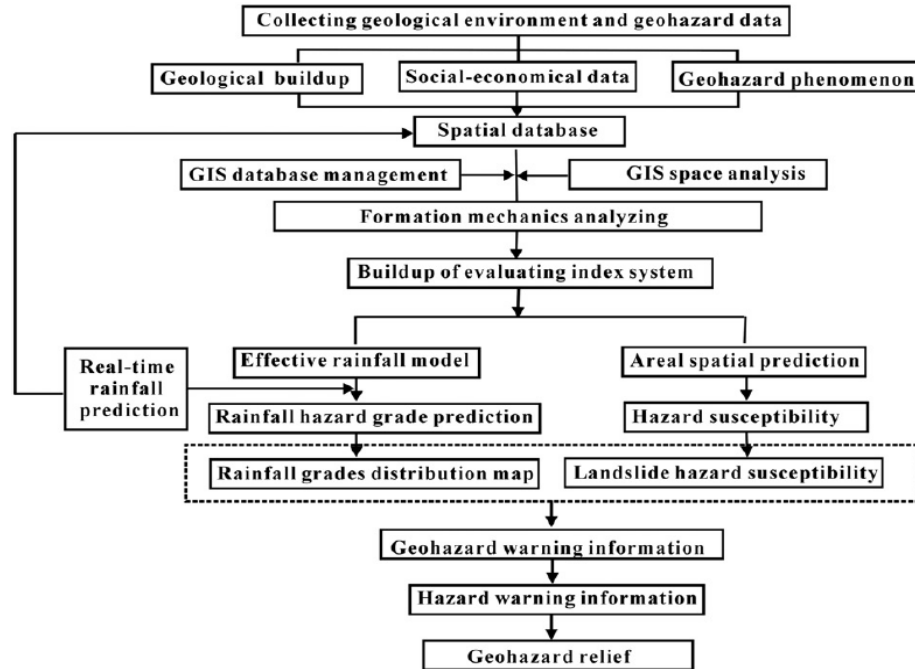


Figura B-5. Diagrama de flujo del Sistema de Predicción de la Amenaza por PRM

Fuente: Tomado de Wu (2005)

B.11. Aplicación de Sensores Remotos y SIG

La extracción de información espacial relevante que se relaciona con la ocurrencia de movimientos en masa es una parte integral de la evaluación de la amenaza. Los datos de Sensores Remotos combinados con Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser herramientas eficaces para generar y procesar información espacial. El avance en las técnicas de observación terrestre facilitan la detección, Cartografía y Monitoreo eficaz de movimientos en masa, así como el análisis de la amenaza (Tofani et al. 2013).

La revisión de pocos estudios realizados sobre evaluación de la amenaza por deslizamientos a partir de datos de sensores remotos indican que las fotografías aéreas son ampliamente utilizadas en la detección y cartografía de movimientos en masa (Galli et al. 2008; Guzzetti et al. 2003; Yeon et al. 2010; Rotigliano et al. 2011; Guzzetti et al. 2005a; Rowbotham y Dudycha 1998; Pradhan y Lee 2009; Panikkar y Subramaniyan 1997; Miller y Burnett 2007; Ayalew y Yamagishi 2005; Chau et al. 2004; Clerici et al. 2002). La buena calidad de las fotografías aéreas ayuda en la detección precisa y cartografía de los deslizamientos, sin embargo, estas mismas fotografías no podrán ser utilizadas en el monitoreo continuo de estos movimientos.

Tofani et al. (2013) han estudiado los recientes desarrollos que se han dado en la aplicación de datos satelitales de sensores remotos en estudios de movimientos en masa en Europa y han encontrado que el 70% del total de estas aplicaciones están enfocadas hacia la detección, cartografía y monitoreo de deslizamientos, pues los datos de satélite de alta resolución están siendo utilizados de manera efectiva (Gómez et al. 2000; Saraf et al. 2009; Akbar y Ha 2011; Naithani 2007; Nagarajan et al. 2000; Ma et al. 2013; Mondal y Maiti 2012; Balsubramani y Kumaraswamy 2013; Chand 2008).



El uso del modelo de elevación digital (DEM) es de gran importancia en la evaluación de la amenaza por deslizamientos, pues de un DEM con buena resolución se pueden extraer varias capas temáticas de datos como el ángulo y aspecto de la pendiente, curvatura, lineamientos, drenaje, rugosidades, etc. En tiempo reciente los estudios de zonificación de la amenaza por deslizamientos han utilizado DEM de alta resolución para generar capas de datos de información espacial relacionada con la amenaza a estos movimientos (Gómez et al. 2000; Saraf et al. 2009; Dahl et al. 2010; Yeon et al. 2010; Akbar y Ha 2011; Naithani 2007; Jaiswal et al. 2010b; Rotigliano et al. 2011; Nagarajan et al. 2000; Guzzetti et al. 2005b; Rowbotham y Dudycha 1998; Barla et al. 2010; Leroi 1996; Miller y Burnett 2007; Ma et al. 2013; Ayalew y Yamagishi 2005; Balsubramani y Kumaraswamy 2013; Ghosh et al. 2009; Calvello et al. 2013; Tolga et al. 2005; Clerici et al. 2002; Coe et al. 2004; Jelinek y Wagner 2007; Chand 2008; Ruff y Czurda 2008).

Unos pocos estudios también utilizaron técnicas de interferometría de radar tipo DInSAR y PSInSAR, para evaluar la amenaza por deslizamientos (Barla et al. 2010; Catani et al. 2005). Se aclara que los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) son sistemas de radares coherentes que generan imágenes de alta resolución; una apertura sintética o antena virtual consiste en un extenso arreglo de señales de radar sucesivas y coherentes que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. La interferometría SAR (InSAR) es una técnica geodésica establecida, basada en la combinación de dos imágenes SAR de la misma escena, adquiridas desde puntos ligeramente diferentes (Sarychikhina et al. 2011). La técnica de InSAR diferencial clásica (DInSAR) o e Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética es el proceso de modelado y cancelación de la contribución de fase interferométrica debido a la topografía y de la geometría de adquisición, en este caso para el estudio de los deslizamientos usando la interferometría radar. La técnica de Dispersión Permanente de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (PSInSAR) es más avanzada y se usa en el apilamiento de múltiples interferogramas.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son ampliamente utilizados en la evaluación de la amenaza por deslizamientos, especialmente por la generación de capas temáticas de datos, cálculo de diferentes índices, asignación de pesos, integración de datos y generación de mapas de zonificación de susceptibilidad. En tiempo reciente se han utilizado algunos métodos para zonificar la susceptibilidad por deslizamientos a través de un entorno SIG, con el propósito de predecir la probabilidad de estos movimientos. Entre estos métodos están las redes neuronales artificiales, modelo de árbol de decisión, superposición ponderada, proceso analítico jerárquico, enfoque multicriterio para la toma de decisiones, modelo de información de valor y modelos de base física para evaluar la amenaza a los movimientos en masa (Chang y Liu 2004; Saraf et al. 2009; Yeon et al. 2010; Pradhan y Lee 2009; Kavzoglu et al. 2013; Akgun 2011; Ayalew et al. 2005; Mondal y Maiti 2012; Ma et al. 2013).

En el estudio de Jian y Xiang-guo (2009) se destaca la utilidad de los datos temporales de sensores remotos y del análisis, integración y recolección de conocimiento basado en un entorno SIG; se muestran aspectos importantes como la modelación de la zonificación de la amenaza por deslizamientos integrada con datos de sensores remotos, datos de monitoreo con GPS y datos tradicionales de la geología en el condado de Wan, China en el área de las tres gargantas. Se utilizó un sistema de ponderación aplicado en la realización de la zonificación, que se basa en la importancia relativa de varios factores causales derivados del conocimiento de campo. Inicialmente todas las capas fueron divididas en células de 25 m de resolución, cada célula se le asignó una calificación



especifica (entre 0 y 9) generando una capa raster. Posteriormente, un número de ponderación (entre 0 y 9) de acuerdo con la importancia relativa de los diferentes factores es asignado a capas diferentes. Entonces el Índice de Amenaza por Deslizamientos (LHI) está dado por la siguiente expresión:

$$LHI = \sum \text{numero de ponderación} \times \text{numero de calificación de la capa} \quad [2]$$

Finalmente, el mapa de zonificación de la amenaza por deslizamientos se obtiene mediante la segmentación del histograma del mapa de índices de amenaza por deslizamientos. La metodología para este procedimiento se muestra sistemáticamente en la figura B-6.

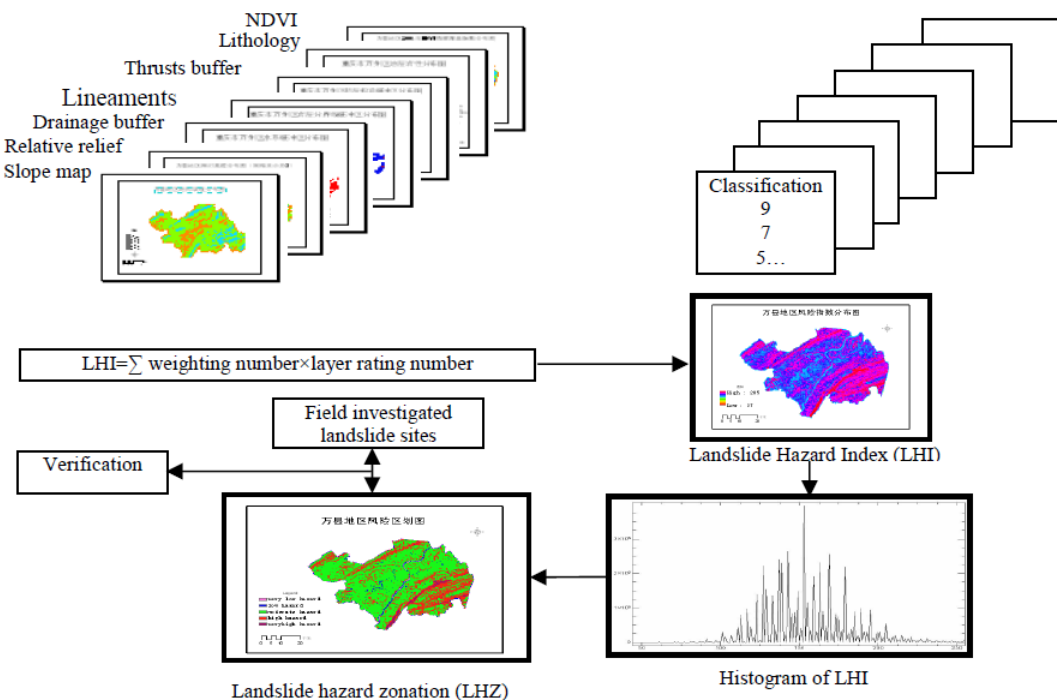


Figura B-6. Cálculo del índice de amenaza por deslizamientos (LHI) basado en SIG y Esquema de la zonificación de la amenaza por deslizamientos

Fuente: Tomado de Jian y Xiang-guo (2009)



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS - ANEXO B

Basogain Olabe, Xabier. (1998). *Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones*. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU. Publicaciones de la Escuela de Ingenieros.

Baum, R. L., Savage W. Z., Godt, W. (2002). TRIGRS-a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. Open file report 02-424 USGS.

Godschalk, D. R., Brody, S. and Burby, R. (2003). Public Participation in Natural Hazard Mitigation Policy Formation: Challenges for Comprehensive Planning, *Journal of Environmental Planning and Management* 46 (5). pp. 733-754.

Marjanovic, M. and J. Caha. (2011). Fuzzy Approach to Landslide Susceptibility Zonation. *Proceedings of the Annual International Workshop on Databases, Texts, Specifications and Objects (DATESO 2011)*, 20. April, Písek, Czech Republic, pp. 181-195, ISBN: 978-80-248-2391-1.

Millan J.A., Vesga, L. (1998). *Inventario de Procesos de Remoción en Masa en los Estudios de Amenaza y Riesgo en Santafé de Bogotá - Colombia*. Bogotá: INGEOCIM Ltda.

Oštir, K. and T. Veljanovski. (2003). Application of Satellite Remote Sensing in Natural Hazard Management: The Mount Mangart Landslide Case Study, *International Journal of Remote Sensing*. 20. pp. 3983-4002.

Pardeshi, S. D., S. E. Autade and S. S. Pardeshi. (2013). *Landslide Hazard Assessment: Recent Trends and Techniques*. SpringerPlus 2013, 2:523 (17 October 2013). Disponible en <http://www.springerplus.com/content/2/1/523>.

Poonam, S. Prakash T. and P. K. Shukla. (2012). Uncertainty Handling using Fuzzy Logic in Rule Based Systems. *International Journal of Advanced Science and Technology* Vol. 45, August, 2012.

Pradhan, B. (2010). Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Vol.3, No. 3 (September, 2010), pp. 370-381.

Romero, V., Patiño, M., González, S. (2014). *Aplicación del Método de Pesos de Evidencia para la Zonificación de Áreas Susceptibles a Fenómenos de Remoción en Masa en el Municipio de Sutatenza, Boyacá*. Presentación Prezi Online.

Rossi, G., Catani, F., Leoni, L., Segoni, S. and Tofani, V. (2013). HIRESSES: a physically based slope stability simulator for HPC applications. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 13, 151–166 (25 January 2013).

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez F., Mellors, R. y Ramírez, J. (2011). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 63, número 1, pp. 1-13.

Schernthanner, H. (2007). *Fuzzy Logic Method for Landslide Susceptibility Mapping, "Rio Blanco"*, Nicaragua. University of Potsdam, Institute of Geography, GIS department.

Varnes, D. J. and the International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements, IAEG. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Natural Hazards, Vol. 3, Paris, France. UNESCO, 63p.



Wang Jian and Peng Xiang-guo (2009). GIS-based landslide hazard zonation model and its application, *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, pp. 1198-1204.

Wu, Y.P. (2005). The Research of Landslide Hazard Monitoring and Prediction System Based on GIS [R], Postdoctoral Research Report of The Chinese Academy of Sciences. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan (in Chinese).

Wu, Y.P., L. Chenb, C. Cheng, K. Yin, Á. Török. (2014). GIS-based landslide hazard predicting system and its real-time test during a typhoon, Zhejiang Province, Southeast China. *Engineering Geology* 175. pp 9–21.

Yegnanarayana, B. (2009). *Artificial Neural Networks*. PHI Learning Pvt. Ltd. Chapter 1. Basics of Artificial Neural Networks. pp. 30.