

**SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE LA REVEGETALIZACION,  
DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL Y ESTRUCTURAS ANCLADAS EN  
LA ESCARPA NOROCCIDENTAL DE LA MESETA DE BUCARAMANGA**

**JULIÁN ANDRÉS SERRANO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2017**

**SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE LA REVEGETALIZACION,  
DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL Y ESTRUCTURAS ANCLADAS EN  
LA ESCARPA NOROCCIDENTAL DE LA MESETA DE BUCARAMANGA**

**JULIÁN ANDRÉS SERRANO GÓMEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Maestría en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**DIEGO ALEJANDRO GUZMÁN ARIAS**

**Ingeniero Civil M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2017**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>23</b>
1.2.1 General .....	23
1.2.2 Específicos.....	23
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>24</b>
<b>2. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES Y EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 Aporte de la información al proyecto.....	32
2.1.2 Análisis de la información secundaria .....	35
<b>2.2 MARCO LEGAL .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>39</b>
2.3.1 Nomenclatura de los movimientos .....	39
2.3.2 Deslizamiento Rotacional .....	46
2.3.3 Factores que afectan el comportamiento de una ladera .....	47
2.3.4 Efecto del agua en la estabilidad de laderas .....	52
2.3.5 El ciclo hidrológico .....	54
2.3.6 El flujo subterráneo .....	56
2.3.7 La infiltración .....	56
2.3.8 Cambios hidrogeológicos urbanos .....	59
2.3.9 Manejo inadecuado de aguas lluvias y residuales .....	60

2.3.10 La vegetación y los deslizamientos .....	61
2.3.11 Diseño de revegetalización .....	67
2.3.12 Método de análisis “equilibrio límite y factor de seguridad” .....	71
2.3.13 Limitaciones de los métodos de equilibrio límite .....	80
2.3.14 Consideraciones de Diseño .....	81
2.3.15 Modelo y software utilizado .....	81
2.3.16 Métodos de análisis .....	82
2.3.17 Superficies de Falla .....	83
2.3.18 Aceleración pseudo estática para el diseño de estabilidad de taludes en condiciones pseudo estáticas .....	83
2.3.19 Hidrogeología .....	84
2.3.20 Cargas modeladas. ....	84
2.3.21 Categorización de la amenaza .....	84
<b>3. GENERALIDADES .....</b>	<b>88</b>
<b>3.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....</b>	<b>88</b>
<b>3.2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>90</b>
<b>3.3 MARCO GEOLÓGICO.....</b>	<b>92</b>
3.3.1 Formación Bucaramanga. ....	92
<b>3.4 MARCO GEOTECTÓNICO.....</b>	<b>102</b>
3.4.1 Marco geológico y tectónico del Departamento de Santander .....	104
<b>3.5 GEOMORFOLOGÍA .....</b>	<b>108</b>
3.5.1 Morfodinámica .....	109
<b>3.6 EVALUACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>110</b>
3.6.1 Descripción general .....	110
3.6.2 Climatología .....	112
3.6.3 Precipitación .....	112
3.6.4 Temperatura .....	113
3.6.5 Humedad relativa .....	114
3.6.6 Brillo solar .....	115

3.6.7	Parámetros geomorfológicos del área de estudio .....	116
3.6.8	CÁLCULO DE CAUDALES .....	131
<b>3.7</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA. ....</b>	<b>139</b>
3.7.1	Metodología .....	139
3.7.2	Exploración geotécnica (mecánica) .....	141
3.7.3	Estudio Geofísico .....	145
<b>3.8</b>	<b>SISMOLOGÍA .....</b>	<b>148</b>
3.8.1	Amenaza sísmica según la Norma NSR-10. ....	148
3.8.2	Amenaza sísmico según la Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga de 2001.....	156
3.8.3	Resultado de la sismología de acuerdo a la NSR-10 y la microzonificación sísmica de Bucaramanga de 2001. ....	157
<b>3.9</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA .....</b>	<b>159</b>
3.9.1	Hidrografía .....	160
3.9.2	Análisis Hidrológico .....	164
3.9.3	Análisis de infiltración. ....	171
3.9.4	ANÁLISIS DE PIEZÓMETROS DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	175
3.9.5	Relación entre lluvias y niveles freáticos .....	185
3.9.6	Análisis de deslizamientos .....	186
3.9.7	Relación de lluvias – Deslizamientos .....	188
3.9.8	Afectación de la zona por problemas de agua .....	188
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>190</b>
<b>4.1</b>	<b>ANÁLISIS GEOLÓGICO .....</b>	<b>190</b>
4.1.1	Unidades geológicas superficiales (UGS) .....	190
4.1.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	198
4.1.3	GEOMORFOLOGÍA .....	200
<b>4.2</b>	<b>COBERTURA DEL SUELO.....</b>	<b>212</b>
<b>4.3</b>	<b>ANÁLISIS GEOTÉCNICO .....</b>	<b>219</b>
4.3.1	Exploración geotécnica .....	219

4.3.2	Ensayos de laboratorio .....	220
4.3.3	Ensayos de clasificación .....	227
4.3.4	Ensayos de resistencia (corte directo) .....	234
<b>4.4</b>	<b>ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO.....</b>	<b>241</b>
4.4.1	Caudales aferentes .....	241
4.4.2	Análisis hidrogeológico del flujo. ....	242
<b>4.5</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA .....</b>	<b>255</b>
4.5.1	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 0: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos promedio. ....	268
4.5.2	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 1: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos máximos de piezómetros. ....	269
4.5.3	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 2: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático. ....	270
4.5.4	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 3: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y con obras de prevención y mitigación, mediante el uso de revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal .....	272
4.5.5	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 4: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático sin obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal). ....	274
4.5.6	Análisis de estabilidad geotécnica escenario 5: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal) .....	276
4.5.7	Material Coluvial .....	278
4.5.8	Ladera alta. ....	279
4.5.9	Ladera baja .....	280
<b>4.6</b>	<b>OBRAS GEOTÉCNICAS PROPUESTAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....</b>	<b>281</b>
4.6.1	Revegetalización con pasto vetiver o geomanto permanente .....	281
4.6.2	Canaletas flexibles en sacos de suelo cemento .....	287

4.6.3	Canaletas disipadoras en concreto reforzado .....	289
4.6.4	Baterías de drenes de penetración horizontal .....	290
4.6.5	Filtros en material granular .....	291
4.6.6	Pantalla anclada flexible .....	293
4.6.7	Movimiento de tierra.....	295
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>298</b>
	BIBLIOGRAFÍA .....	304

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Marco Normativo.....	38
Tabla 2. Factores de seguridad básicos mínimos directos.....	85
Tabla 3. Factores de seguridad básicos mínimos directos.....	86
Tabla 4. Escenarios críticos de modelamiento.....	87
Tabla 5. Datos Meteorológicos Bucaramanga – Medias Mensuales Estación Palonegro	112
Tabla 6. Precipitación Media Mensual Estación UIS.....	113
Tabla 7. Información básica franjas de escorrentía intermitentes.....	117
Tabla 8. Áreas Aferentes de Escorrentía delimitadas.....	118
Tabla 9. Evaluación del Coeficiente de Gravelius.....	120
Tabla 10. Parámetros geomorfológicos básicos.....	121
Tabla 11. Coeficientes de la Curva IDF Sintética.....	129
Tabla 12. Resumen de información meteorológica básica.....	129
Tabla 13. Datos para las curvas IDF de la Estación UIS.....	130
Tabla 14. Coeficientes de escorrentía recomendados.....	135
Tabla 15. Periodos de retorno en obras de drenaje.....	138
Tabla 16. Localización de sondeos Exploratorios.....	141
Tabla 17. NSR-10 Tabla A.2.3-1.....	149
Tabla 18. Clasificación de los perfiles de suelos, título A de la NSR-10, tabla A.2.4-1...	152
Tabla 19. Tipo de suelo de acuerdo al título A de la NSR-10, tabla A.2.4-1 y valores de Fa y Fv de las tablas A.2.4-3 y A.2.4-4.....	152
Tabla 20. Valores de coeficiente de Importancia I (NSR-10).....	153
Tabla 21. Valores de Kst/amax mínimos para análisis pseudoestáticos en taludes.....	158
Tabla 24. Velocidad de Frente Húmedo.....	169
Tabla 25: Espesores de Frente Húmedo.....	170
Tabla 26. Números de Curva para los usos Potenciales.....	172
Tabla 27. Cálculo del ascenso máximo del nivel freático (SCS).....	173

Tabla 28. Piezómetros zona Transición. ....	178
Tabla 29. Piezómetro Zona Meseta de Bucaramanga .....	178
Tabla 28. Leyenda de unidades geomorfológicas .....	211
Tabla 29. Ensayos de Laboratorio Realizados a las Muestras Obtenidas en Campo.....	221
Tabla 30. Ensayos de Laboratorio Sondeo 1. ....	222
Tabla 31. Ensayo de Percolación .....	222
Tabla 32. Ensayos de corte directo para los apiques .....	223
Tabla 33. Tiempos de concentración para cada área aferente.....	241
Tabla 34. Caudales para diferentes periodos de retorno.....	241
Tabla 35. Resultados de los ensayos de percolación .....	244
Tabla 36. Resultados de factores de seguridad para el escenario 2 .....	258
Tabla 37. Factores de seguridad obtenidos escenarios 0 al 5.....	266
Tabla 38. Influencia del nivel freático en los factores de seguridad.....	278

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Deslizamiento sobre zona poblada .....	41
Figura 2. Talud y ladera .....	42
Figura 3. Partes de un deslizamiento .....	44
Figura 4. Dimensiones de los movimientos en masa IAEG Commission on Landslides (1990) .....	46
Figura 5. Deslizamiento en suelos blandos .....	47
Figura 6 Esquema de precipitacion e infiltración Infiltracion .....	48
Figura 7. Infiltración del agua en laderas .....	53
Figura 8. Ciclo hidrológico .....	55
Figura 9. Ecuación de Green y Ampt 1911 .....	57
Figura 10. Infiltración y escorrentía de acuerdo a la curva de Horton .....	58
Figura 11. Distribución de presiones en función de la permeabilidad de los materiales (Vargas y otros 1990) .....	59
Figura 12. Refuerzo de taludes con vegetación .....	61
Figura 13. Estructura Vetiver .....	68
Figura 14. Método de equilibrio límite .....	72
Figura 15. Métodos de análisis de estabilidad de taludes .....	74
Figura 16. Continuación .....	75
Figura 17 Tajadas en una ladera y Diagramas de fuerzas analizadas pro Bishop .....	77
Figura 18. Método de Fellenius .....	78
Figura 19. Método Jambu .....	79
Figura 20. Método Spencer .....	79
Figura 21. Método Morgenstern and Price .....	80
Figura 22. Ubicación general del área de estudio del Proyecto a nivel general .....	88
Figura 23. Ubicación detallada área de estudio .....	89
Figura 24. Metodología del estudio geotécnico .....	91

Figura 25. Miembro Órganos sobre la vía a Girón .....	96
Figura 26. Miembro “Finos” sobre la vía al Norte .....	98
Figura 27. Limos rojos y miembro Gravoso.....	100
Figura 28. Esquema general de la formación Bucaramanga.....	101
Figura 29. Espesores promedios de los miembros de la formación Bucaramanga. ....	101
Figura 30. Miembros de la formación Bucaramanga.....	102
Figura 31. Bloque Norandino en la esquina septentrional de Suramérica y su compleja interacción con las Placas Nazca, Caribe y Suramérica. ....	103
Figura 32. Esquema tectónico del Departamento de Santander. En el cuadro rojo se encuentra el área de estudio. ....	105
Figura 33. Esquema estructural del Departamento de Santander.....	106
Figura 34. Desvío del Río Suratá debido a la acción de la Falla de Bucaramanga. ....	108
Figura 35. Valores Medios Mensuales de Temperatura – Estación UIS.....	114
Figura 36. Humedad Relativa (%) Estación UIS – Media Mensual Multianual.....	115
Figura 37. Brillo Solar (horas/día) Estación UIS – Media Mensual Multianual .....	116
Figura 38. Áreas Aferentes de Escorrentía .....	117
Figura 39. Histograma Estaciones representativas – Precipitación Media Anual Porcentual .....	123
Figura 40. Polígonos de Thiessen para determinar la estación representativa en la zona de estudio .....	124
Figura 41. Precipitación Media Mensual Estación UIS.....	125
Figura 42. Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación UIS .....	126
Figura 43. Curvas IDF Estación UIS .....	131
Figura 44. Metodología general para la caracterización geotécnica.....	140
Figura 45. Ubicación sondeos.....	142
Figura 46. Registro del sondeo 1.....	144
Figura 47. Registro del Apique 1.....	145
Figura 48. Imagen satelital de Google Earth (2015) con Localización de las líneas de refracción sísmica (LRS), ubicación de las tomografías (T) y los sondeos eléctricos verticales (SEV).....	146
Figura 49. Imagen satelital de Google Earth (2015).....	147
Figura 50. NSR-10 Figura A.2.3-2 .....	149

Figura 51. NSR-10 figura A.2.3-3.....	150
Figura 52. Espectro de aceleraciones.....	154
Figura 53. Espectro de Aceleraciones .....	155
Figura 54. Zonificación Sismo-geotécnica del lugar de estudio de 2001 .....	156
Figura 55. Mapa de localización de las principales afluentes de drenaje del área metropolitana de Bucaramanga y su área de influencia (Cuenca superior rio Lebrija. ...	160
Figura 56. Localización del drenaje local de la zona de estudio.....	162
Figura 57. Esquema del modelo Hidrológico de Bucaramanga.....	165
Figura 58. Valores de porosidad, Humedad y grado de saturación, peso específico saturado, relación de vacíos y humedades.....	166
Figura 59. Resultados de la Percolación.....	167
Figura 60. Localización de piezómetros aferentes a la zona en estudio.....	176
Figura 61. Piezómetro SI-2. ....	179
Figura 62. Piezómetro SI-5. ....	180
Figura 63. Piezómetro SI-8. ....	180
Figura 64. Piezómetro SI-9. ....	181
Figura 65. Piezómetro SM-1. ....	181
Figura 66. Piezómetro SM-3. ....	182
Figura 67. Piezómetro SM-5. ....	182
Figura 68. Piezómetro SM-6. ....	183
Figura 69. Piezómetro SM-7. ....	183
Figura 70. Piezómetro SM-8. ....	184
Figura 71. Piezómetro SM-11. ....	184
Figura 72. Mecanismos de falla .....	187
Figura 73. Principales Formaciones geológicas presentes en la zona .....	191
Figura 74. Suelos del Miembro Órganos.....	192
Figura 75. Suelos del Miembro Gravoso.....	193
Figura 76. Suelos Limos Rojos, observados en la construcción del conjunto residencial cercano al sector conocido como “La Virgen” .....	194
Figura 77. Suelos Coluviales Presentes en la zona. a) Barrio la Independencia. b) Detalle de los depósitos observados en la Figura (a). c) Barrio Nueva Colombia. d) Barrio Bosque Norte.....	195

Figura 78. Unidades geológicas superficiales y Unidades geológicas superficiales en el área de estudio.....	196
Figura 79. Leyenda geológica del área de estudio.....	197
Figura 80. Ubicación de la zona de estudio en el área de afectación de la Falla del Suárez y Falla de Bucaramanga-Santa Marta.....	199
Figura 81. Superficie del abanico de Bucaramanga.....	201
Figura 82. Geoforma de Lomo Ancho.....	202
Figura 83. Geoforma de Laderas Subhorizontales.....	203
Figura 84. Geoforma de Escarpe denudacional.....	204
Figura 85. Laderas muy inclinadas.....	204
Figura 86. Laderas Moderadas.....	205
Figura 87. Escarpe de corona principal de Movimiento en Masa.....	206
Figura 88. Cuerpos o depósitos de movimiento en masa detectados en el área de estudio. a) Barrio La Independencia. b, c, d) Barrio Nueva Colombia.....	207
Figura 89. Vías presentes en el área de estudio las cuales se tomaron como parte de la Geoforma de Obras de ingeniería.....	208
Figura 90. Corte en la ladera media del miembro Gravoso, con fines de construcción de viviendas.....	209
Figura 91. Plano Geomorfológico.....	210
Figura 92. Construcciones Urbanas.....	213
Figura 93. Casas de Invasión, las cuales se toman en este trabajo como Construcciones Urbanas.....	213
Figura 94. Uso de Pastos y Árboles.....	214
Figura 95. Uso de Pastos Naturales.....	215
Figura 96. Uso del suelo de Rastrojos Bajos a) Asociación con Pa. b) usos cerca de cultivos y viviendas rurales.....	215
Figura 97. Cultivos presentes en la zona, ubicados en pequeñas áreas.....	216
Figura 98. Usos del Suelo de Suelos desnudos.....	217
Figura 99. Cobertura del suelo.....	217
Figura 100. Mapa de cobertura del suelo para el área de estudio a escala 1:2000.....	218
Figura 101. Exploración de campo registro sondeo 1.....	220
Figura 102. Resultados de granulometría (fracción Gruesa- Gravas).....	223

Figura 103. Resultados de granulometría (fracción Gruesa - Arenas).....	224
Figura 104. Resultados de granulometría (fracción Fina – limos y arcillas).....	224
Figura 105. Carta de plasticidad, barrios Bosque Norte, Independencia y Nueva Colombia .....	226
Figura 106. Resultado de los ensayos de clasificación para 75 muestras de suelos recolectadas .....	228
Figura 107. Análisis estadístico descriptivo para 5 muestras perteneciente al estrato de Limos Rojos (Sfl2). .....	235
Figura 108. Análisis estadístico descriptivo para 26 muestras perteneciente al estrato de Miembro Gravoso de la formación Bucaramanga (Sft2).....	236
Figura 109. Análisis estadístico descriptivo para 7 muestras perteneciente al estrato de Miembro Órganos Arenoso de la formación Bucaramanga (Sft3) .....	237
Figura 110. Análisis estadístico descriptivo para 10 muestras perteneciente al estrato de Miembro Órganos Arcilloso de la formación Bucaramanga (Sft3) .....	238
Figura 111. Análisis estadístico descriptivo para 6 muestras perteneciente al estrato de Coluviones (Sco) .....	239
Figura 112. Análisis estadístico descriptivo para 4 muestras perteneciente al estrato de Llenos Antrópicos (Sla).....	240
Figura 113. Perfil geológico geotécnico para modelo hidrogeológico.....	243
Figura 114. Modelamiento inicial, condiciones de frontera de acuerdo a los niveles descritos en los piezómetros máximas cotas piezometricas probables.....	246
Figura 115. Resumen análisis hidrogeológico para determinación del nivel freático .....	249
Figura 116. Modelo geológico geotécnico de estabilidad geotécnica escenario 2.....	256
Figura 117. Resultados de estabilidad geotécnica ladera alta para los escenarios 0 al 5 respectivamente .....	259
Figura 118. Resultados de estabilidad geotécnica del material coluvial para los escenarios 0 al 3 respectivamente.....	262
Figura 119. Resultados de estabilidad geotécnica de la ladra baja para los escenarios 0 al 5 respectivamente .....	264
Figura 120. Diagrama de siembra con gramíneas .....	284
Figura 121. Diagrama de siembra de pasto Vetiver .....	285
Figura 122. Diagrama de siembra geo manto permanente Terratrac TRM 50 o similar ..	286

Figura 123. Canaletas en suelo cemento.....	288
Figura 124. Detalle cuneta disipadora en concreto .....	290
Figura 125. Baterías de Drenes de Penetración horizontal .....	291
Figura 126. Sistema Geodren .....	292
Figura 127. Pantalla Anclada flexible con cubrimiento de malla y mortero .....	294
Figura 128. Obras geotécnicas en perfil .....	296
Figura 129. Conformación de la superficie.....	297

## RESUMEN

**TITULO:** SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE LA REVEGETALIZACIÓN, DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL Y ESTRUCTURAS ANCLADAS EN LA ESCARPA NOROCCIDENTAL DE LA MESETA DE BUCARAMANGA\*

**AUTOR:** JULIÁN ANDRÉS SERRANO GÓMEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Estabilidad, hidrogeología, revegetalización, obras geotécnicas, obras hidráulicas

En el presente proyecto se analizó la influencia de los niveles de escorrentía superficial y subterráneo, la revegetalización, y las medidas existentes para la realización de obras geotécnicas e hidráulicas de prevención y mitigación para la ladera Norte de la escarpa de Bucaramanga, tendientes a minimizar los niveles de inestabilidad de laderas, determinando y cuantificando la variación de los factores de seguridad ante deslizamiento (función de la estabilidad geotécnica de la ladera), al controlar ambientalmente un factor detonante como los niveles freáticos, por medio de la implementación de obras de revegetalización, canalizaciones superficiales y control de niveles freáticos. El principal objetivo del proyecto fue presentar cuales son las condiciones ambientales en función del nivel freático, la humedad del suelo y las obras proyectadas, necesarias para generar un sistema de revegetalización y arborización adecuado dentro del plan de obras. Aprovechando y controlando al máximo los flujos de infiltración para garantizar el establecimiento de la revegetalización, arborización y los ecosistemas asociados.

Se presenta cuáles son las condiciones ambientales óptimas para el establecimiento adecuado de la revegetalización y arborización de las obras ambientales planteadas, y cómo estas son función de la infiltración del flujo que es un factor negativo cuando se presenta la saturación del suelo, generando la inestabilidad de laderas, haciendo necesario establecer un equilibrio entre los controles de niveles freáticos y las condiciones óptimas para el establecimiento de la revegetalización y arborización propuestas como control de la erosión superficial.

---

\* Tesis de Maestría

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M.Sc. Diego Alejandro

## SUMMARY

**TITULO:** SYSTEMS OF STABILIZATION THROUGH REVEGETALIZATION, HORIZONTAL PENETRATION DRAWINGS AND ANCHORED STRUCTURES ON THE NORTH ESCARPMENT OF THE BUCARAMANGA PLATEAU\*.

**AUTOR:** JULIÁN SERRANO GÓMEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Stability, hydrogeology, revegetation, geotechnical works, hydraulic works

The present project analyzes the influence of the levels of surface runoff, groundwater, revegetation and existing measures for the prevention and mitigation works, tending to minimize the instability levels of slopes, determining and quantifying the reduction of The factors by controlling environmentally a detonating factor such as groundwater levels, through the implementation of revegetation works, surface canals and control of groundwater levels. The behavior of the slope will be determined, without controlling these environmental parameters and the result of the same, projecting the works of prevention and mitigation mentioned. The study area corresponds to a hillside located on the northern escarpment of the Bucaramanga plateau in the transition area and adjacent neighborhoods.

In order to carry out this project, the greatest amount of basic and thematic information was collected in the study area, as well as the existing regional, local and study points of the area analyzed. Field and laboratory work was also carried out to characterize the area. Geotechnical and hydrogeological model.

The influence of the stability of the slope will be presented, controlling the environmental detonation of the surface and underground flow, as well as revegetation systems as a factor for the control of flow infiltration and the control of surface erosion

---

\* Master's Thesis

\*\* Faculty of Physical Chemical. School of Chemical Engineering. Director: M.Sc. Diego Alejandro

## INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las obras de ingeniería, es necesario conocer como es el comportamiento del suelo ante sollicitaciones en las diferentes obras civiles. Estas sollicitaciones pueden ser de origen natural (terremotos, maremotos, inundaciones, deslizamientos etc) o antrópicas (vibraciones de maquinaria industrial de alto impacto, cargas dinámicas sobre impuestas en las obras civiles, cargas muertas) y pueden ser las causantes de daños estructurales a edificaciones, movimientos en masa en suelos y problemas geotécnicos en general. Debido a que toda obra civil debe contemplar los escenarios más críticos posibles, es necesario conocer la interacción del suelo con las estructuras. Esto se consigue identificando como son las fuerzas que interactúan con el comportamiento del suelo para cualquier condición crítica probable, garantizando los estados límites de servicio (hasta donde una estructura puede funcionar eficientemente o la inestabilidad de laderas) y los estados límites de falla (garantizar la funcionalidad de las estructuras para escenarios críticos o el control de deformaciones y erosión acelerada).

Para caracterizar el comportamiento del suelo y las rocas, sobre condiciones críticas probables y garantizar la integridad de las obras civiles, se desarrollaron los estudios de suelos y geotécnicos de estabilidad y amenaza. A partir de caracterización física de los suelos, se determinaron modelos matemáticos para predecir el comportamiento del suelo ante las cargas que lo solicitan. Esto, con el objetivo de identificar las medidas de prevención, mitigación y estabilización, óptimas para solucionar el problema geotécnico, teniendo en cuenta las condiciones más críticas de la estructura de suelo. Es muy importante, establecer los impactos ambientales para cualquier tipo de intervención, o para el control de áreas afectadas por procesos de erosión o fenómenos de remoción en masa. A continuación con el presente proyecto, se resalta la importancia de los controles ambientales de los

niveles de flujos de infiltración en las obras proyectadas para la estabilidad de la ladera en análisis, minimizando las afectaciones ambientales en el área de estudio.

Para la estandarización de los estudios geotécnicos, se ha desarrollado normas técnicas, donde se establecen los lineamientos mínimos para los estudios geotécnicos y ensayos de laboratorio de suelos. Las principales normas que definen los lineamientos para estudios geotécnicos y de laboratorios a nivel nacional son: la Norma Sismo resistente Colombiana NSR 10, las especificaciones técnicas y de laboratorio de INVIAS y localmente las normas geotécnicas de la CDMB por medio de la resolución 1294 de 2009 y las determinantes ambientales por medio de la resolución 1893 de 2010.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El crecimiento poblacional tiende a ser mayor a través del tiempo, creando la necesidad de expandir el municipio de una forma ordenada y planeada, mediante las oficinas y secretarías de planeación, y demás entes encargados de proyectar los planes de contingencia para la expansión del municipio, de acuerdo a planes de ordenamiento territorial, donde se deben realizar proyectos urbanísticos, destinados a suplir las necesidades de la población.

Puntualmente sobre el municipio de Bucaramanga, Santander, se identifica un terreno de origen Fluvio torrencial, que generó una meseta semiplana delimitada por escarpes de altas pendientes, restringiendo así las áreas libres de amenazas y riesgos por fenómenos de remoción en masa sobre las escarpas. ( Área Metropolitana de Bucaramanga, 2007).

De acuerdo a lo anterior, es necesario realizar un estudio detallado, donde se integren modelos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, hidráulicos, ambientales, geotécnicos que determinen un único modelo integro. Estos estudios deben proyectar obras de tipo geotécnicas, hidráulicas y ambientales que prevengan, mitiguen y estabilicen dichos escarpes, ya que se localizan barrios y asentamientos sobre la corona de los escarpes y en el cuerpo de las laderas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Evaluar la influencia ambiental de la infiltración del flujo de agua de escorrentía superficial, en el crecimiento y mantenimiento del sistema de revegetalización y demás ecosistemas asociados de los drenajes, con vetiver y arbolización, para el control de erosión y estabilidad geotécnica en una ladera ubicada sobre el escarpe Norte del Municipio de Bucaramanga, Santander, en el barrio Transición.

### **1.2.2 Específicos**

- Realizar el análisis hidrológico que establezca los parámetros básicos para el dimensionamiento de las obras hidráulicas necesarias para el adecuado manejo del agua de escorrentía y aguas subsuperficiales si es el caso, en el área de estudio.
- Efectuar el análisis hidrogeológico para identificar las condiciones del agua subsuperficial, a través de la posición del nivel freático (piezómetros existentes en Bucaramanga) y/o factores  $R_u$  (Relación de presión de poros/Esfuerzo total vertical).
- Realizar el análisis de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para los perfiles tipo en condiciones actuales, para ascenso máximo de nivel freático y aceleración pseudoestática y controlando los niveles superficiales, subterráneos y la revegetalización de las zonas, con el fin de evaluar la influencia de estos factores en la estabilidad de la ladera.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Para realizar la caracterización integral de los modelos geológicos geotécnicos, hay que tener en cuenta que en algunos casos puntuales como diseños de obras de mitigación y estabilización no se interrelacionan todas las áreas técnicas, dando como resultado modelos geológicos geotécnicos semi empíricos asumiendo las condiciones críticas, sin el sustento técnico necesario para la toma de decisiones coherentes al modelo presentado.

Sobre el escarpe Norte del municipio de Bucaramanga, se evidencia el afloramiento de 3 miembros de la formación Bucaramanga, encontrando los miembros Limos Rojos, Gravoso y Finos. Evidenciando la posibilidad de realizar un modelo geológico geotécnico, contemplando todas las áreas que aportan y/o reducen la estabilidad general de la ladera.

En el presente proyecto se evalúa la influencia de los niveles superficiales, freáticos y los sistemas de revegetalización en la estabilidad de la ladera, evaluando escenarios de modelación, con el fin de evaluar la influencia de estos parámetros ambientales en la estabilidad de la ladera analizada.

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 ANTECEDENTES Y EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE**

Para el correcto desarrollo de cartografías temáticas, y a nivel general de cualquier estudio y/o investigación, se debe desarrollar en primera medida una recopilación de información previa a partir de la consulta en diferentes bases de datos y archivos tales como libros, artículos científicos, reseñas, entre otros.

CDMB – Citu Experiencia Local: convenio de asociación CDMB-CEL para aunar esfuerzos en la investigación integral de la estructura político institucional urbano sostenible en los asentamientos y barrios precarios del área metropolitana de Bucaramanga (2012): Este documento desarrolló un modelo de observación cuyo eje central es comprender la problemática de asentamientos y barrio precarios en el área metropolitana de Bucaramanga.

El estudio generó un sistema de información geográfico mediante la observación de asentamientos y barrios precarios, así mismo se identificaron los factores y niveles de incidencia en el surgimiento y consolidación de los asentamientos y las acciones de una política pública, estableciendo procedimientos, motivaciones y dificultades en procesos de legalización o en el control y contención del crecimiento de cada uno de ellos.

Así mismo indica el papel desarrollado por cada una de las entidades prestadoras de servicios públicos, el derecho a la vida digna y su tensión con los modelos de desarrollo urbanísticos, así mismo la identificación de la incidencia de los actores políticos dentro de los procesos de consolidación de barrios precarios.

Al final en el sistema de información se incluyen y recopilan todas la variables y se consolidan en una hoja de vida por vivienda, allí mismo también se contempla la

situación de riesgo con base a los estudios desarrollados por el INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano y el área metropolitana de Bucaramanga.

**Evaluación de la Estabilidad, Prediseño de medidas correctivas y evaluación de Costos Del Sector La Independencia (Cdmb-2010):** Este estudio fue realizado para la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga por el consorcio M&CI en 2010, en el cual se efectuó la evaluación del el sector la independencia localizado entre las calles 3 y 5 con las carreras 21B y 22A, en este informa se observó la zonificación geológica del sector como formación Bucaramanga (Qb) compuesta por los miembros Gravoso (Sft2) y Órganos (Sft3) principalmente y algunos depósitos de coluvión activos e inactivos (Sco1 y Sco2). Así mismo se evidencia en las cuatro perforaciones de campo la existencia de material Areno-limoso con profundidades de 7.50 de coloración rojiza y después de esta profundidad se encuentra un material areno-arcilloso de color marrón con guijos y guijarros de arenisca blanca y gris en la parte alta de la corona del talud, en el pie del talud se presentan intercalaciones de materiales como se describe a continuación:

- La existencia de material areno limoso hasta una profundidad de 1.20 metros, con presencia de fragmentos rocosos y materia orgánica; de color marrón.
- Entre las profundidades de 1.20 metros y 3.60 metros se encontró material gravo-arenoso con guijas y guijarros de arenisca de color blanco, presentando un color marrón
- Entre las profundidades de 3.60 metros y 4.80 metros se encontró material areno arenoso con gránulos y guijas de arenisca, plástico, de color marrón amarillento.
- Entre las profundidades de 4.80 metros y 13.20 metros los materiales varían entre arcillo arenoso, arcillo limoso y gravoso, presentando guijas y guijarros de arenisca de colores entre blanco y gris. Presenta colores entre marrón y marrón amarillento.

- Entre las profundidades de 13.20 metros y 14.40 metros se presenta material areno arcilloso de color marrón, con partículas de fragmentos rocosos de colores blanco y verduzco.

- Y en el último segmento de la perforación se encontró material arcillo arenoso de color marrón, con guijarros de arenisca de color verduzco

Investigación geológica, geotécnica, diseño de obras de mitigación de la amenaza geotécnica, control de erosión, sistema de drenaje de aguas subterráneas y sistema de alcantarillado de la masa de suelo del barrio la transición, municipio de Bucaramanga (2014): Este estudio fue realizado para la alcaldía del municipio de Bucaramanga, por el Ingeniero Julián Andrés Serrano Gómez; el área del estudio se localiza en el sector contiguo al barrio La Independencia y nueva Colombia, el talud corresponde al pie del talud en donde se encuentra el barrio la independencia, allí se correlacionan las unidades de la formación Bucaramanga encontrando los miembros Gravoso (Sft2) y Órganos (Sft3) y también se evidencia la presencia de coluviones Sco2, las perforaciones de campo encontraron intercalaciones entre Arena limosa de color marrón con fragmentos de roca angular y sub-angular color amarillo con material gravoso redondeado embebido en matriz arcillo-limosa de color marrón, de la información dada se obtiene las siguientes propiedades de los estratos geotécnicos.

INGEOMINAS, 2009. “Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta”: Este es el estudio que presenta mayor detalle, el cual fue desarrollado en el área de interés, este cubrió un total de aprox. 5000 Ha. En el estudio se muestran cartografías geológicas, geomorfológicas, cobertura vegetal y uso del suelo a escala 1:5000, como también análisis de subsuelo y ensayos de laboratorio. También se desarrolla el inventario de movimientos en masa y se zonifica la amenaza a movimientos en masa mediante métodos semi-cuantitativos, donde se plantean obras de prevención, corrección o control de estos fenómenos.

Se encuentran otros estudios, los cuales son de manera más regional y/o se encuentran solamente referenciados en algunos artículos (No se han podido obtener algunos de estos en físico debido a su antigüedad o clasificación reservada).

A su vez en esta literatura, principalmente en INGEOMINAS, 2009, se presenta una cartografía y definición de unidades para las diferentes cartografías temáticas, las cuales fueron reasignadas por estos autores para el área metropolitana teniendo en cuenta las nomenclaturas cartográficas a nivel nacional e internacional. Con esto, ellos lograron crear una serie de unidades específicas que se ajustan al Área metropolitana a escala detallada (1:5000), las cuales serán usadas en los informes a desarrollar para el proyecto .

Colombia, Ministerio de Minas y Energía, INGEOMINAS-UIS: MEMORIA EXPLICATIVA DE LA INVESTIGACION GEOLOGICA E HIDROGEOLOGICA EN EL MACIZO DE SANTANDER (2007): Este estudio se realizó en un área de 134 km<sup>2</sup>, cuyo objeto se referencia en estudiar el macizo de Santander como zona de recarga para abastecer a la población de agua potable debido a las limitaciones que existen, en él se evalúa un balance hídrico a largo plazo. Se plantea finalmente un modelo conceptual de recarga y circulación de agua subterránea a través de la zona del Macizo de Santander, teniendo en cuenta la complejidad estructural de toda el área, la distribución litológica y la presencia de importantes espesores de roca meteorizada. Estos tres aspectos se constituyen como protagonistas del proceso de infiltración y flujo del agua en el Macizo de Santander. Para el presente estudio se contó con el uso del modelo de recarga y circulación del flujo para comparar con lo encontrado en cada sector en estudio.

**INGEOMINAS, Modelo Geológico - Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga (2004):** En este estudio se hace una recopilación de sondeos eléctricos verticales realizados por el INGEOMINAS en 2001 y 2002 mostrando un

modelo geo-eléctrico preliminar, que sirve como base para observar el comportamiento en las diferentes zonas en estudio.

**INGEOMINAS, Evaluación de agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander a escala 1:25000 (2002):** En este estudio a partir de análisis de inventarios de puntos de recolección de aguas en diferentes zonas del área metropolitana se encontraron diferentes tipos de acuíferos:

- Acuífero Órganos: Este acuífero fue captado por 13 pozos de los cuales 6 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran entre 3.2 a 37.5 m, encontrándose los niveles más profundos hacia la parte occidental del acuífero, es decir, hacia la escapa occidental de la ciudad de Bucaramanga. Este también fue captado por 6 aljibes de los cuales 5 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran a profundidades que fluctúan entre 0.1 a 19 m y al igual que sucede con los niveles estáticos medidos en los pozos, los niveles más profundos se encuentran hacia la parte occidental del acuífero.

- Acuífero Gravoso: Se encuentran 12 pozos de los cuales para 7 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran a profundidades que van de 2.65 a 22.2 m; al igual que para el acuífero Órganos los niveles más profundos están hacia la parte occidental del acuífero, es decir hacia la escapa occidental de la ciudad de Bucaramanga.

- Acuífero Terrazas y depósitos aluviales: Captado por 19 aljibes de los cuales 17 de ellos se le puede medir el nivel estático. Los niveles varían entre 0 y 9.2m, predominando los niveles someros.

- Acuífero depósitos coluviales: Los niveles estáticos oscilan entre 1.4 a 13.7 m. en cuatro aljibes se pudo medir el nivel estático y va de 0.9 a 2.2 m.

- Acuífero Macizo de Santander: Se encuentra entre los 1400 a 3370 m, siendo 1600-200 m el intervalo de altura más predominante.

- Acuífero Girón: Captado por 11 pozos de los cuales a 6 de ellos fue posible medirles el nivel estático, el cual fluctúa entre 0.4 y 9.5 m.

**INGEOMINAS, 2001. “Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga”:** Estudio desarrollado para el área metropolitana, con identificación de unidades litoestratigráficas, unidades geomorfológicas, exploración geofísica del subsuelo, caracterización geotécnica del subsuelo y zonificación geotécnica.

**INGEOMINAS. 1999. “Geología del departamento de Santander”:** Este es el mapa presentado para el departamento de Santander en 1999 por el INGEOMINAS, actualmente Servicio Geológico Colombiano, este se usa en un contexto regional debido a su escala.

**Manejo del riesgo por deslizamientos de fell & hardford (1997):** Fell (1994) y Fell & Hartford (1997) discuten sobre los diferentes factores a considerar en el riesgo y diferencian entre el riesgo específico (peligrosidad por vulnerabilidad de un determinado elemento) y el riesgo total (número esperable de muertes, personas heridas, daños a propiedades, etc.), coincidiendo con la idea de Varnes (1984) y UNDRO (1991).

También discuten sobre el nivel de riesgo aceptable (riesgo con el cual la sociedad está preparada para convivir: en el caso de personas podría aplicarse un valor de 10-3, mientras que en propiedades se podría aceptar un riesgo, en términos de probabilidad, de 10-2. Mejía-Navarro et al. (1994) y Mejía-Navarro & García (1996), desarrollan un algoritmo para evaluar la vulnerabilidad, que descomponen en un conjunto de componentes culturales y físicos, líneas de transporte y usos del suelo, donde:

## Vulnerabilidad

$$= \frac{(\text{densidad humana} \times A + \text{uso del suelo} \times B + \text{lineas de transporte} \times C)}{(A+B+C)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los parámetros A, B y C, son valores de pesos asignados a los diferentes elementos vulnerables, que pueden ser modificados en función de los criterios adoptados por expertos. Así, por ejemplo, asignan pesos altos a las áreas de alta densidad de población, a zonas próximas a líneas de comunicación o de transporte, o bien a zonas con construcciones de gran entidad. En el caso de las autopistas se incluye un corredor de 40 metros con el fin de protegerlas, ya que su mantenimiento es muy caro. Modificando estos pesos se pueden simular una serie de escenarios de vulnerabilidad o riesgo. El uso de los SIG y de los Sistemas de Toma de Decisiones, permite realizar dichas simulaciones en cortos espacios de tiempo.

Este método presenta un alto grado de subjetividad. En la asignación de pesos no se tienen en cuenta las características del propio deslizamiento, tampoco se explica cómo incorporar los resultados obtenidos a los mapas de riesgo, ni cómo se incorporan los distintos elementos considerados al análisis, ya que el valor de vulnerabilidad obtenido es un valor general para todo el conjunto de elementos considerados.

**CDMB - Gómez Sully. Relaciones entre niveles freáticos, precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes 1989:** Este estudio recopila información meteorológica, piezómetro e información de deslizamientos del área metropolitana de Bucaramanga con el fin de observar el comportamiento de los niveles freáticos con base en las precipitaciones y su influencia en la escarpa occidental en lo que corresponde a la ocurrencia de deslizamientos.

**IDEAM - CDMB “Información Meteorológica del área metropolitana de Bucaramanga”:** Esta información corresponde a los datos de precipitación

obtenidos en los diferentes sectores donde se realiza un monitoreo en el régimen de lluvias, entre las estaciones más importantes están, la estación del aeropuerto Palonegro, la estación de la UIS, la estación de la Flora, entre otras.

Julivert M, 1959. “Geología de la vertiente W del macizo de Santander en el sector de Bucaramanga”: Detalle de toda el área oeste del macizo de Santander hacia el área de Bucaramanga, donde se especifican los diferentes materiales Jurásicos, Cretácicos y Paleógenos/Neógenos vistos en áreas como Tona, Matanza, Suratá, California. A su vez se especifica todo el contexto tectónico del área, en donde la predominancia de fallas se da en un sentido N-S de tipo inverso, afectando rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas

Ward y Goldsmith. “Geología de los cuadrángulos H-12: Bucaramanga y H-13: Pamplona, Departamento de Santander. Memoria explicativa.”: Este proyecto abarca el análisis de los cuadrángulos H12 y H13, en donde se da énfasis a todas las estructuras presentes en el área, Fallas geológicas, pliegues, depresiones estructurales, y todo un detalle puntual de las Formaciones geológicas vistas a lo largo de esta gran área. Se da una recopilación breve y un detalle general sobre el material asociado a la Formación Bucaramanga, nombrando los estudios anteriormente descritos (De Porta, 1959 y Julivert 1959), como también otros datos por estos mismos autores.

### **2.1.1 Aporte de la información al proyecto**

Entre los aportes más relevante para la realización del proyecto se destacan:

- Contextualización Geológica Regional y Local, todos los estudios realizados por el INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC), los cuales son: Geología del departamento de Santander, zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y

Piedecuesta, geología de los cuadrángulos H-12: Bucaramanga y H-13: Pamplona, Departamento de Santander, memoria explicativa, la terraza de Bucaramanga.

Lo descrito en los anteriores documentos son las bases teóricas en la cuales se basa el equipo de Geología para predecir de una manera preliminar, lo que se espera encontrar en campo, cuando este realice su visita a cada zona en estudio, en estos documentos se hace una descripción textura pormenorizada de cada formación identificada, así mismo esta información preliminar, será la guía para el nombramiento e identificación de las unidades geológicas superficiales, es decir los geólogos utilizan como base la nomenclatura expresada en el documento, con el fin de generar una estandarización de la geología local encontrada, de tal forma que no genere confusión en su lectura.

- Identificación de la geología estructural: con base a los documentos anteriormente nombrados, se identifican las fallas geológicas que predominan, afectan o influyen en la zona en estudio, ya que su identificación se realiza de manera regional y en la mayoría de veces no se dimensionan localmente.

- Análisis sísmico: para ello se utiliza como base la NSR-10, Título A: REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE y el estudio de Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, así se identifican los coeficientes de amplificación sísmica  $A_a$  y  $A_{max}$  para un periodo  $T$  igual a cero, con el fin de aportar a la formulación del modelo geológico geotécnico, ya que no se presentan análisis sísmicos locales contemplados dentro del alcance de los estudios.

- Análisis y levantamiento geomorfológico: se basa en el estudio de Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta y La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga, este estudio se toma como base para identificar las geoformas presentes siguiendo la misma nomenclatura y descripción, es decir

que se realiza una identificación en campo de morfodinámica tomando como únicos parámetros los presentados en estos estudios.

- Análisis geotécnico: se basa en el estudio de INGEOMINAS-DAGMA, Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, de este se toma la metodología descrita dentro del informe en el capítulo de geotécnica, así mismo para la determinación de las propiedades de los estratos partiendo de las perforaciones y exploración mecánica efectuada, se obtiene la metodología de análisis y la presentación de la información y su descripción.

- Análisis hidrológico: este estudio, se basa en Información Meteorológica del área metropolitana de Bucaramanga, de los datos de precipitación se predicen caudales útiles para el diseño de obras y alternativas de mitigación de acuerdo a periodos de recurrencia de 10 a 500 años.

- Análisis hidrogeológico: para el análisis hidrogeológico se toman los términos y la teoría plantada en los informes de INGEOMINAS-UIS: MEMORIA EXPLICATIVA DE LA INVESTIGACION GEOLOGICA E HIDROGEOLOGICA EN EL MACIZO DE SANTANDER (2007), Modelo Geológico - Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga (2004), EVALUACION DE AGUA SUBTERRANEA EN EL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, SANTANDER A ESCALA 1:25000 y RELACIONES ENTRE NIVELES FREATICOS, PRECIPITACIONES Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES-1989, de allí y sobre todo del último estudio se obtiene parámetros de variabilidad de los niveles freáticos y el tipo de falla producida por efectos de acuíferos en la escarpa de la meseta, así mismo se puede plantear dentro del modelo tomando en cuenta esta información y los resultados de la exploración indirecta (Geofísica).

- Análisis de estabilidad: para este estudio, es primordial categorizar el análisis de remoción en masa con el fin de darle calidad de estable o inestable, por ello y recurriendo al análisis determinístico por factores de seguridad y basándose en los límites por factores de seguridad de la norma geotécnica de la CDMB, se generan

dichas categorías, de manera tal que a partir de lo indicado en la norma para los diferentes escenarios, se diseñan las obras de estabilización en caso de que sean necesarias.

### **2.1.2 Análisis de la información secundaria:**

La información secundaria recolectada se divide en varios temas:

a. Análisis geológico: Dentro de los documentos, se observa una serie de descripciones que se desarrollan de acuerdo a una cronología geológica, en la mayor parte de la zona de estudio, de acuerdo a todos los documentos de base geológica, se concluye que los depósitos geológicos pertenecen al periodo reciente conocido como cuaternario, allí se localizan los barrios de La Independencia, Bosque Norte y Nueva Colombia, en donde predomina la formación Bucaramanga (Qb) con sus miembros Limos Rojos (Qblr), Gravoso (Qbg) y Órganos (Qbo) además de las formaciones de depósito aluvial (Qal) y suelos coluviales recientes antiguos Sco1 y nuevos Sco2 dadas en las márgenes de los ríos y quebradas que componen la zona de estudio y que presentan características texturales correlacionadas con las observadas en campo, las cuales se basan en cortes realizados por construcción de vías y las huellas dejadas por el lecho de los ríos o por afloramiento naturales, aplicando también al corte vial que comunica a Bucaramanga con Matanza, todo lo anterior permitirá al equipo de geología la interpretación detallada y la correlación del levantamiento geológico cuando se esté ejecutando, así se corrobora la teoría organizada como información secundaria con lo encontrado en el campo.

b. Análisis Geológico estructural: este análisis hace referencia a las fallas y formas que presenta el relieve en forma de anticlinales o sinclinales, de acuerdo a los documentos de análisis, Bucaramanga es una zona de confluencia de fallas, entre las más importantes están el sistema de falla Bucaramanga – Santa Marta y la falla

del río Suárez, este tipo de fallas no se presenta directamente en toda la zona de estudio, pero sí influyen, por su cercanía, la falla Bucaramanga – Santa Marta, para el caso en estudio la predominancia de las fallas se justifica con la unión de estos, esto de una manera contribuye a la tectónica que existe en la zona y al denominado nido sísmico de Bucaramanga dentro del documento se describe las características más importantes de la falla.

c. Análisis Geomorfológico: para este análisis, la descripción se basa en geoformas principales, donde se utiliza la misma metodología y nomenclatura para la realización de cada estudio en particular, se analiza la zona de estudio en cuanto al origen del suelo y relieve, el cual puede ser Fluvial (F), denudacional (D) y antrópico (A), se detalla más aún ya que dentro del origen del relieve aparecen categorías propias y fácilmente identificables, de acuerdo al estudio de Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, así no existirá metodología ni nomenclatura diferente a la mostrada en este estudio para el análisis de cada sector.

d. Análisis sísmico: este estudio parte de la definición del tipo de suelos, elemento importante ya que este es el medio de propagación de la onda, es así que para su determinación, es necesario acudir al número de golpes promedio, dentro del apéndice A4 del título A de la NSR-10, se verifica algunas características propias de cada municipio apareciendo los índices de amplificación  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_d$  y  $A_e$ , además de la categoría de la amenaza sísmica (baja, mediana o alta), así mismo el estudio de zonificación sísmica da a conocer el  $A_{max}$  que ocurre cuando el periodo de la onda sísmica es cero, todo lo anterior es la base del el sismo de diseño nombrado por la NSR-10 en su título H como  $K_{st}$ , y es este valor el que se ingresa a un modelo geológico geotécnico para determinar la estabilidad de cada zona en estudio cuando se analiza de manera pseudo – estática.

e. Análisis de uso del suelo: dentro de cada estudio se realiza un análisis teniendo como base la metodología y nomenclatura dada por el INGEOMINAS, allí se

determina una serie de unidades que pueden ser consociaciones (Unidades conformadas por una o más clases, donde la clase dominante ocupa el 70% o más del área considerada) y asociaciones (Unidades con 2 o más clases, donde ninguna ocupa o alcanza el 70% del área delimitada), de esta forma se determina la composición de uso del suelo, cabe aclarar que en ningún momento este análisis no categorizará al suelo por uso comercial, es decir que el termino difiere al presentado dentro de los esquemas o planes de ordenamiento territorial.

f. Análisis Hidrológico: Este se fundamenta principalmente en los datos de precipitación recopilados de las estaciones meteorológicas del IDEAM y CDMB, en las cuales por medio de análisis estadísticos y mediante el uso de métodos convencionales conocidos y técnicamente aprobados, se estiman caudales o régimen de caudales útiles para determinar medidas de protección relacionadas con este tema en particular.

g. Determinación de factores de seguridad: esto es aplicable utilizando la categorización dada por la CDMB en las normas geotécnicas, en las cuales los límites estáticos estarán cuando el FS sea igual a 1.50 y para Pseudo- estáticos 1.20, categorizándose como deslizamiento crítico o alto aquellas condiciones en las cuales el FS sea inferior a 1.00, de acuerdo a esta evaluación se determinan medidas de mitigación, ya que según estos análisis, las propuestas de alternativas de mitigación puede ser aplicables desde sencillas obras superficiales hasta obras complejas de ingeniería.

## **2.2 MARCO LEGAL**

**Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1807 de 2014:** Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.

**Ministerio de Ambiente, Resolución 1907 de 2013:** Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas y Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

**Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ley 1523 de 2012:** Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Resolución 001294 del 29 de diciembre de 2009 “normas geotécnicas para el control de la erosión y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos” (2009): En esta norma se da la base o requerimiento para la realización de estudios detallados, allí se dan a conocer parámetros esenciales como la determinación de los niveles de detalle de la topografía, así mismo la forma como se debe realizar la evaluación de amenaza por métodos determinístico tomando los límites por factores de seguridad.

Tabla 1. Marco Normativo

NORMA	DESCRIPCIÓN
<b>Ley 1523 de 24 de Abril de 2012</b>	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.
<b>Decreto 019 de 2012 Artículo 189</b>	Decreto Anti trámites establece el artículo 189 que los procesos de revisión deben incorporar dentro de estudios técnicos la gestión del riesgo.
<b>Decreto 1469 de 2010.</b>	Por el cual se reglamentan las disposiciones sobre licencias urbanísticas, reconocimiento de edificaciones y legalización de asentamientos humanos.
<b>Decreto 926 de 2010 NSR-10</b>	Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismorresistentes.
<b>Decreto 4002 de 2004</b>	Establece la revisión de los Planes de ordenamiento territorial y establece las evaluaciones sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgo.

<b>Ley 388 de 1997</b>	Establece los mecanismos para que los entes territoriales organicen y gestionen el Uso de Suelo, permitiendo que los propietarios se ajusten a la función social de la propiedad y permitiendo el derecho constitucional a la vivienda , protección del medio ambiente y prevención de desastres, determina por tanto las políticas y mecanismos para evitar asentamientos en zonas de alto riesgo natural.
<b>Constitución Política, Artículo 80 señala que el Estado</b>	El Estado (entendido el conjunto de instituciones que conforman la administración pública) deberá “Prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados
<b>Ley 02 de 1991</b>	Modifica la Ley de Reforma Urbana y establece que los municipios deben levantar y mantener autorizados los inventarios de las zonas que presentan altos riesgos.
<b>Ley 09 de 1989 Ley de Reforma Urbana</b>	Define la responsabilidad de las autoridades municipales en materia de seguridad de los habitantes en las zonas urbanas ante los peligros naturales. Obligatoriedad para las oficinas de Planeación de levantar y mantener actualizado el inventario de zonas de alto riesgo por inundaciones y deslizamientos.
<b>Decreto 93 de 1998</b>	Se Adopta el Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres que define los objetivos, principios, estrategias y los programas de política general.
<b>Resolución 227 de 2006</b>	Por el cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C,
<b>Decreto 190 de 2004</b>	Zonas de amenaza Bogotá

Fuente: Autor

## 2.3 MARCO TEÓRICO

### 2.3.1 Nomenclatura de los movimientos

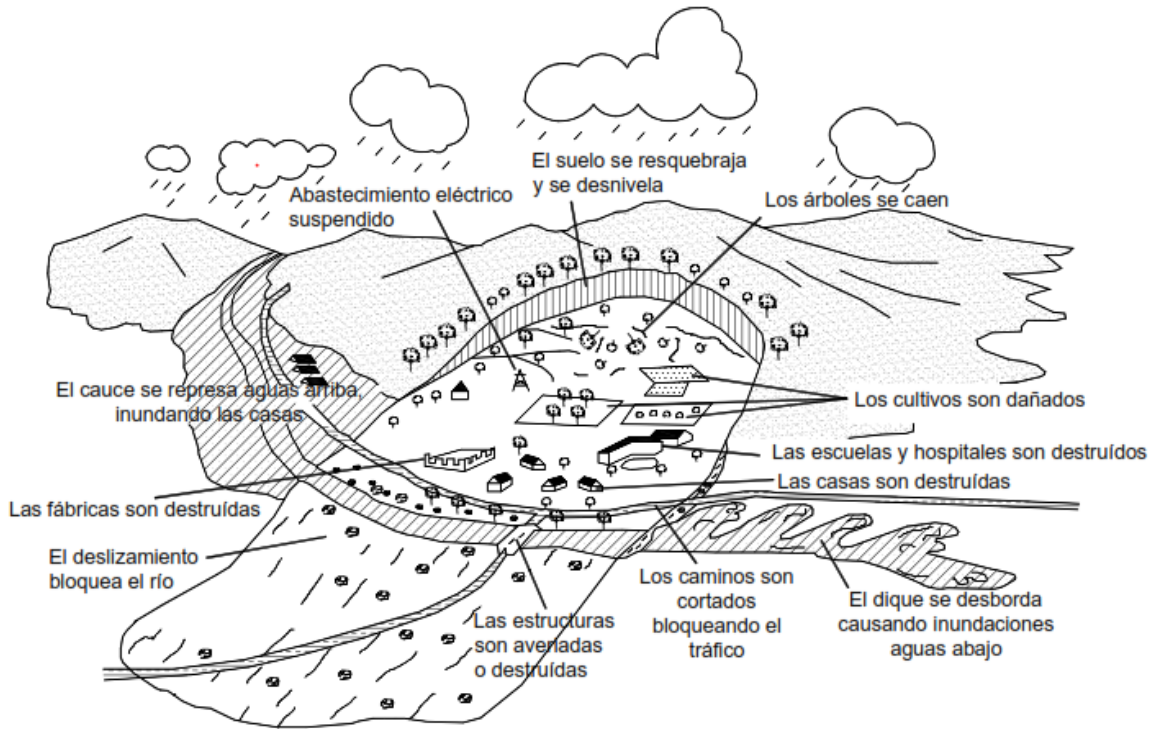
Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb y Hrod, 1989) Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, afectaciones ambientales diversas, daños en obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos etc. (Suárez, 2009).

El volumen de daño totales es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan medidas de prevención o control.

Los taludes y sus procesos son estudiados por una gran variedad de disciplinas del conocimiento tales como: La geología, la geomorfología, la geotécnica, las ciencias del suelo, la hidrología, las ciencias forestales, etc. Además muchas otras disciplinas tienen relación con los taludes y sus efectos o implicaciones: la arquitectura, la planeación urbana, la ingeniería en todas sus especialidades, la agricultura, el turismo, etc.

La nomenclatura más comúnmente utilizada en las ciencias geotécnicas, se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema de nomenclatura y clasificación más utilizado en el mundo. (Suárez, 2009).

Figura 1. Deslizamiento sobre zona poblada



Fuente: Suárez, 2009<sup>2</sup>

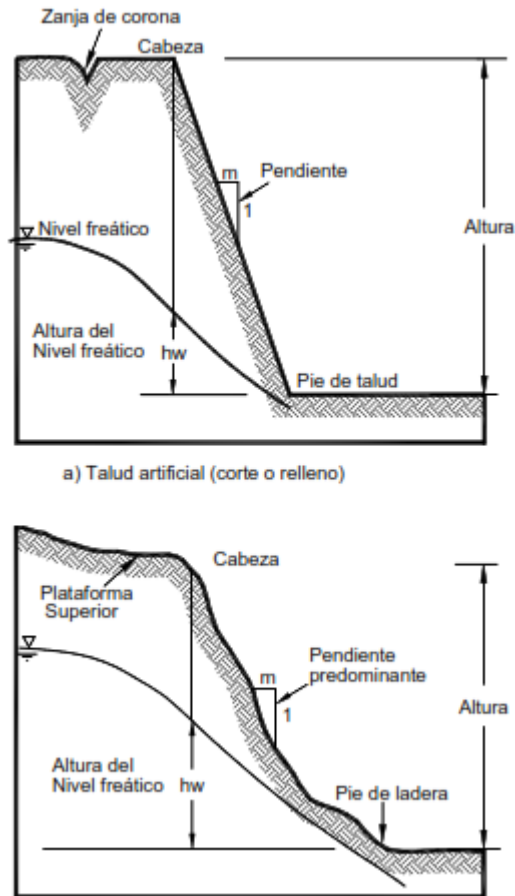
### 2.3.1.1 Talud y Ladera

Un “talud” es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. (Suárez, 2009).

---

<sup>2</sup> Suárez Díaz Jaime. Deslizamientos Análisis Geotécnico, UIS, 2009

Figura 2. Talud y ladera



Fuente: Suárez, 2009

### 2.3.1.2 Deslizamiento

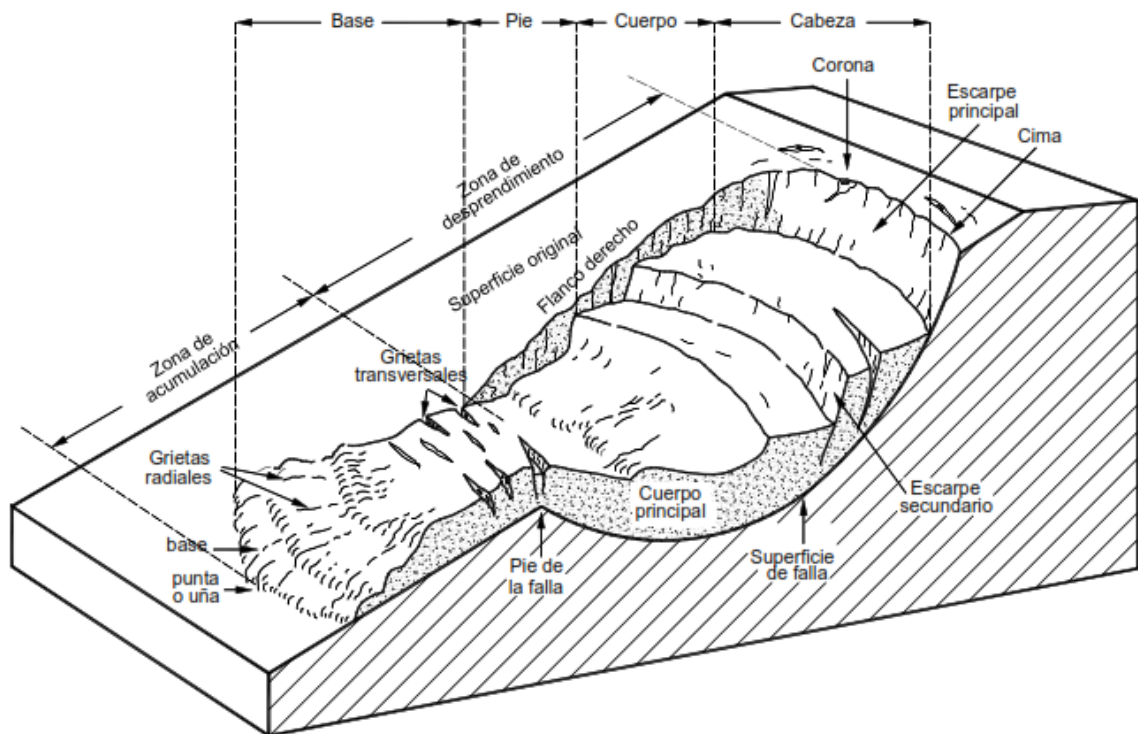
Los deslizamientos (“Landslides”) consisten en el “movimiento de masas de roca, residuos o tierra hacia abajo de un talud” (Cruden, 1991). En el término deslizamiento se incluyen tanto los procesos de erosión como los procesos denudacionales. La naturaleza precisa del proceso no está incluida en la definición e incluye procesos producto de la acción de fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc.

#### Partes de un deslizamiento:

- ✓ Cabeza: Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.
- ✓ Cima: El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el eskarpe principal se le denomina “cima”.
- ✓ Corona: El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta, arriba del eskarpe principal, por encima de la cabeza.
- ✓ Eskarpe principal: Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del eskarpe dentro del material conforma la superficie de falla.
- ✓ Eskarpe secundario: Superficie muy inclinada producida por desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.
- ✓ Superficie de falla: Área por debajo del movimiento, la cual delimita el volumen de material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de falla no se mueve, mientras el que encuentra por encima de esta se desplaza. En algunos tipos de movimientos no hay superficie de falla.
- ✓ Pie de la superficie de falla: La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- ✓ Base: El área cubierta por el material perturbado abajo del pié de la superficie de falla.

- ✓ Punta o uña: El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- ✓ Cuerpo principal del deslizamiento: El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Pueden presentarse varios cuerpos en movimiento.
- ✓ Superficie original del terreno. La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- ✓ Costado o flanco. Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo. (Suárez, 2009).

Figura 3. Partes de un deslizamiento



Fuente: Suárez, 2009

## Dimensiones de los movimientos

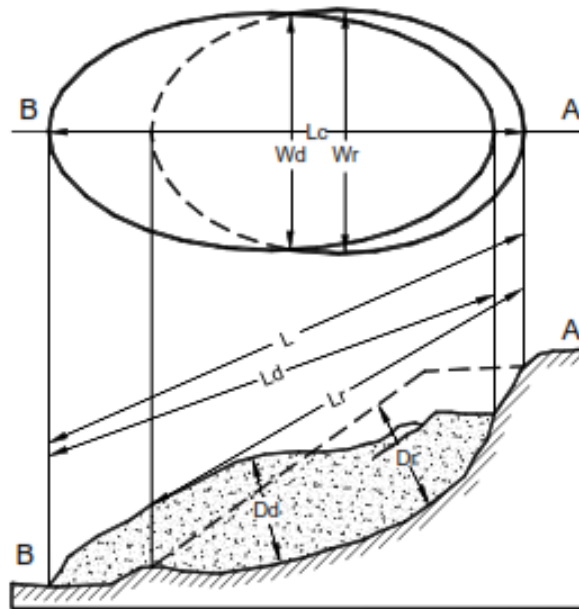
Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG:

- ✓ Ancho de la masa desplazada  $W_d$ : Ancho máximo de la masa desplazada perpendicular a la longitud  $L_d$ .
- ✓ Ancho de la superficie de falla  $W_r$ : Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud  $L_r$ .
- ✓ Longitud de la masa deslizada  $L_d$ : Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- ✓ Longitud de la superficie de falla  $L_r$ : Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- ✓ Profundidad de la masa desplazada  $D_d$ : Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por  $W_d$  y  $L_d$ .
- ✓ Profundidad de la superficie de falla  $D_r$ : Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por  $W_r$  y  $L_r$ .
- ✓ Longitud total  $L$ : Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- ✓ Longitud de la línea central  $L_c$ : Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

Igualmente, deben medirse la altura del nivel freático, alturas de escarpes, radios de rotación del movimiento, pendientes de la superficie antes y después de la falla.

En deslizamientos la escala horizontal debe ser igual a la vertical. Se recomienda que las dimensiones sean identificadas en planos en planta y perfil del deslizamiento. (Suárez, 2009).

Figura 4. Dimensiones de los movimientos en masa IAEG Commission on Landslides (1990).



Fuente: Suárez, 2009

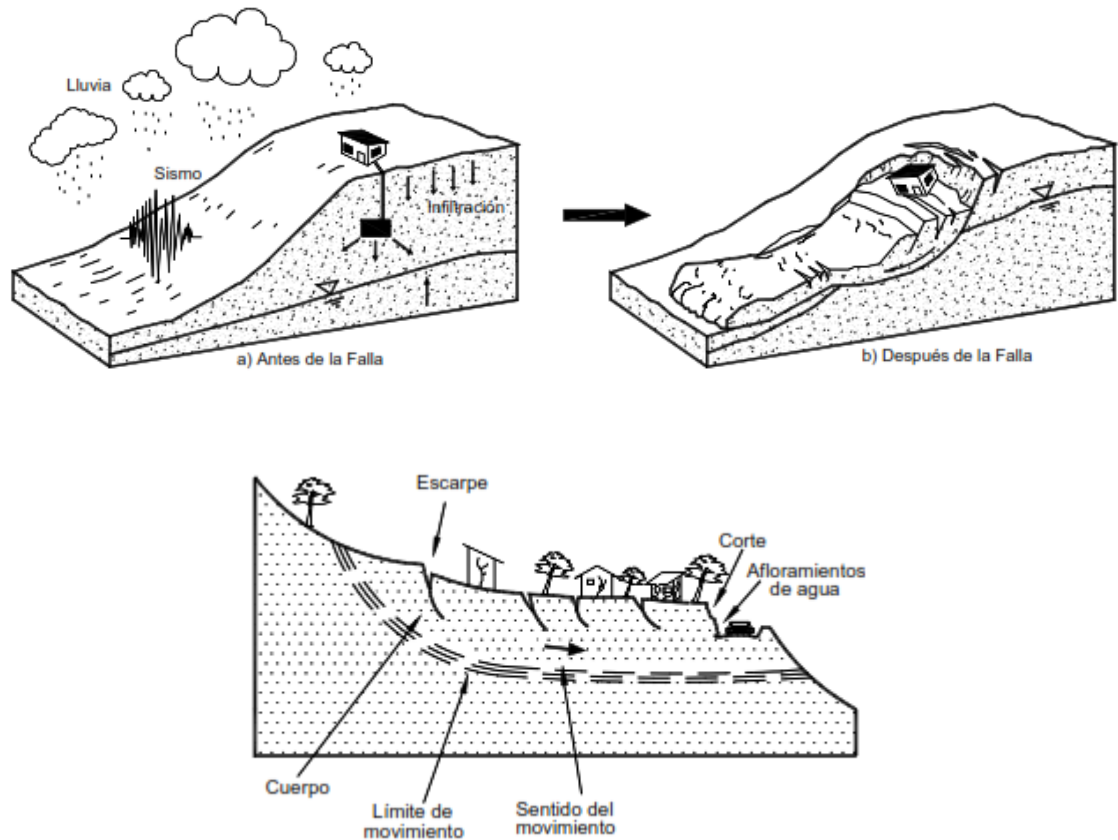
### 2.3.2 Deslizamiento Rotacional

En un desplazamiento rotacional la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto a un eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento. El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento.

El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, generándose comúnmente flujos de materiales por debajo del pie del

deslizamiento. La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan de forma diferente en la cabeza y en el pie del deslizamiento (Suárez, 2009).

Figura 5. Deslizamiento en suelos blandos



Fuente: Suárez, 2009

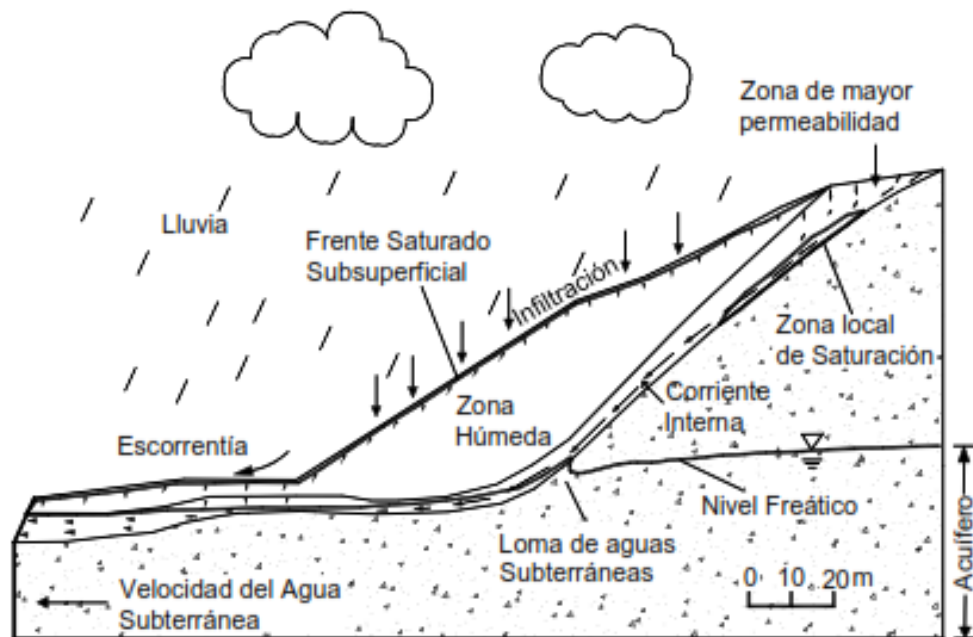
### 2.3.3 Factores que afectan el comportamiento de una ladera

Los procesos que ocurren en un talud son generalmente complejos y dependen de gran cantidad de factores, los cuales interactúan entre ellos para definir un comportamiento. A continuación se presenta una descripción de algunos de los factores fundamentales, que afectan la estabilidad de los taludes. (Suárez, 2009).

### 2.3.3.1 La Hidrogeología

Es muy importante para analizar la estabilidad de un talud, la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual. Este modelo debe tener en cuenta las zonas de infiltración arriba de los taludes, incluyendo la infiltración a muchos kilómetros de distancia, siempre y cuando esta agua pueda afectar los niveles freáticos y corrientes de agua. Otros factores a considerar son la conductividad hidráulica mejor conocida como permeabilidad y la porosidad de los materiales del talud. La conductividad facilita la llegada de corrientes de agua y la porosidad afecta la capacidad de almacenamiento de agua en el talud. Se deben identificar además las fuentes, localización y características de los niveles freáticos, corrientes subterráneas y sus fluctuaciones. (Suárez, 2009).

Figura 6 Esquema de precipitación e infiltración



Fuente: Suárez, 2009

### **2.3.3.2 La Sismicidad**

La sismicidad de las zonas montañosas es comúnmente alta. La mayoría de las cadenas de montañas son el producto de procesos tectónicos o volcánicos. Los movimientos sísmicos a su vez pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo existe el triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica, pudiéndose llegar a la falla al cortante y la licuación, en el caso de suelos granulares saturados. (Suárez, 2009).

### **2.3.3.3 La cobertura vegetal**

La vegetación cumple efectos protectores importantes en la mayoría de los taludes en cuanto protege contra la erosión y afecta los procesos de evapotranspiración y de infiltración de agua. Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación. La vegetación también cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo por acción de las raíces, y por la producción de materia orgánica, la cual puede evitar la infiltración del flujo al suelo sub superficial. (Suárez, 2009).

### **2.3.3.4 El Efecto Antrópico**

El hombre induce cambios en el medio ambiente de un talud y las actividades humanas tienen una gran influencia sobre su comportamiento y especialmente sobre la activación de deslizamientos. Las actividades antrópicas como el uso de la tierra, las prácticas de agricultura, la construcción de carreteras y la irrigación entre otras son factores determinantes en la ocurrencia de deslizamientos. (Suárez, 2009).

### **2.3.3.5 Erosión superficial**

Húmedo La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos. Puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud. Los procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, aquellos compuestos por limos y arenas finas principalmente, cuando la cobertura vegetal ha sido removida. (Suárez, 2009).

### **2.3.3.6 Erosión Laminar**

El proceso de erosión laminar se inicia por el impacto de las gotas de agua lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de la escorrentía produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos. Al caer las gotas de lluvia levantan las partículas de suelo y las reparten sobre la superficie del terreno. La velocidad de las gotas de lluvia puede alcanzar valores hasta de 10 metros por segundo y su efecto es muy grande sobre las superficies de talud expuestos y sin cobertura vegetal. El proceso es particularmente grave cuando la pendiente del talud es grande, como es el caso de los taludes de cortes en obras viales. La erosión laminar en taludes de alta pendiente puede generar procesos diferenciales de erosión, los cuales a su vez pueden activar caídos. (Suárez, 2009).

### **2.3.3.7 Erosión en surcos**

Los surcos de erosión se forman por la concentración del flujo del agua en caminos preferenciales, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad

generalmente, paralelos. El agua de escorrentía fluye sobre la superficie de un talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos (rills).

Los surcos forman una compleja microred de drenaje donde un surco al profundizarse va capturando los vecinos, formando surcos de mayor tamaño, los cuales a su vez se profundizan o amplían formando cárcavas en orma de V que pueden transformarse a forma de U. Inicialmente la cárcava se profundiza hasta alcanzar una superficie de equilibrio, la cual depende de las características geológicas e hidráulicas, para luego iniciar un proceso de avance lateral mediante deslizamientos de los taludes semiverticales producto de la erosión. (Suárez, 2009).

#### **2.3.3.8 Erosión en Cárcavas**

Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.

Las cárcavas inicialmente tienen una sección en V pero al encontrar un material más resistente o interceptar el nivel freático se extienden lateralmente, tomando forma en U. Otro caso de cárcavas que puede generar deslizamientos se presenta en las entregas de alcantarillas. (Suárez, 2009).

#### **2.3.3.9 Erosión por ríos y corrientes de agua**

Los ríos tienen una tendencia a profundizarse y ampliarse, especialmente en el momento de las grandes inundaciones o avenidas. Los ríos erosionan las riberas, cortan el pie de los taludes y pueden activar deslizamientos. Este problema puede ser grave en zonas urbanas donde la acción antrópica maneja el río, disminuye su

sección, aumenta su velocidad y direcciona la corriente. La erosión es particularmente fuerte en las curvas de la corriente. (Suárez, 2009).

#### **2.3.3.10 Erosión por afloramiento de agua**

Se puede presentar erosión en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas y/o taludes negativos, los cuales a su vez pueden producir desprendimientos de masas de suelo. Los afloramientos pueden estar relacionados con infiltraciones cercanas o por presencia de niveles freáticos.

Existen otros factores como: la litología o formación geológica, la microestructura, la estructura geológica, los planos de estratificación, la tectónica y fracturación, la geomorfología, el estado de meteorización, cobertura vegetal, el clima y la hidrología, los cuales también contribuyen a la afectación de la estabilidad de una ladera y pueden dar lugar a la ocurrencia de movimientos en masa. (Suárez, 2009).

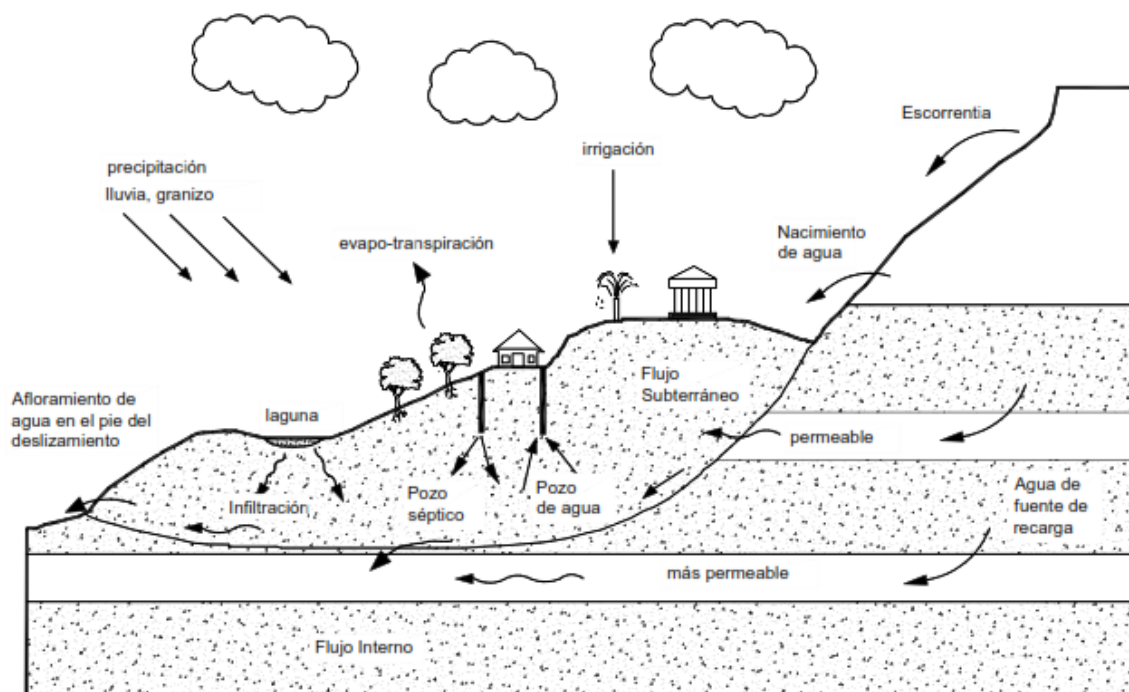
#### **2.3.4 Efecto del agua en la estabilidad de laderas**

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes, o durante períodos lluviosos, y de igual forma el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos.

La interpretación más frecuente del efecto del agua es que las lluvias por infiltración saturan el talud y la presión de poros induce una disminución de la resistencia al cortante, la cual a su vez puede activar un deslizamiento Sin embargo, el proceso no es siempre tan simple y la activación de un deslizamiento por acción del agua es un fenómeno complejo con una gran cantidad de variables.

El análisis hidrológico es uno de los trabajos previos más importantes en el análisis de estabilidad de taludes. La hidrología no es una ciencia exacta y es posible que se obtengan resultados muy diferentes de acuerdo al método que se utilice para el cálculo y la metodología de manejo de la información; por lo tanto, se debe tener un criterio muy claro de los fenómenos para interpretar la información hidrológica. (Suárez, 2009).

Figura 7. Infiltración del agua en laderas



Fuente: Suárez 2009

### 2.3.4.1 Efectos del agua sobre el suelo

La relación del efecto del agua sobre la ocurrencia de deslizamientos ha sido estudiada por una gran cantidad de investigadores. Existen evidencias muy claras de la relación directa entre las lluvias y la ocurrencia de deslizamientos de tierra.

Adicional a las infiltraciones de agua lluvia pueden existir otras fuentes de agua como son los cuerpos de agua (canales, cañadas o lagunas) arriba del talud, en los cuales puede ocurrir infiltración localizada.

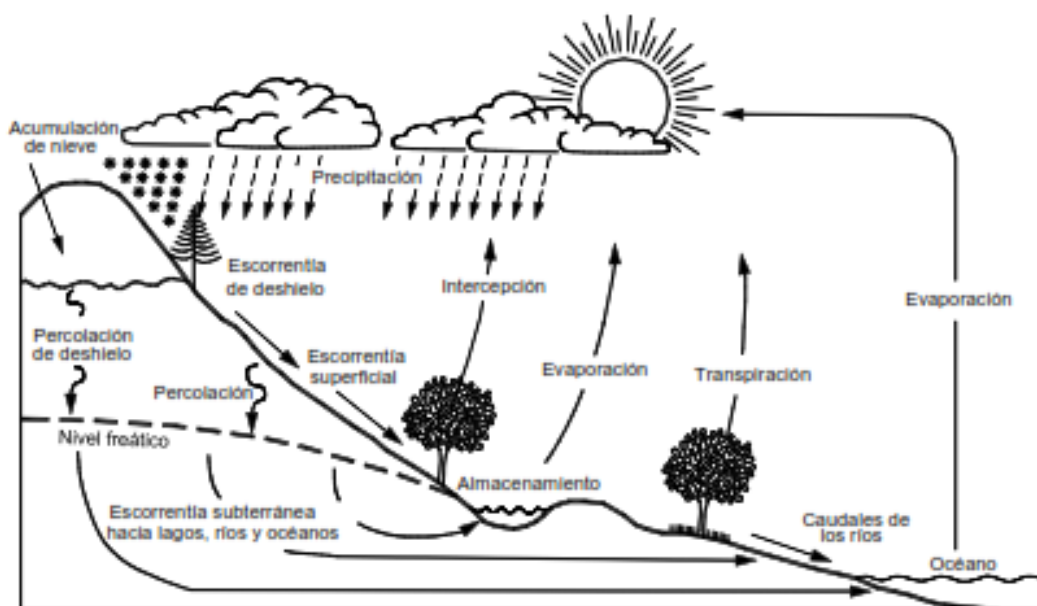
Los cambios en el sistema hidrológico del talud pueden afectar el comportamiento del mismo. Si el régimen de agua del suelo es alterado drásticamente por irrigación, remoción de la vegetación o inundación parcial, se puede producir inestabilidad de los taludes (Richards, 1985). Entre los factores que afectan el comportamiento de los taludes relacionados con la presencia del agua se encuentran los siguientes:

- Lubricación
- Ablandamiento
- Presiones de poros
- Tensiones capilares
- Fatiga por fluctuaciones del nivel
- Freático
- Lavado de cementantes
- Aumento de densidad
- Fuerzas hidráulicas interna
- Erosión
- Erosión laminar, en surcos y en cárcavas

### **2.3.5 El ciclo hidrológico**

El agua se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, generalmente en continuo movimiento, de acuerdo a un ciclo que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos y quebradas, los mares y los lagos. El agua continuamente está cambiando de forma de acuerdo a un ciclo natural denominado ciclo hidrológico. (Suárez, 2009).

Figura 8. Ciclo hidrológico



Fuente: Suárez 2009

Parte de la lluvia se infiltra y parcialmente corre por la superficie como escorrentía.  $Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Flujo subterráneo + cambio de humedad en el suelo + Acumulación de agua subterránea en los acuíferos.$

La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, y a su vez afecta la estabilidad de taludes o laderas.

La precipitación promedio es muy superior en las zonas tropicales que en el resto del mundo. Estas lluvias son asociadas principalmente con agrupaciones o "clusters" de nubes que se localizan en la zona de convergencia de vientos. Generalmente, estas agrupaciones de nubes arrastradas por los vientos cubren áreas de varios miles de kilómetros cuadrados. (Suárez, 2009).

### **2.3.6 El flujo subterráneo**

La respuesta del régimen de aguas subterráneas a las lluvias es diferente de acuerdo al talud, la formación geológica y las características ambientales. Existe una respuesta inmediata a la lluvia por infiltración en las zonas cercanas al talud y una respuesta regional por las lluvias infiltradas en toda el área de aferencia alrededor del talud. (Suárez, 2009).

### **2.3.7 La infiltración**

El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por los macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración.

El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea.

Al inicio de la lluvia la totalidad de la precipitación se infiltra humedeciendo el suelo. La humedad en el suelo antes de la lluvia es determinante en la cantidad de infiltración porque al llover, el agua trata de penetrar al suelo humedeciéndolo y creando una capa delgada de saturación; y hasta que ésta capa no haya llegado a un punto de equilibrio no se forman una escorrentía y una corriente de infiltración.

El equilibrio se logra cuando todo el perfil está transmitiendo agua a la máxima rata permitida por la parte menos permeable de los horizontes. Esto puede ocurrir entre diez minutos o varias horas después de iniciada la lluvia. (Suárez, 2009).

### 2.3.7.1 Ecuación de Green y Ampt (1911)

En esta ecuación se describe la infiltración por lluvia permanente en un suelo no-saturado. El modelo de dos capas asume que un frente húmedo percola hacia abajo formando un nivel saturado colgado. Por encima del frente húmedo el suelo se encuentra totalmente saturado, mientras el suelo por debajo se asume a la humedad inicial. (Suárez, 2009).

Figura 9. Ecuación de Green y Ampt 1911

**Aplicando Ley de Darcy se obtiene:**

$$i = K_S * \frac{z+H+\psi}{z} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$i$  = Capacidad de infiltración

$K_S$  = Coeficiente de Permeabilidad saturada

$z$  = Profundidad del frente saturado

$H$  = Profundidad de agua encharcada

$\Psi$  = Cabeza de succión en el frente saturado

Fuente: Suárez, 2009

### 2.3.7.2 Modelo de Horton (Jury y Horton 2004).

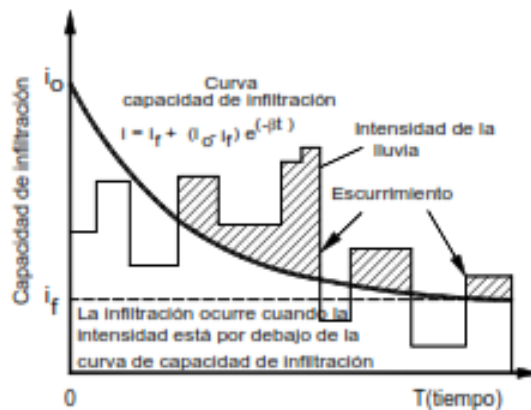
Jury y Horton (2004) presentaron una expresión empírica para describir la disminución de la capacidad de infiltración con el tiempo.

Figura 10. Infiltración y escurrentía de acuerdo a la curva de Horton

$$i = i_f + (i_0 - i_f) e^{-kt}$$

Donde:

- $i$  = Capacidad de infiltración en el tiempo (t).
- $i_0$  = Capacidad de infiltración inicial.
- $i_f$  = Capacidad de infiltración en flujo permanente final.



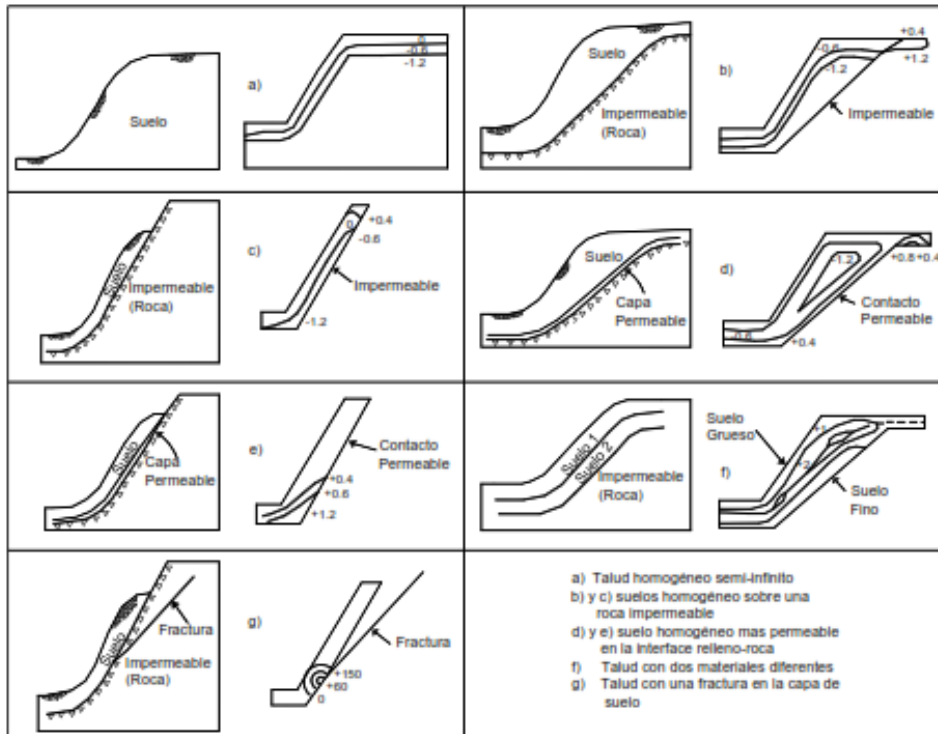
Fuente: Suárez, 2009

### 2.3.7.3 Flujo de agua subterránea

El agua infiltrada por las lluvias penetra en el suelo en forma semi-vertical hasta encontrar un manto de alta conductividad hidráulica (permeabilidad) que facilita la formación de una corriente, o uno semi-impermeable, que impide su paso y obliga a la formación de una corriente de agua paralela a la superficie de baja conductividad hidráulica (permeabilidad). Estas corrientes subterráneas pueden ser temporales o permanentes.

La determinación de las características del flujo del agua subterránea puede realizarse utilizando la teoría de flujo basado en la ley de Darcy. Existe una gran cantidad de soluciones gráficas, numéricas y software para la solución de los problemas de flujo de aguas subterráneas (Abramson y otros, 2002).

Figura 11. Distribución de presiones en función de la permeabilidad de los materiales (Vargas y otros 1990)



Fuente: Suárez, 2009

### 2.3.8 Cambios hidrogeológicos urbanos

La intervención humana del medio físico produce cambios importantes en la hidrología de las áreas urbanas en las siguientes formas (Suárez, 2009):

- Eliminación de áreas cubiertas por bosques o vegetación y su remplazo por áreas duras y edificaciones.
- Cambios topográficos para adaptar los terrenos al proceso de urbanización.
- Canalización de aguas por medio de pavimentos, sumideros y alcantarillados, disminución de la rugosidad, inhibición de la infiltración y de

la evapotranspiración, aumento de los caudales y reducción del tiempo de concentración.

- Aumento de caudales con las aguas de acueducto tomadas de otras cuencas.
- Transporte de aguas de una microcuenca a otra a través del sistema de alcantarillado.

### **2.3.9 Manejo inadecuado de aguas lluvias y residuales**

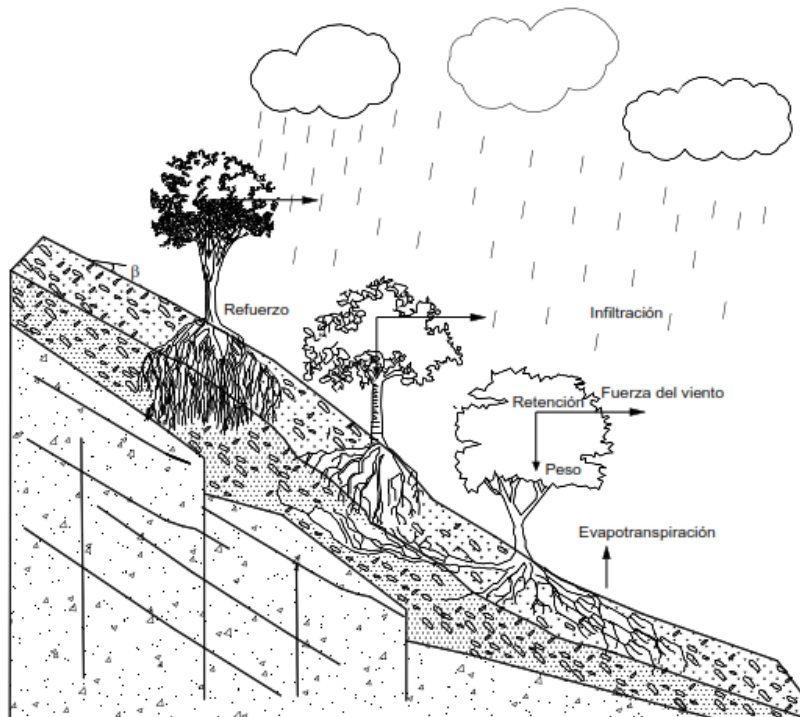
Ruth y Moulton (1996) indican que la concentración de agua superficial o sub-superficial en un sitio con situación geológica desfavorable es una causa primaria de inestabilidad de taludes. Las entregas puntuales sobre los taludes producen cárcavas que pueden representar una amenaza directa para las viviendas que producen el vertimiento.

La falta de sistemas de alcantarillado es el caso más grave para la formación de cárcavas de erosión, teniendo en cuenta que las calles actúan como colectores de agua y se pueden producir familias de cárcavas de gran tamaño.

Las entregas de los sistemas de aguas de alcantarillado en sitios potencialmente susceptibles geotécnicamente, pueden formar grandes cárcavas, las cuales pueden terminar en deslizamientos de tierra. La falta de sumideros para aguas lluvias o poca capacidad de estos; en este caso el sistema de alcantarillado no es eficiente en la recolección de las aguas lluvias y las calles actúan como sistemas alternativos con la consiguiente formación de cárcavas. (Suárez, 2009).

### 2.3.10 La vegetación y los deslizamientos

Figura 12. Refuerzo de taludes con vegetación



Fuente: Suárez, 2009

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatido en los últimos años; el estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas sub-superficiales.

Los árboles y arbustos de raíz profunda le aportan una resistencia cohesiva significativa a los mantos de suelo más superficiales y al mismo tiempo facilitan el drenaje subterráneo, reduciendo en esta forma la probabilidad de deslizamientos

poco profundos; pero su efecto no es el mismo en deslizamientos profundos. (Suárez, 2009).

### **2.3.10.1 Efectos de la vegetación sobre el talud**

Para analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo, se requiere investigar las características específicas de la vegetación en el ambiente natural que se esté estudiando. Entre los factores importantes se sugiere analizar los siguientes: volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces. (Suárez, 2009).

El tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales:

- En primer lugar tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.
- Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

Factores más importantes

- Intercepta la lluvia.
- Aumenta la capacidad de infiltración.
- Extrae la humedad del suelo.

- Grietas por desecación.
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante.
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos.
- Aumentan el peso sobre el talud.
- Transmiten al suelo fuerza del viento.
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial.
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces.
- Se facilita la infiltración masiva de agua.

La quema de la vegetación aumenta la inestabilidad de los taludes, especialmente si esto ocurre en áreas de coluviones en los cuales la vegetación ejerce un papel preponderante en la estabilidad, especialmente por la eliminación del refuerzo de las raíces y por la exposición a la erosión acelerada. (Suárez, 2009).

### **2.3.10.2 Efectos hidrológicos de la vegetación**

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de un talud de varias formas (Suárez, 2009).:

- ✓ Interceptación de la lluvia: De acuerdo con Styczen y Morgan-1996, la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación.

Según Gregory y Walling (1973), dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual. Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada, y parte alcanza finalmente la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.

- ✓ Retención de agua: La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía disminuyendo su poder erosivo, pero puede aumentar la rata de infiltración.

La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje demoran más el ciclo hidrológico, en razón a que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia. En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características de la vegetación.

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

- ✓ Evapotranspiración: La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente una humedad de equilibrio, dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

- ✓ Funciones Específicas de las plantas: Las diferentes partes de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de vista de manejo geotécnico. Las raíces cumplen una función muy importante de absorción. Grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas junto con minerales y productos que la planta requiere para su alimentación. Igualmente las raíces interactúan con el suelo y lo refuerzan. El tronco soporta los órganos fotosintéticos y reproductivos, especialmente las hojas.
- ✓ Control de la erosión: El efecto más importante de la vegetación universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación. Barker y otros (1994) reportan tasas de erosión de 12 toneladas de suelo por hectárea en Malasia en el primer año, después de cortado un bosque tropical. Las tasas de erosión aumentan con el tiempo a medida que las raíces se descomponen. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión.

En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía. En lo referente a control de erosión se ha encontrado que donde hay árboles altos la erosión es menor que en el caso de arbustos. Además, se ha encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos. (Suárez, 2009).

### **2.3.10.3 Características de las raíces**

Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo.

- Disponibilidad de oxígeno.
- Contenido de humedad.
- Succión o presión osmótica.
- Temperatura del suelo.
- Niveles de toxinas y elementos patogénicos.
- Sistema de poros.

Profundidad de las raíces: La profundidad de las raíces generalmente no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos; aunque se han reportado casos de raíces de árboles de más de 30 metros de profundidad (Macgregor y Macmanus, 1992).

La extensión lateral del sistema radicular generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos superan los 50 metros de longitud. La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud.

Se ha encontrado que la longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo bien drenado granular, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Aparentemente, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene de buscar agua en el caso de que el drenaje sea bueno. (Suárez, 2009).

Acción de refuerzo de las raíces: Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades.

Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entretrejida en los primeros 30 a 50 cms de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Unir los grupos de partículas impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos.
- Ensayos realizados por Campos (1991), demuestran que las raíces aumentan la cohesión de muestras de suelo en gran proporción. Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.
- El sistema radicular de un árbol, en forma conjunta con otros árboles puede formar efectos de arco, similares a los de las pilas o pilotes.

### **2.3.11 Diseño de revegetalización**

La revegetalización de un talud ayuda a controlar la erosión y a aumentar el factor de seguridad. Por esta razón cada día se utiliza más la vegetación en la estabilización de taludes. El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación.

El establecimiento de vegetación no es fácil y deben tenerse consideraciones especiales para su diseño; sin embargo, todo diseñador debe considerar la vegetación como un sistema básico de estabilización para los taludes en suelo o roca meteorizada (Grados IV, V y VI).

Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe

considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión. (Suárez, 2009).

### **2.3.11.1 EL VETIVER COMO PLANTA PARA ESTABILIZAR DESLIZAMIENTOS.**

El Vetiver (*Vetiveria Zizanioides* L.) es una especie de pasto originario de Asia, que se está utilizando con mucha frecuencia en los países tropicales para el control de erosión y para disminuir el potencial de deslizamiento de los taludes.

Figura 13. Estructura Vetiver



Fuente: Carlos A. P y Jorge L D. 2012<sup>3</sup>

Esta planta es una gramínea perenne con apariencia de maleza que alcanza una altura hasta de 1.6 metros en condiciones optimas y posee un sistema de raíces

---

<sup>3</sup> Carlos A. P., Jorge L D. Uso del pasto Vetiver como una propuesta de bioingeniería en la estabilización de taludes, UIS, 2012

con una gran cantidad de cilindros fibrosos capaces de alcanzar profundidades de 4 a 5 metros.

El Vetiver resiste fácilmente las sequías y la inmersión en agua, debido a la profundidad de sus raíces. Le gusta la exposición al sol y es capaz de adaptarse a gran cantidad de suelo desde arena a arcilla y a altitudes climáticas desde el nivel del mar hasta 2500 metros.

El Vetiver crece tanto en ambientes ácidos como en ambientes alcalinos ( $4 < \text{pH} < 11$ ). Resiste concentraciones grandes de contaminantes y no requiere de fertilidad alta del suelo. Idealmente requiere una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ . La resistencia a la tensión de las raíces del Vetiver varía de 25 a 60 Mpa (Cazzuffi y otros, 2006).

Durante siglos el pasto Vetiber, además de extraer aceites esenciales de sus fragantes raíces, lo usaron como fijador del suelo debido a que reforzaba los terraplenes y establecía límites para los campos de arroz, además reforzaba las riveras de los ríos y estanques para evitar que la tierra cayera al agua.

Su utilización se dio principalmente en el sector agrícola, sobre todo en la conservación del suelo y el agua. Con la creación de la Vetiver Network y la diseminación de información mediante publicaciones, talleres y seminarios, donde los ingenieros empezaron a considerar los beneficios de plantar pasto vetiver en los terrenos agrícolas de pendiente pronunciada para estabilizar y controlar la erosión del suelo.

Aunque pertenecen a la familia de los pastos (Graminae), el vetiver no es un pasto cualquiera. Debería ser considerado en la misma categoría que el bambú, que es tratado no tanto como un pasto sino como un árbol. En este sentido es de interés acotar estudios anatómicos llevados a cabo en la universidad de Bangalore, que dicen:

“Aun cuando los tallos muestran las características de un pasto normal, es diferente morfológicamente de otros pastos por cuanto exhibe nudos abultados, entrenudos largos, lo que en cierto grado están cubiertos por el haz de hojas no abiertas, excepto en su parte apical. Las raíces son fibrosas y son únicas debido a que tienen aerénquima en la región cortical exterior.”

Crece erecto y sus rígidos tallos son capaces de formar un seto vivo denso en 3 o 4 meses, lo que reduce la velocidad de escurrimiento del agua lluvia y forman un filtro eficaz de sedimentos. El seto vivo puede ajustarse en fila con el sedimento atrapado al formar nuevos retoños a partir de los nudos de las ramas superiores.

Se ha determinado que las raíces de vetiver poseen un poder innato de penetración de una capa bastante gruesa (5 Cm) de concreto asfáltico. En un estudio realizado por el Departamento de Desarrollo Territorial de Tailandia. Se descubrió que el Vetiver podía atravesar capas duras de suelo de hasta 15 Cm de espesor, con las raíces extendiéndose hasta 74 Cm por debajo del nivel del suelo.

En las pendientes que se encuentran sobre roca subyacente, pedregón rodado o alguna otra capa relativamente dura, las penetrantes raíces de Vetiver servirán de anclaje, mediante la acción de tendón de sus raíces.

Se deben emplear buenos materiales de siembra, con retoños maduros y en pleno crecimiento, y evitar el uso de retoños viejos.

Se recomienda efectuar análisis químicos del suelo cuando se vaya a plantar vetiver en lugares nuevos, con el fin de determinar los requerimientos de fertilización o enmienda del suelo antes de sembrarlo.

Es mejor sembrar el vetiver en suelo húmedo, cuando se siembra en suelo seco se debe regar el mismo día, por lo que es sumamente recomendable regar el campo el día anterior a la siembra. Si no llueve, se necesita regar diariamente durante la

primera semana, cada 2 a 3 días las dos semanas subsiguientes o hasta que el pasto este bien establecido.

Con el análisis del suelo se sabrá si se requiere fertilizante al momento de sembrar el vetiver o para su mantenimiento posterior. Como el vetiver es particularmente intolerante a la sombra, especialmente durante la fase de establecimiento, durante el primer año, es necesario controlar las malezas ya que pueden dar sombra, invadir y asfixiar el vetiver (Carlos A. P y Jorge L D, 2012).

### **2.3.12 Método de análisis “equilibrio límite y factor de seguridad”**

Existen diferentes metodologías para el análisis de estabilidad de laderas, a continuación se presentan algunas metodologías utilizadas: Límite de equilibrio, Esfuerzo – Deformación, discontinuos esfuerzo - deformación de elementos discretos, cinemáticos estereográficos para taludes en roca, Dinámica de caídas de roca, dinámica de flujo. De acuerdo al comportamiento de la ladera identificada, se adopta la metodología de Equilibrio límite.

Un análisis de equilibrio límite permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad ante deslizamiento del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

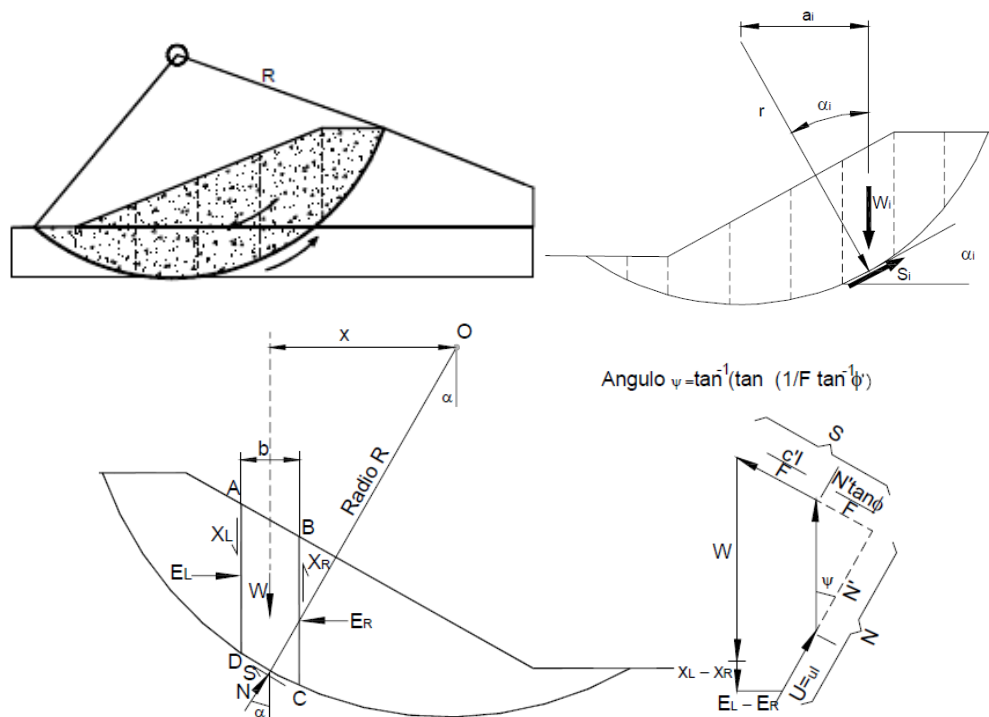
La teoría de equilibrio límite supone que en el caso de generarse un movimiento en masa, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de toda la superficie de falla, y equivalentes a un factor de seguridad 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o

dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Generalmente, los métodos son iterativos y cada uno ofrece diferentes grados de precisión.

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

Figura 14. Método de equilibrio límite

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}} \quad F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}} \quad (\text{Ecuación 3})$$



Fuente: Suárez, 2009

- Parámetros utilizados: Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.
- Ventajas: Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.
- Desventaja: Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.

Para los análisis de estabilidad, se utilizó el método de equilibrio límite, asumiendo superficies de falla circular, esta superficie de falla es característica de los movimientos analizados sobre las unidades geológicas identificados en las zonas críticas, en los modelos de análisis de estabilidad de taludes se aplicaron metodologías conocidas.

Dentro de los métodos de equilibrio límite, se pueden identificar diferentes autores que crearon metodologías para la determinación de factores de seguridad, para la determinación de la estabilidad de las laderas, a continuación se presenta una tabla donde se presenta diferentes autores<sup>4</sup>:

---

<sup>4</sup> Suárez Díaz Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Instituto De Investigación, 1998

Figura 15. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\phi = 0$ ).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: Suárez, 1998

Figura 16. Continuación

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	$c_u$ $c, \phi$	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Círculo de fricción	Análisis no drenado. Taludes secos solamente.
Bishop y Morgenstern (1960)	$c, \phi, r_u$	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern (1960)	$c_u$	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y $c_u$ aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	$c, \phi, r_u$	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	$c_u$ $c, \phi, r_u$	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	$c_u$	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y $c_u$ aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	$c, \phi$	20-90°	Análisis límite	
O'Connor y Mitchell (1977)	$c, \phi, r_u$	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	$c, \phi$ $c, \phi$	0-90° 0-90°	Círculo de fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	$c, \phi$	0-45°	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
Charles y Soares (1984)	$\phi$	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	$c, \phi, r_u$	11-63°	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Fuente: Suárez, 1998

### 2.3.12.1 Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión:

$$F.S. = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W'u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \text{sen} \alpha} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Bishop Simplificado

$$F_s = \frac{\sum \left[ \frac{(c'_n + W_n (1 - r_{un}) \tan \phi') \sec \alpha_n}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha_n}{F_s}} \right]}{\sum W_n \sin \alpha_n}$$

Donde:

$\Delta l$  = longitud de arco de la base de la dovela

$W$  = Peso de cada dovela

$C'$ ,  $\phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

$u$  = Presión de poros en la base de cada dovela =  $\gamma w \times h w$

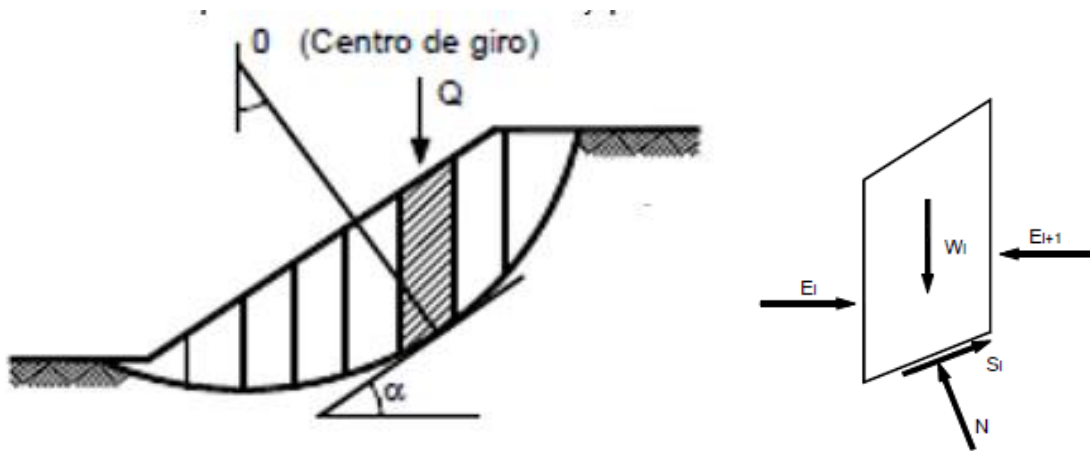
$\alpha$  = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos. A continuación se presenta la metodología grafica para la determinación del factor de seguridad en una ladera por medio de la utilización de tajadas<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Morgenstern n., Price V. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique vol 15 2005

Figura 17 Tajadas en una ladera y Diagramas de fuerzas analizadas pro Bishop



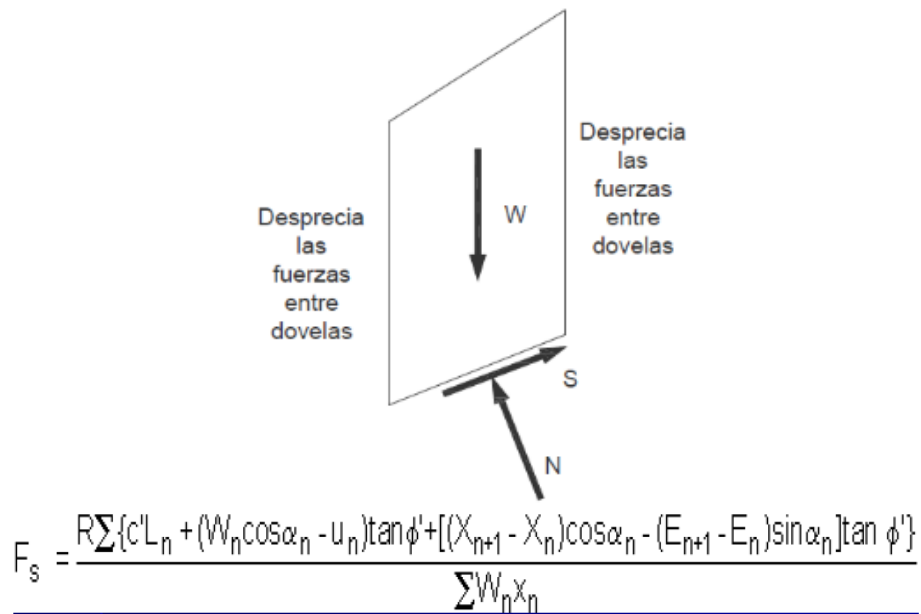
Fuente: Suárez, 1998

### 2.3.12.2 MÉTODO FELLENIUS

Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo producido por estas fuerzas se obtiene el Factor de Seguridad.

El método ordinario o de Fellenius solamente satisface equilibrios de momentos y no satisface equilibrio de fuerzas. Para el caso de  $\varphi = 0$  el método ordinario da el mismo valor de factor de seguridad que el método del arco circular.

Figura 18. Método de Fellenius

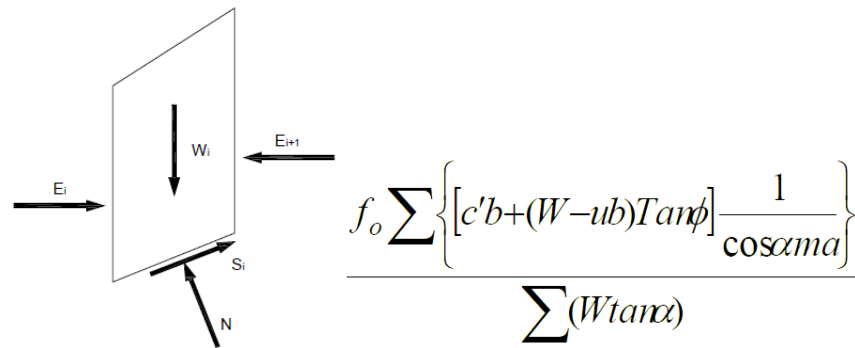


Fuente: Suárez, 1998

### 2.3.12.3 MÉTODO JAMBU

El método simplificado de Janbú se basa en la suposición que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tiene en cuenta las fuerzas de cortante. Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección  $f_0$ . El factor  $f_0$  depende de la curvatura de la superficie de falla. El método de Janbú solamente satisface equilibrio de fuerzas y no satisface equilibrio de momentos.

Figura 19. Método Jambu

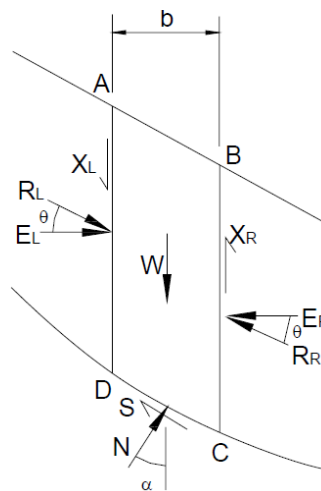


Fuente: Suárez, 1998

### 2.3.12.4 MÉTODO SPENCER

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras o sea que tienen el mismo ángulo de inclinación.

Figura 20. Método Spencer

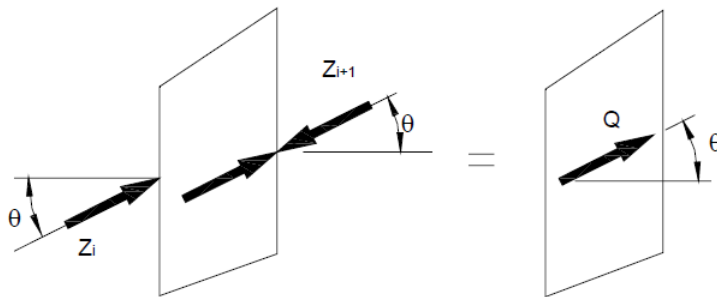


Fuente: Suárez, 1998

### 2.3.12.5 MÉTODO MORGENSTERN AND PRICE

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante como en el caso del método de Spencer o puede considerarse otro tipo de función. Esta posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas lo hace un método más riguroso que el de Spencer.

Figura 21. Método Morgenstern and Price



Fuente: Suárez, 1998

De acuerdo al tipo de superficie de falla de la ladera analizada en el presente proyecto de grado, se adopta la metodología de Bishop.

### 2.3.13 Limitaciones de los métodos de equilibrio límite

Se basan solamente en la estática. Como los métodos de equilibrio límite se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.

- Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos. Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura.
- Utilizan modelos de falla muy sencillos. El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de equilibrio límite, es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud
- Generalmente se asume el material como isotrópico. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares.

#### **2.3.14 Consideraciones de Diseño**

Para la determinación de las consideraciones de diseño, se tuvo en cuenta la geología puntual del sector, los resultados de campo y laboratorio y el comportamiento general del suelo, con el fin de efectuar el modelo geológico geotécnico, que más se ajusta al problema identificado.

#### **2.3.15 Modelo y software utilizado**

Para el análisis de estabilidad del modelo geológico, se utilizó el software SLIDE v5.0 de la firma ROCSCIENCE, el cual es un producto que utiliza la teoría de equilibrio límite y elementos finitos, analizando superficies de falla circulares las cuales, son características del movimiento analizado en el presente proyecto, debido a su formación geológica y las características puntuales del suelo. Este software, permite la determinación de los factores de seguridad ante deslizamiento

por fenómenos de remoción en masa, teniendo en cuenta análisis determinísticos y probabilísticos, así como análisis de elementos finitos y análisis subterráneos de flujo.

### **2.3.16 Métodos de análisis**

Aunque el programa permite trabajar con nueve diferentes métodos de análisis, para objeto del presente estudio se trabajó conjuntamente con los siguientes cuatro métodos:

1. Método Bishop simplificado
2. Método Janbú simplificado
3. Método de Spencer
4. Método de GLE/Morgenstern-Price

De los resultados de estabilidad para los escenarios propuestos, se asume el esquema de círculo de falla para el método de Bishop con el factor de seguridad más crítico, sin embargo los resultados de los factores de seguridad se presentan para cada uno de los métodos indicados.

Para el análisis de estabilidad por fenómenos de remoción en masa, se llevaron a cabo los siguientes lineamientos o determinantes Geotécnicas:

1. Cálculo de factores de seguridad empleando un modelo determinístico y probabilístico, utilizando el software SLIDE de la firma ROCSCIENCE, para un escenario actual y en condiciones críticas de ascenso máximo del nivel freático y aceleración pseudo estática, para identificar las medidas de mitigación.
2. Identificación de los detonantes del movimiento y el material comprometido con la inestabilidad.

3. Definir el tipo de movimiento y la tendencia de este, por medio de la caracterización de las superficies de falla y las áreas comprometidas con el deslizamiento.

4. Para los análisis de estabilidad, se utilizó el método de equilibrio límite, que analiza la superficie de falla circular para talud finito; esta superficie de falla es característica del movimiento analizado, ya que se evidencia las fallas circulares puntuales sobre las laderas que presentan movimientos activos, también se utilizara la teoría de Bishop para la definición de los factores de seguridad.

Para la determinación de los modelos, se asumen escenarios críticos, que contemplan el ascenso máximo del nivel freático freático en condición estática, que se encuentra definida por la Norma sismo Resistente Colombiana NSR-10 para el municipio de Bucaramanga dentro del departamento de Santander.

### **2.3.17 Superficies de Falla**

Se utilizaron círculos de fallas globales y locales, de forma rotacional, por medio de la delimitación de las áreas de las zonas donde se encuentran los radios de giro del deslizamiento, que sean característicos del movimiento analizado, donde se comprometan volúmenes de suelo, coherentes con la magnitud, geo forma, niveles freáticos y materiales encontrados dentro de las laderas analizadas en zonas adyacentes. Se utilizó una franja rectangular de 30\*30 nodos para la realización de las iteraciones del software para la determinación del menor factor de seguridad.

### **2.3.18 Aceleración pseudo estática para el diseño de estabilidad de taludes en condiciones pseudo estáticas**

Se determinó el coeficiente de aceleración horizontal, para análisis de estabilidad de taludes  $K_{st}$ , en función de los parámetros pseudo estáticos de la norma NSR 10,

en el Título A y H. ver capítulo anterior. Para el modelo geológico geotécnico se utilizó un  $K_{st}$  que equivale a 0.24g para la zona analizada.

### **2.3.19 Hidrogeología**

Se determinó el comportamiento hidrogeológico para las condiciones máximas probables, determinando como condiciones de frontera las máximas alturas piezométricas de los piezómetros ubicados dentro del área directa e indirecta del área de estudio, con estas condiciones y las propiedades de permeabilidad del suelo, se determinó el comportamiento del flujo subterráneo, en función de sus propiedades hidráulicas, determinando así un modelo de flujo ajustado a la realidad y coherente con el proyecto.

### **2.3.20 Cargas modeladas.**

Como cargas antrópicas se encuentran las edificaciones ubicadas sobre la corona y el cuerpo de ladera donde se asume una carga de 24 KN/m<sup>2</sup> por las cargas de las edificaciones existentes de hasta 2 pisos que existen. Como carga vehicular se asumió 20 KN/m<sup>2</sup>.

### **2.3.21 Categorización de la amenaza**

Como criterios para definir los niveles de amenaza se utilizaron los especificados en el título H de la Norma Sismo Resistente NSR-10. En este título se encuentra la tabla H.2.4-1 que muestra los factores de seguridad mínimos directos.

Tabla 2. Factores de seguridad básicos mínimos directos

Condición	$F_{SBM}$		$F_{SBUM}$	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Fuente: NSR-10

De acuerdo a la tabla anterior se asume la condición de taludes – condición Pseudo estática- agua subterránea máxima y coeficiente sísmico de diseño. Para los cuales se recomienda un factor de seguridad mínimo de diseño de 1.05 para garantizar la estabilidad del talud.

Es necesario identificar esta clasificación de estabilidad y amenaza, de acuerdo a los lineamientos de la norma NSR 10 y las Normas geotécnicas de la CDMB, mediante la Resolución 1294 de 2009, tomando el escenario más crítico. Del análisis anterior se pueden definir los siguientes rangos para la sectorización de la amenaza.

### 2.3.21.1 Niveles de Amenaza Asumidos

□ Nivel de amenaza baja: Son terrenos “geológicamente estables” donde las amenazas de movimientos naturales de masa son mínimas o no existen. Los factores de seguridad en los análisis de estabilidad de taludes deben ser superiores a 1.5 para condiciones estáticas y 1.2 para eventos sísmicos.

□ Nivel de amenaza media: Son terrenos clasificados geológicamente como “relativamente inestables”, en los cuales para adelantar la construcción de obras es necesaria la ejecución previa de trabajos que preserven su estabilidad o se establecen condicionantes para el manejo del terreno, orientados a conservar o mejorar su estabilidad natural. Los factores de seguridad en el análisis de estabilidad de taludes se encuentran entre 1.25 y 1.5 para condiciones estáticas y entre 1.05 y 1.2 para eventos sísmicos.

□ Nivel de amenaza alta: Pertenecen a esta clasificación terrenos clasificados como “inestables” en los cuales no se debe adelantar ninguna obra de construcción, debido a que presentan riesgos altos para la vida y bienes de la comunidad, además su recuperación es muy compleja, o demasiado costosa. En caso que la relación costo beneficio no sea razonable se deben destinar a zonas verdes, reforestación o de tratamientos especiales a largo plazo. Los factores de seguridad en el análisis de estabilidad son menores de 1.25 para condiciones estáticas o menores de 1.05 para eventos sísmicos.

Tabla 3. Factores de seguridad básicos mínimos directos

CATEGORÍA	FACTORES SEGURIDAD	
	Pseudo Estático	Estático
AMENAZA BAJA	FS>1,2	FS>1,5
AMENAZA MEDIA	1.05<FS<1,2	1,25<FS<1,5
AMENAZA ALTA	FS<1.05	FS<1,25

Fuente: NSR-10-CDMB

### 2.3.21.2 Escenarios del modelamiento

Con el fin de desarrollar modelos geológicos geotécnicos en condiciones críticas de ascenso máximo del nivel freático y aceleración Pseudo-estática y evaluar las

posibles condiciones de estabilidad evaluando la influencia de los parámetros ambientales de flujo superficial, sub terraneo y la revegetalziacion de la zona, se proponen los siguientes escenarios de modelamiento:

Tabla 4. Escenarios críticos de modelamiento

Escenario 0	análisis de estabilidad geotécnica escenario 0: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos promedio
Escenario 1	análisis de estabilidad geotécnica escenario 1: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos máximos de piezómetros
Escenario 2	análisis de estabilidad geotécnica escenario 2: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático
Escenario 3	análisis de estabilidad geotécnica escenario 3: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y con obras de prevención y mitigación, mediante el uso de revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal
Escenario 4	análisis de estabilidad geotécnica escenario 4: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático sin obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal)
Escenario 5	análisis de estabilidad geotécnica escenario 5: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal)

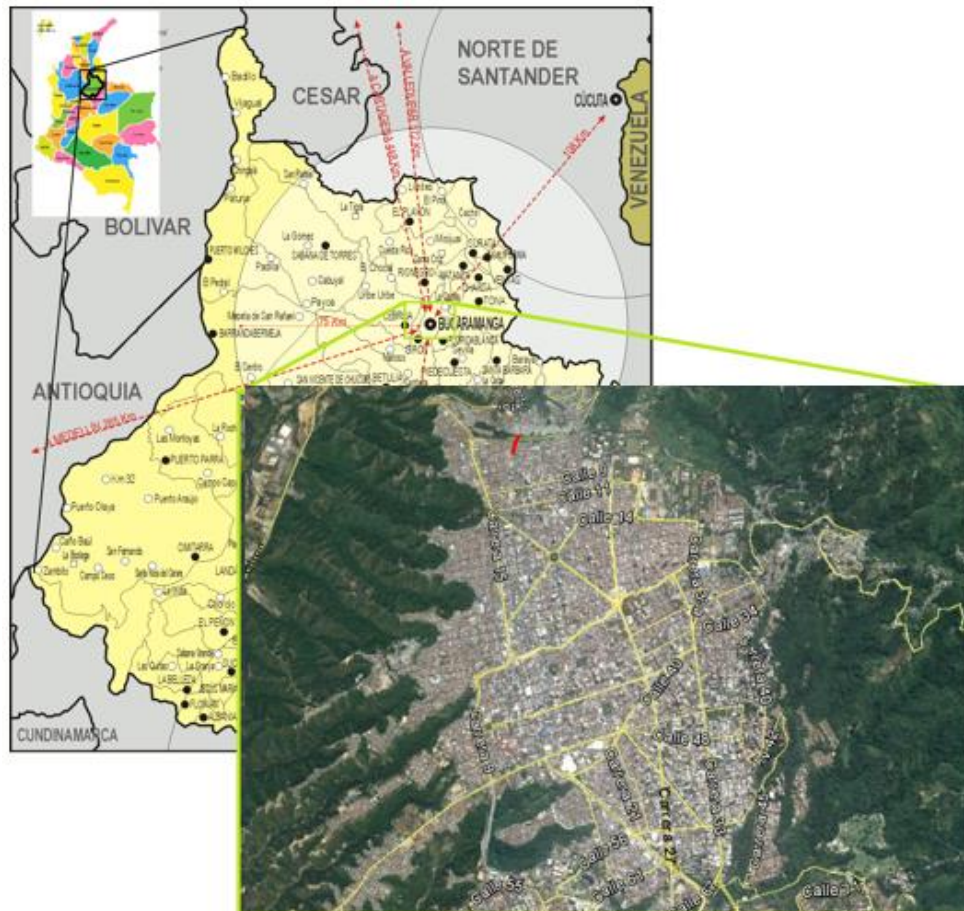
Fuente: Autor

### 3. GENERALIDADES

#### 3.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El perfil de la ladera analizada, se encuentra al Norte del Municipio de Bucaramanga, sobre el Barrio Transición, Bosque Norte y Nueva Colombia en el municipio de Bucaramanga, Santander. Sobre las coordenadas geodésicas  $7^{\circ}8'30.6''$  N ,  $73^{\circ}7'55''$  O a una altura promedio de 815 m.s.n.m.

Figura 22. Ubicación general del área de estudio del Proyecto a nivel general.



Fuente: Autor

Figura 23. Ubicación detallada área de estudio



Fuente: imágenes Google Earth

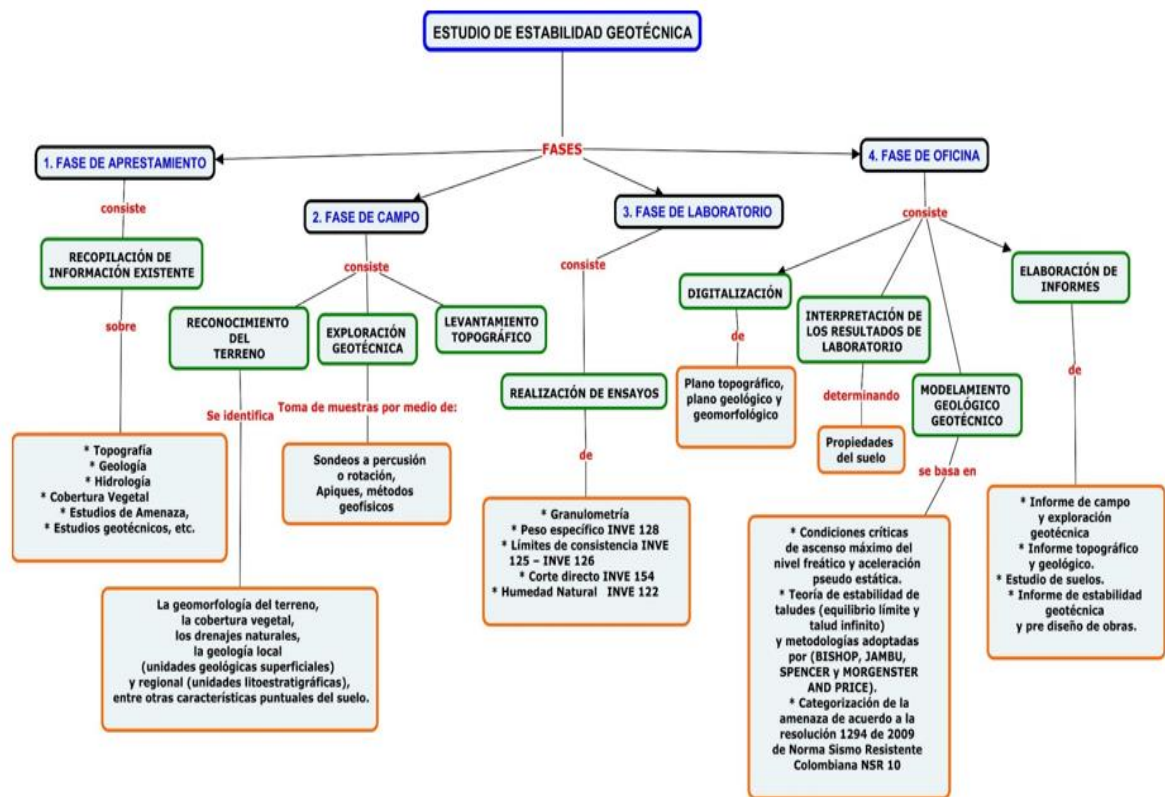
### **3.2 METODOLOGÍA**

A continuación se presenta la metodología aplicada al estudio ambiental, hidrogeológico y de estabilidad geotécnica:

- Fase de Aprestamiento: En esta fase se efectúa la recopilación de la mayor cantidad de información, relacionada con el área de influencia directa del estudio geotécnico, entre la información recopilada, se puede identificar principalmente: topografía general, geología regional y local y estudios geotécnicos existentes, Etc.
- Fase de Campo: En esta fase, se realiza el reconocimiento del terreno, donde se identifican las unidades geológicas superficiales, las unidades litoestratigráficas, las unidades geomorfológicas, la cobertura vegetal, las pendientes promedio entre otras características identificadas en el lugar de estudio. Se identifican los drenajes naturales presentes en la zona de estudio. También se efectúa la fase de exploración geotécnica por medio de ensayos a percusión o a rotopercusión, apiques para la toma inalterada de suelos, y se realiza el levantamiento topográfico, y las refracciones sísmicas.
- Fase de Laboratorio: Una vez recepcionadas las muestras de campo, se les efectúa los respectivos ensayos de laboratorio, para la caracterización de sus propiedades físicas y geotécnicas. En general estos ensayos consisten en la clasificación granulométrica, determinación de los límites de consistencia, cálculo de la humedad natural, ensayos de corte directo, cálculo del peso específico, percolación, entre otros.
- Fase de oficina: En esta fase se realiza la digitalización de los mapas obtenidos en el trabajo de campo: topográfico, geológico y geomorfológico. Una vez obtenidas las propiedades geotécnicas, y con las teorías y metodologías de análisis del comportamiento del suelo, se realiza la interpretación de los resultados de laboratorio, determinando el comportamiento hidrogeológico y geotécnico del

suelo. Se realiza un modelamiento geológico geotécnico, donde se determinan los niveles de estabilidad por fenómenos de remoción en masa de la ladera, y finalmente se realiza la elaboración de los informes que comprenden el estudio de estabilidad geotécnica, comparando la influencia de los controles de flujos de infiltración.

Figura 24. Metodología del estudio geotécnico



Fuente: Autor

### **3.3 MARCO GEOLÓGICO**

Geológicamente el área de estudio se encuentra ubicada dentro de depósitos de terraza y de cono aluvial (Ward et al., 1973) en la Terraza de Bucaramanga, de edad Pleistoceno-Holoceno. De acuerdo a De porta (1959) y Julivert (1963), la parte inferior de la Terraza de Bucaramanga está compuesta de grava, arena, limo y capas menores arcillosas fluviales; mientras la parte superior está compuesta de cantos no calibrados que se interpretan como depósitos coluviales, los cuales adelgazan lejos del frente montañoso, presentan un gradiente superficial más grande que el de los depósitos fluviales subyacentes y están restringidos a una zona paralela a lo largo de los valles.

#### **3.3.1 Formación Bucaramanga.**

Tomado del “Estudio Zonificación Sismo Geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga”, realizado por Ingeominas. La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958). Se trata de un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palonegro y el río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2° y 7°, y una extensión aproximada de 60 a 80 km<sup>2</sup>. La formación Bucaramanga es disectada por varias quebradas, la mayoría afluentes del río de Oro, conformando un drenaje dendrítico sub paralelo.

El espesor del depósito aumenta de oriente a occidente y aunque el valor real de éste se desconoce, siendo actualmente motivo de investigación, algunos cortes

geológicos permiten estimar, en los sectores más profundos, valores promedios cercanos a los 250 m.

De acuerdo con la granulometría, morfología, agentes de transporte y fuentes de los materiales, esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, donde alternan materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombros, canal y lagunar.

De Porta (1958) divide la formación Bucaramanga en los siguientes niveles: a) un paquete inferior con más de 150 m de espesor, conformado por niveles discontinuos de gravas, clasto soportado, con lentes arenosos intercalados; b) una capa relativamente delgada de 10 a 18 m de espesor, ubicada en la parte intermedia a alta, compuesta de sedimentos arcillosos, la cual se extiende por una buena parte de la terraza; y c) un nivel superior de 8 a 15 m de espesor, constituido por una mezcla de fragmentos angulares gruesos y finos arenosos.

Algunos trabajos recientes proponen 5 miembros definidos de base a techo como: Calcáreo, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos. Dos de ellos propuestos por Hubach, (1952) y tres por Niño y Vargas, (1992). Es importante destacar que las relaciones estratigráficas del miembro Calcáreo, descritas por Niño y Vargas, con respecto al miembro Órganos, no se pudieron determinar durante el trabajo de campo, debido a que el denominado miembro Calcáreo no presenta límites estratigráficos claros que permitan separarlo del Órganos, no presenta distribución lateral y se observa en forma de lentes locales en la quebrada La Picha, al noroccidente del Área Metropolitana. Lo anterior indica que el denominado miembro Calcáreo forma parte del miembro Órganos; por lo tanto, teniendo en cuenta las clasificaciones hechas por Hubach (1952) y Niño y Vargas (1993), se propone dividir la formación Bucaramanga, de base a techo, en los siguientes miembros: miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr).

Las Unidades Geológicas Superficiales corresponden a un conjunto de materiales que incluyen suelos y rocas cuyas propiedades se conservan por debajo de la superficie hasta algunas decenas de metros.

Las UGS se utilizan como herramienta para evaluar el comportamiento mecánico de los terrenos ante diferentes usos, como desarrollo de obras de infraestructura, desarrollos mineros y demás usos definidos en los planes de ordenamiento territorial.

### **3.3.1.1 Miembro Órganos (Qbo).**

Definido por Hubach (1952). Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga. Los mejores afloramientos donde se puede observar casi toda la secuencia se presentan en una extensa área sobre el escarpe occidental del Abanico de Bucaramanga, destacándose los siguientes espesores: En las quebradas dos Aguas (espesor : 164.8 m), las Navas (espesor : 72 m de la base del nivel), Argelia (espesor : 60 m de la parte superior del nivel) y la parte norte de la Cuyamita (espesor : 8.8 m de la parte superior del nivel) ; otros afloramientos son referidos a los barrios La Feria (espesor : 144.2 m ) y Don Bosco (5.2 m del tope del nivel).

Con base en las columnas realizadas, correlaciones estratigráficas y cortes topográficos, se estima que su espesor podría superar los 180 m, siendo el nivel más potente de la Formación Bucaramanga (Mancera y Salamanca, 1994). Morfológicamente este miembro constituye valles en “V”, interfluvios de filos ondulados con crestas agudas ramificadas.

Se caracteriza por erosionarse fácilmente, formando surcos, cárcavas y tierras malas que dan formas de estoraques que alcanzan alrededor de 15 m de altura y sobre él se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo.

De acuerdo con Bueno y Solarte (1994), corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. Hubach (1952) describe niveles lenticulares limo arenosos, con espesores hasta de 5 m.

Los niveles de aspecto “conglomerático” conforman depósitos de gravas y bloques, débilmente consolidados, clasto soportados (60%) y grano soportados (40%), dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m. El tamaño de los cantos varía entre 10 y 30 cm, alcanzando bloques mayores de 1 metro de diámetro. Estos se componen en su mayoría de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción de fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neis micáceo de color amarillo a rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Todos los fragmentos tienen formas redondeadas a sub redondeadas, esfericidad baja a media y mala selección. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa, pardo amarillenta, con algunas variaciones a gris amarillento. Los feldespatos en las rocas se encuentran moderadamente meteorizados.

Los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas compactas, de consistencia firme, ligeramente micáceas, con trazas de materia. Su origen se relaciona con depósitos cíclicos intercanales. El mayor espesor de los niveles limo arenosos se presentan hacia la base, lo que explica periodos más largos de retrabajamiento, bajo un régimen fluvial constante. El predominio de lentes hacia la parte superior y los contactos irregulares podrían indicar periodos de erosión por corrientes intermitentes (Bueno y Solarte, 1994).

Los depósitos se encuentran medianamente meteorizados, presentando poca compactación de éstos, con alta permeabilidad y son fácilmente erodables, lo que facilita el desprendimiento de bloques y cantos en las épocas de fuertes precipitaciones.

El ambiente de depositación de este miembro se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, e interdigitación de facies de corrientes de canal, correspondiendo a la parte proximal y media del Abanico de Bucaramanga. La edad del Miembro Órganos podría abarcar el Pleistoceno medio.

Figura 25. Miembro Órganos sobre la vía a Girón



Fuente. Autor

### 3.3.1.2 Miembro Finos (Qbf).

Éste nivel fue reconocido y definido por Hubach (1952). Se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos) y el nivel

superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano paralelos. Es una extensa capa lenticular horizontal, más o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y arenolimosos, de colores gris verdosos. Los mejores afloramientos se encuentran en las canteras de la antigua ladrillera Bucaramanga y en la empresa de ladrillos y tubos donde es explotada para la producción de ladrillos y tejas. Otros sectores donde aflora son los barrios Ciudadela Real de Minas, Campo Hermoso y La Feria entre otros.

La geometría de sus niveles es tabular a lenticular, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm, de estratificación plana paralela, cruzada y ondulosa

La secuencia del miembro Finos se puede dividir en dos conjuntos:

1) Conjunto Arcilloso: Localizado hacia la base, se caracteriza por ser arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, en donde el espesor varía ampliamente, como en el barrio el Porvenir (9 m) y cuchilla de Palomitas (2 m).

2) Conjunto Arenoso: Se localiza hacia el techo, donde muestra una alternancia de niveles arenolimosos con niveles limoarenosos arcóxicos de colores amarillento a pardo amarillento. Hacia la base de este conjunto predominan costras y un nivel arcilloso pardo oscuro. En la cuchilla Palomitas solo se observan las arcillas grises a verdes en contacto erosivo con el suprayacente miembro Gravoso (Qbg).

El Miembro Finos es, en gran parte del área, un nivel guía de baja permeabilidad.

El ambiente de depositación de este miembro es de depósitos de ambiente aluvial de intercanales poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas.

Figura 26. Miembro “Finos” sobre la vía al Norte



Fuente. Autor.

### **3.3.1.3 Miembro Gravoso (Qbg).**

Definido por Niño y Vargas (1992), ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga, también conforma los escarpes superiores de la parte alta del nacimiento de la quebrada La Iglesia, en los alrededores de los barrios Lagos del Cacique, Diamante II y San Luis. Otras secciones importantes se localizan en los barrios La cumbre, La Feria, Polvorines, Don Bosco y la vía a Café Madrid.

La morfología que presenta el miembro Gravoso es similar a la del Órganos en los sectores de los valles de las quebradas, pero hacia la parte sur de la quebrada la Iglesia la morfología corresponde a colinas suaves onduladas, con un drenaje dendrítico.

Su espesor varía entre 8 y 30 m; presenta niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos son, en su mayor parte, tamaño grava de diámetro promedio

15 cm y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0,8 m de diámetro, sub angulares a sub redondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado. El contacto inferior con el miembro Finos es neto, continuo y suavemente ondulado y el contacto superior con el miembro Limos rojos es gradacional (Niño y Vargas, 1992).

Macroscópicamente se estima que la matriz representa alrededor de un 60% del volumen total, con aproximadamente unas 2/3 partes de arena tamaño medio a grueso y 1/3 de finos. Los cantos están compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas-ígneas del Macizo de Santander, y areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas de las Formaciones Girón y Jordán. La matriz, por su parte, es de composición cuarzo-feldespática micácea (cuarzo, plagioclasa, láminas de muscovita), de consistencia media y de baja cohesión.

Los depósitos que conforman el miembro Gravoso presentan un grado de meteorización medio a alto. Los bajos porcentajes de humedad natural ( $W < 15\%$ ), el predominio granular y el grado de meteorización sugiere que, al menos la parte superficial de este miembro, tiene poca compactación y buena permeabilidad. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de escombros.

#### **3.3.1.4 Miembro Limos Rojos (Qblr).**

Nivel definido por Julivert (1963). Este miembro se localiza en el sector urbanizado de Bucaramanga, aunque no en forma uniforme y se continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca.

Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con relieve semiplano y pendientes entre 2 y 7% ; el drenaje es escaso paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992).

Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se observó la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional.

La parte más superficial de este miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión.

El ambiente de deposición indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo<sup>6</sup>.

Figura 27. Limos rojos y miembro Gravoso

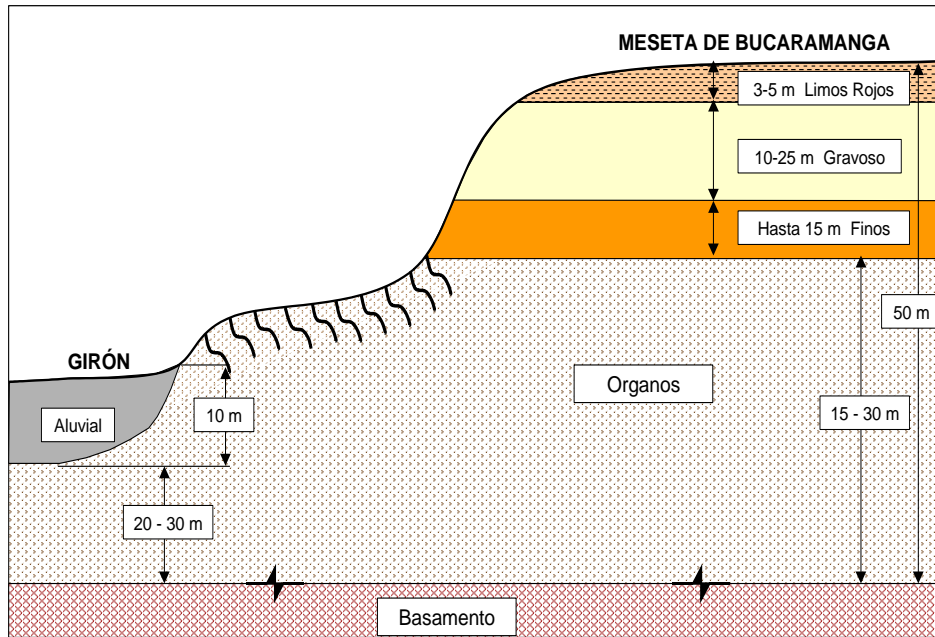


Fuente. Ingeominas, 2001

---

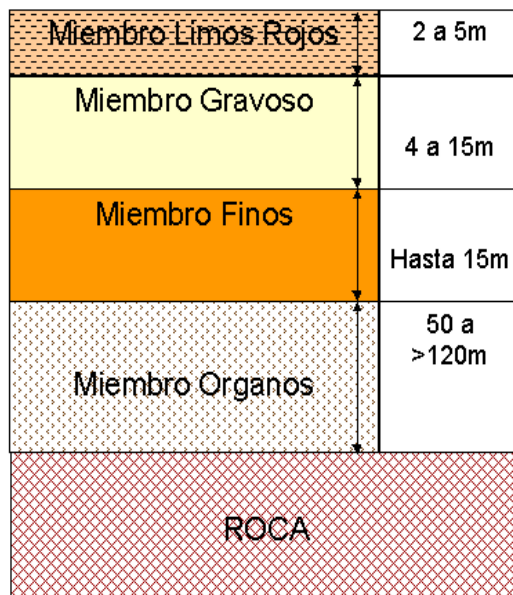
<sup>6</sup> INGEOMINAS, Zonificación Sismo geotécnica Indicativa del Área metropolitana de Bucaramanga. Fase II. Convenio realizado entre la Gobernación de Santander e INGEOMINAS. Bogotá. Junio, 2001(a).

Figura 28. Esquema general de la formación Bucaramanga



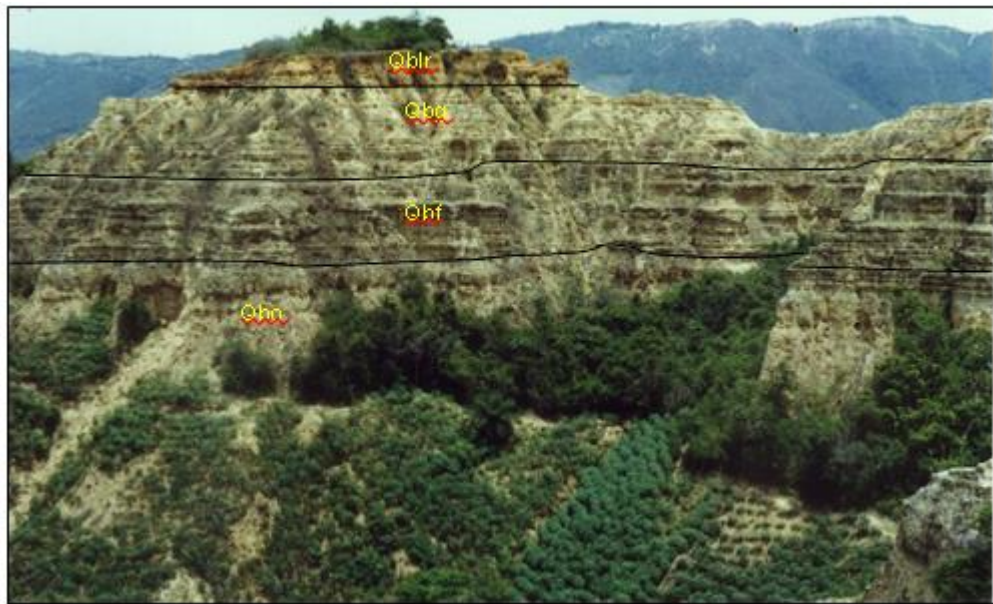
Fuente. Ingeominas, 2001

Figura 29. Espesores promedio de los miembros de la formación Bucaramanga.



Fuente. Ingeominas, 2001

Figura 30. Miembros de la formación Bucaramanga.

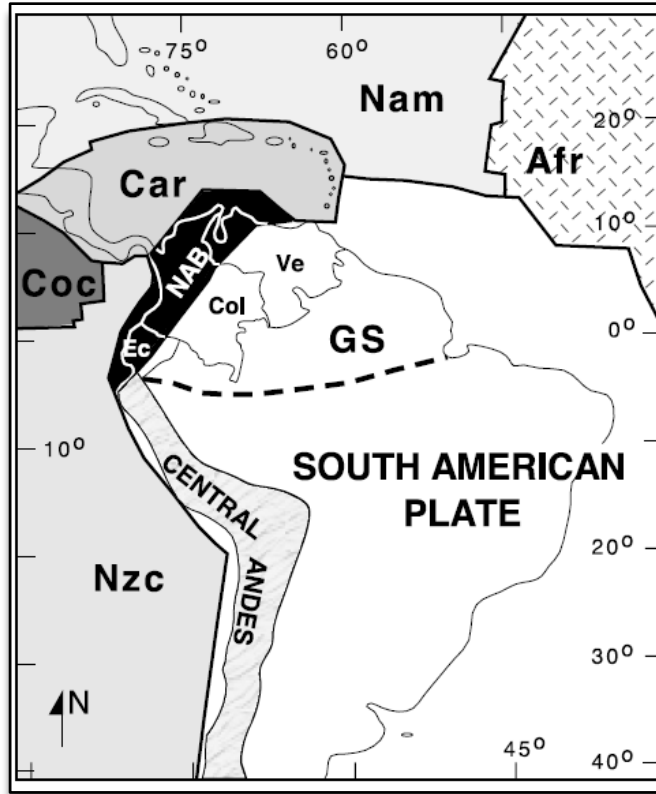


Fuente. Ingeominas, 2001

### 3.4 MARCO GEOTECTÓNICO

El segmento septentrional de Suramérica en donde se encuentran la cadena montañosa de los Andes de Ecuador, Colombia y Venezuela ha sido reconocida como el Bloque Nor-andino el cual corresponde a un segmento geológicamente diferente de la Cordillera de Los Andes (Cediel et al., 2003) ya que es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico (Royero y Clavijo, 2001), en donde ocurre la interacción de tres placas litosféricas principales: la Placa de Nazca ubicada en el Pacífico, la Placa Caribe y la Placa Suramericana en donde se incluye el Bloque Norandino (Cediel et al., 2003; Royero y Clavijo, 2001)

Figura 31. Bloque Norandino en la esquina septentrional de Suramérica y su compleja interacción con las Placas Nazca, Caribe y Suramérica.



Fuente: Tomado de Cediell et al., 2003.

La Placa de Nazca se encuentra subduciendo al Oriente bajo la Placa Suramericana a una tasa de subducción de 65-70 mm/año (Rhea, et al., 2010). La Placa de Nazca se forma en el último episodio de fragmentación de la Placa Farallón a principios del Mioceno cuando la Placa de Cocos se separa completamente reduciendo considerablemente el tamaño de la misma y este fragmento de la Placa Farallón es renombrado como Placa de Nazca (Lonsdale, 2005).

La evolución de la Placa Caribe, la cual se encuentra al norte del territorio colombiano ha sido controversial en las últimas décadas, se han planteado básicamente dos grupos de modelos diferentes: Los modelos “del Pacífico” que

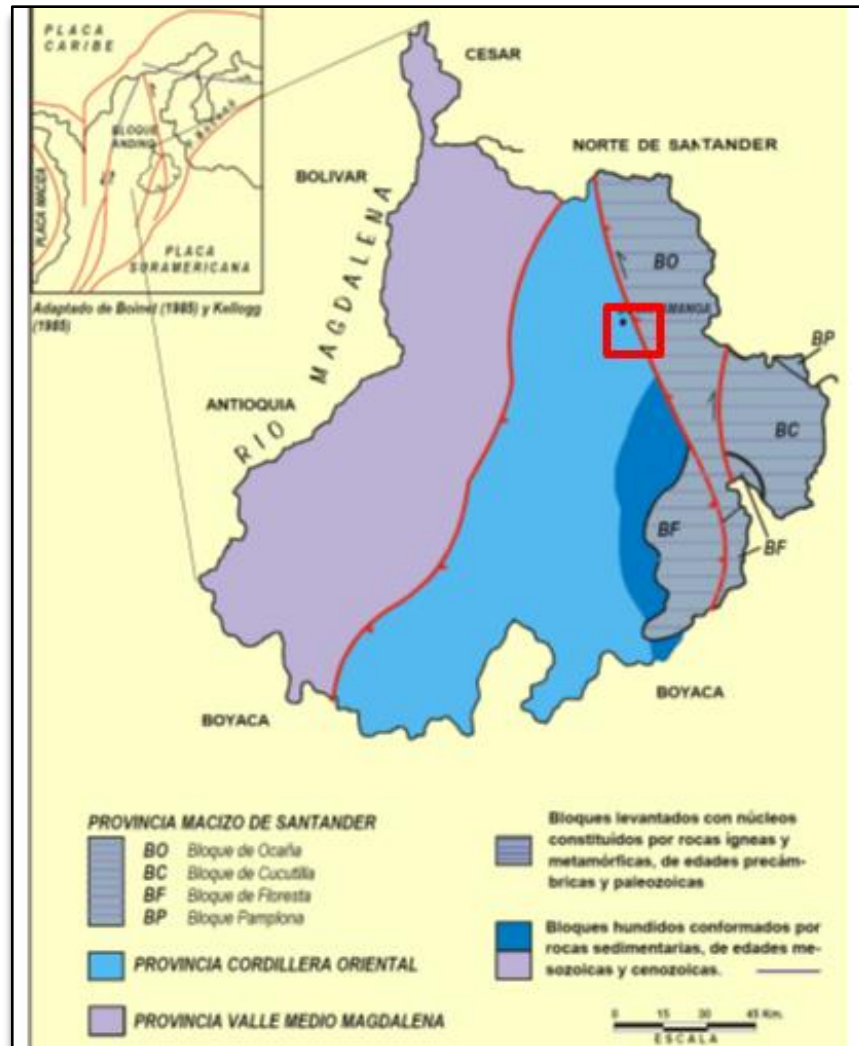
proponen un origen de la corteza oceánica caribe en el Mesozoico Tardío en la región del Pacífico y una deriva a su posición actual en medio de las dos américas (Pindell et al.,1988); y otro modelo alternativo el cual propone la formación de la corteza caribe al oeste de su posición actual pero en medio de las dos américas (Meschede y Frisch, 1998). La tasa de desplazamiento de la placa Caribe con respecto a la placa Suramericana es de aproximadamente 20mm/año (Pérez et al., 2001).

#### **3.4.1 Marco geológico y tectónico del Departamento de Santander**

El Departamento de Santander se encuentra conformado por los Terrenos de Santander, Floresta y el Supraterreno Cretácico en el sentido de Etayo et al. (1983). Sin embargo, el uso de estos términos ha dado lugar una serie de confusiones en la aplicación e interpretación de los mismos, por tal razón Royero y Clavijo han optado por subdividir el Departamento de Santander en tres provincias: el Macizo de Santander, la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena.

La Provincia del Macizo de Santander se encuentra al oriente de la Falla de Bucaramanga y esta subdividida en los bloques Floresta, Cucutilla, Pamplona y Ocaña. En términos generales, estos bloques incluyen fallas inversas y sistemas de fallamiento en pequeños bloques y la presencia de anticlinales y sinclinales con direcciones que van desde el SE-NW hasta SW-NE. Esta provincia está constituida principalmente por rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas; rocas ígneas paleozoicas y mesozoicas y, rocas sedimentarias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas (Royero y Clavijo, 2001).

Figura 32. Esquema tectónico del Departamento de Santander. En el cuadro rojo se encuentra el área de estudio.



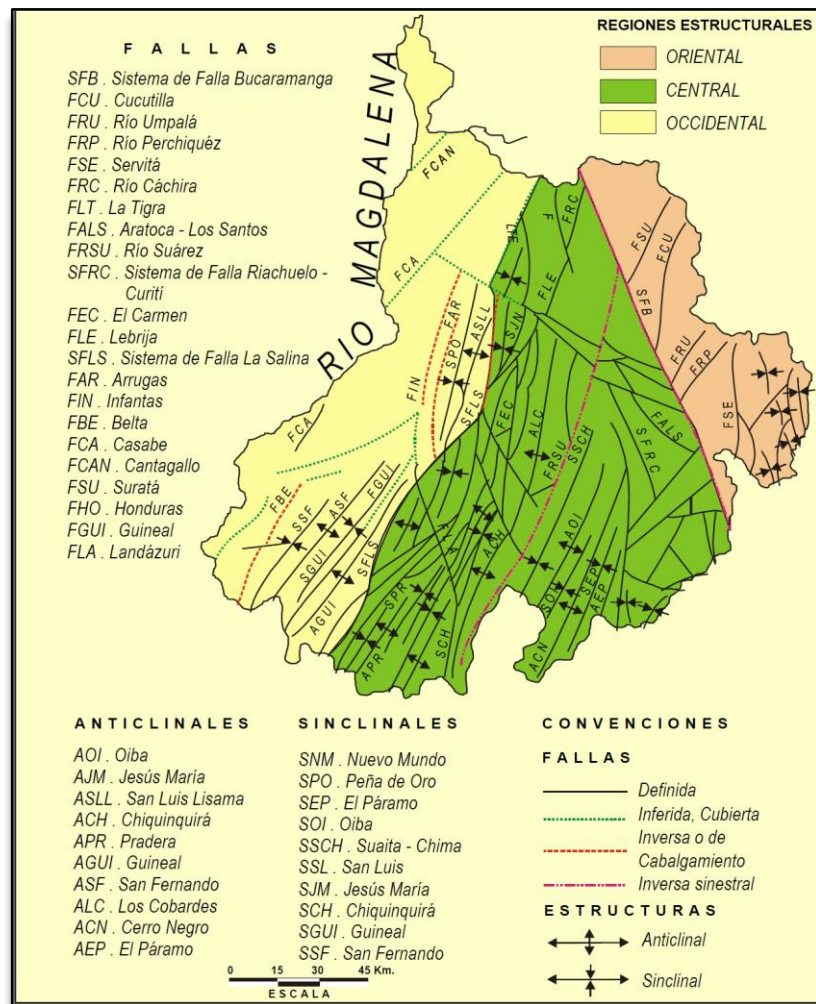
Fuente: Modificado de Royero y Clavijo, 2001

La Provincia de la Cordillera Oriental se encuentra entre la Falla de Bucaramanga y la Falla La Salina. Se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales amplios limitados por fallas inversas de direcciones NE a NW. Esta provincia se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas (Royero y Clavijo, 2001). La Provincia del Valle Medio del Magdalena se encuentra al occidente del

departamento y está caracterizada tectónicamente por un estilo estructural de plegamiento con anticlinales y sinclinales amplios y suaves. Las rocas presentes en esta provincia son sedimentarias mesozoicas y cenozoicas (Royero y Clavijo, 2001).

A continuación encuentran las principales estructuras que se encuentran en el Departamento de Santander, y posteriormente se encuentra una breve descripción de las estructuras que tienen mayor interés en el presente estudio.

Figura 33. Esquema estructural del Departamento de Santander.



Fuente: Tomado de Royero y Clavijo, 2001.

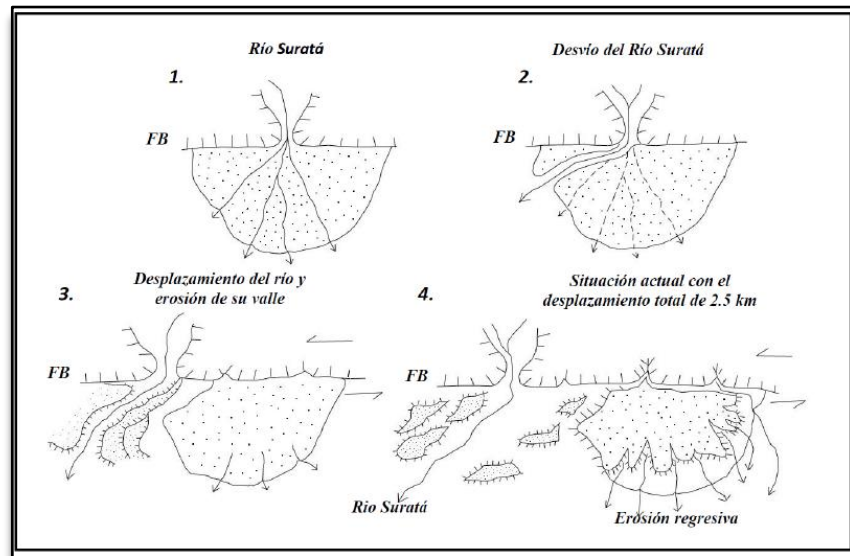
#### **3.4.1.1 Falla de Bucaramanga**

Corresponde al segmento meridional de la estructura considerada anteriormente como la Falla Bucaramanga-Santa Marta en el sentido de Ujueta (2003) y París et al. (2000). Esta falla corresponde a una falla de rumbo con movimiento sinistral y dirección NNW. La cual muestra un desarrollo geomorfológico bastante evidente que incluye lomos de presión, lomos de obturación, silletas de falla, cauces desviados, lagos de falla entre otros (Royero y Clavijo 2001, Ward y Goldsmith, 1973). Una característica destacable de esta falla es el desplazamiento sinistral del Río Suratá de 2.5 km el cual se ha considerado como el afluente que apporto los sedimentos al Abanico Aluvial de Bucaramanga (Diederix et al., 2008), según Jiménez et al. (2014) en base a investigaciones de paleomagnetismo del abanico, la Falla de Bucaramanga tiene una tasa de desplazamiento de 3mm/año como máximo.

#### **3.4.1.2 Sistema de Fallas del Suarez**

Dentro de este sistema de fallas se incluyen las Fallas del Suarez, del Rio de Oro y la Falla de Chimitá-Café Madrid (INGEMINAS, 2009). Se extiende por una longitud de 120 km desde Barbosa hasta la Falla de Bucaramanga al norte; su trazo tiene una dirección N20°E y una inclinación hacia el occidente (Royero y Clavijo, 2001).

Figura 34. Desvío del Río Suratá debido a la acción de la Falla de Bucaramanga.



Fuente: Tomado de Diederix et al., 2008.

### 3.5 GEOMORFOLOGÍA

Huggett en el 2007, define a la Geomorfología como el estudio de las características físicas de la superficie terrestre, sus formas de relieve como ríos, colinas, llanuras, playas, dunas de arena, Terrazas y otras innumerables algunos autores también incluyen las geoformas de origen submarino, anteriormente otros autores como Bloom en el 2005 habían propuesto una definición de esta como el estudio científico a través del análisis, descripción sistemática y entendimiento de las formas de la superficie terrestre y los procesos que las forman. Estas geoformas se encuentran asociadas de forma directa a factores como la climatología, la hidrografía, geología, pedología, entre otros.

Para un estudio detallado se considera que un insumo primordial para la homogenización de las unidades con características de comportamiento geomecánico similar es el mapa de categoría geomorfológica, el cual para la escala

de trabajo de este estudio correspondería a un mapa de elementos geomorfológicos, en donde su objetivo fundamental se centra en identificar y caracterizar las geoformas desde los siguientes puntos de vista: morfogénesis, morfodinámica y morfometría (SGC, 2015).

### **3.5.1 Morfodinámica**

La morfodinámica trata de los procesos activos en el presente o aquellos que se pueden activar en el futuro. Se refiere a la dinámica exógena, relacionada con la actividad de los agentes como el viento, agua, hielo y acción de la gravedad terrestre, que modifica las geoformas preexistentes (Carvajal, 2011).

Los procesos hacen referencia a los cambios físicos y químicos (Meteorización, erosión y depositación), que generan modificación de los materiales y las formas superficiales de la tierra, definiendo un equilibrio dinámico de las geoformas (GRADACION = DEGRADACIÓN Y AGRADACIÓN DE MATERIALES) – (Thornbury, 1960; en Carvajal, 2011). Estos eventos naturales que son específicos de cada ambiente morfogenético, afectan y modelan la superficie terrestre con diferentes grados de intensidad, imprimiéndole al terreno características propias de cada ambiente (Carvajal, 2011).

Con esto, se puede llegar a elaborar mapas que identifican y localizan los diferentes fenómenos de remoción en masas (tanto antiguas como recientes y actuales) y de erosión, que han ocurrido y ocurren en diferentes sectores del área de estudio (CORPES e INGEOMINAS; 1998).

Estos procesos morfodinámicos corresponden a procesos denudativos, los cuales comprenden los fenómenos de remoción en masa y la erosión. Estos primeros serán explicados con mayor detalle en el capítulo de Inventario de Deslizamientos.

Con respecto a los procesos de erosión, estos corresponden al fenómeno definido como el resultado de los procesos de separación, transporte y acumulación de partículas, productos de la meteorización y de la sedimentación, por acción de los llamados agentes erosivos siendo los principales el agua, el viento, el hielo y los organismos vivos, los cuales se constituyen en medios de transporte (CORPES e INGEOMINAS; 1998). Para su clasificación se usa la nomenclatura del Manual de Protección Geotécnica y Ambiental (1991) y la planteada por Vargas, 1989 (En CORPES e INGEOMINAS; 1998)

## **3.6 EVALUACIÓN HIDROLÓGICA**

### **3.6.1 Descripción general**

Los taludes correspondientes a la escarpa de la meseta de Bucaramanga, han sufrido una serie de modificaciones en su uso y su cobertura, como consecuencia de actividades antrópicas, principalmente dirigida a la construcción de viviendas sobre terrenos de altas pendientes, la mayoría de las veces sin criterios técnicos, y sin la autorización ni supervisión de las entidades competentes.

Este tipo de construcción sobre los taludes de la escarpa, modifican las condiciones morfológicas del terreno por el retiro total o parcial de la cobertura vegetal nativa, con lo cual el suelo queda desprotegido ante factores externos, entre los cuales se debe prestar interés particular a las precipitaciones.

Las precipitaciones prolongadas y/o de intensidades altas, son generadores de procesos de erosión y efectos concatenados de movimientos en masa, principalmente en terrenos pendientes con modificaciones en el uso y la cobertura del suelo.

Las viviendas de los sectores conocidos como La Independencia, Bosque Norte y Nueva Colombia, se localizan en su mayoría sobre taludes correspondientes a la

escarpa de la meseta, cuyas modificaciones en las condiciones originales del terreno, pueden desencadenar en su desestabilización y en eventos de deslizamiento, por lo cual se hace necesaria la ejecución de estudios detallados que determinen el nivel de riesgo al que están expuestos los habitantes de estos sectores, así como las acciones necesarias para su mitigación.

El presente informe evalúa las precipitaciones y los caudales de los flujos de escorrentía en los sectores antes mencionados, donde la propia construcción inadecuada de viviendas puede generar un riesgo por erosión superficial y remoción en masa.

Con base en un análisis técnico de las precipitaciones correspondientes a diferentes periodos de retorno, se calculan sus correspondientes caudales de escorrentía y se proponen obras hidráulicas para su eficiente control, encaminadas a ser complementarias de las demás obras y trabajos de estabilización requeridos en los taludes del sector de interés.

El análisis hidrológico se ejecuta con base en la información hidrometeorológica disponible, con la cual se estiman las precipitaciones esperadas correspondientes a los diferentes periodos de retorno.

Con base en las características del área aferente al sector de interés, se escoge la metodología más adecuada para la estimación de los caudales de escorrentía correspondientes a cada periodo de retorno.

Una vez estimados los caudales por escorrentía que puedan llegar a presentarse para diferentes periodos de retorno, se analiza la necesidad de proyectar obras hidráulicas, como complemento de las obras de estabilización.

### 3.6.2 Climatología

El IDEAM realiza una estimación de los principales parámetros meteorológicos mensuales para la ciudad de Bucaramanga, resumida a continuación, la cual permite vislumbrar el comportamiento general del clima para el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Tabla 5. Datos Meteorológicos Bucaramanga – Medias Mensuales Estación Palonegro

MEDIOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOS	SEP	OCTU	NOVIEM	DICIEM
TEMP. MEDIA	21.1	21.4	21.6	21.4	21.3	21.3	21.3	21.3	21.1	20.6	20.7	20.7
T.MED MAX	27.3	27.6	27.9	27.5	27.6	27.6	27.6	28.2	28	27.6	26.9	26.9
T.MED MIN	16.7	16.9	16.9	17.2	17.3	17	16.6	16.4	16.5	16.3	17	16.8
T.MAX ABS	29.2	30.5	29.6	29	29	29.2	29	30.2	29.4	28.8	29	28.4
T.MIN ABS	15	15.4	15.6	16.7	16.6	15.6	14.2	12.4	15.5	13	15.8	15.6
PRECIPITACION	52.4	70.6	131.9	152.9	123.5	89	84.4	91.8	92.6	157	110.9	57.9
No.DIAS	8	9	14	18	19	17	18	20	18	20	14	9
HUMEDAD	82	83	84	87	88	87	85	84	86	89	90	88
BRILLO	216.4	163.1	149.1	132.7	152.1	142.6	172.2	155.7	153.7	145.4	148.1	188.6
EVAPORACION	135.5	128.7	135.2	117.8	122.5	110.4	124	121.8	121.1	115.7	127.7	116.5
NUBOSIDAD	4	5	5	6	6	6	5	6	6	6	6	5

Fuente: Consorcio M&CI, 2009

En los numerales siguientes se describen las características climatológicas del área de estudio, con base en información hidrometeorológica de la estación UIS, debido a su cercanía con el área de interés.

### 3.6.3 Precipitación

A continuación se resume las precipitaciones multianuales estimadas para el área de interés, tomadas de la estación UIS, localizada a 300 m de la zona oriental del área de estudio, y a 1,7 Km del sector más occidental.

Tabla 6. Precipitación Media Mensual Estación UIS

Medios	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación	52.4	70.6	131.9	152.9	123.5	89.0	84.4	91.8	92.6	157.0	110.9	57.9
Nº días	8	9	14	18	19	17	18	20	18	20	14	9
T. máx. abs.	29.2	30.5	29.6	29.0	29.0	29.2	29.0	30.2	29.4	28.8	29.0	28.4
T. mín. abs.	15.0	15.4	15.6	16.7	16.6	15.6	14.2	12.4	15.5	13.0	15.8	15.6
T. máx. med.	27.3	27.6	27.9	27.5	27.6	27.6	27.6	28.2	28.0	27.6	26.9	26.9
Temperatura	21.1	21.4	21.6	21.4	21.3	21.3	21.3	21.3	21.1	20.6	20.7	20.7
T. mín. med.	16.7	16.9	16.9	17.2	17.3	17.0	16.6	16.4	16.5	16.3	17	16.8
Humedad	82	83	84	87	88	87	85	84	86	89	90	88
Brillo	216.4	163.1	149.1	132.7	152.1	142.6	172.2	155.7	153.7	145.4	148.1	188.6
Evaporación	135.5	128.7	135.2	117.8	122.5	110.4	124.0	121.8	121.1	115.7	127.7	116.5
Nubosidad	4	5	5	6	6	6	5	6	6	6	6	5

Fuente: Consorcio M&CI, 2009

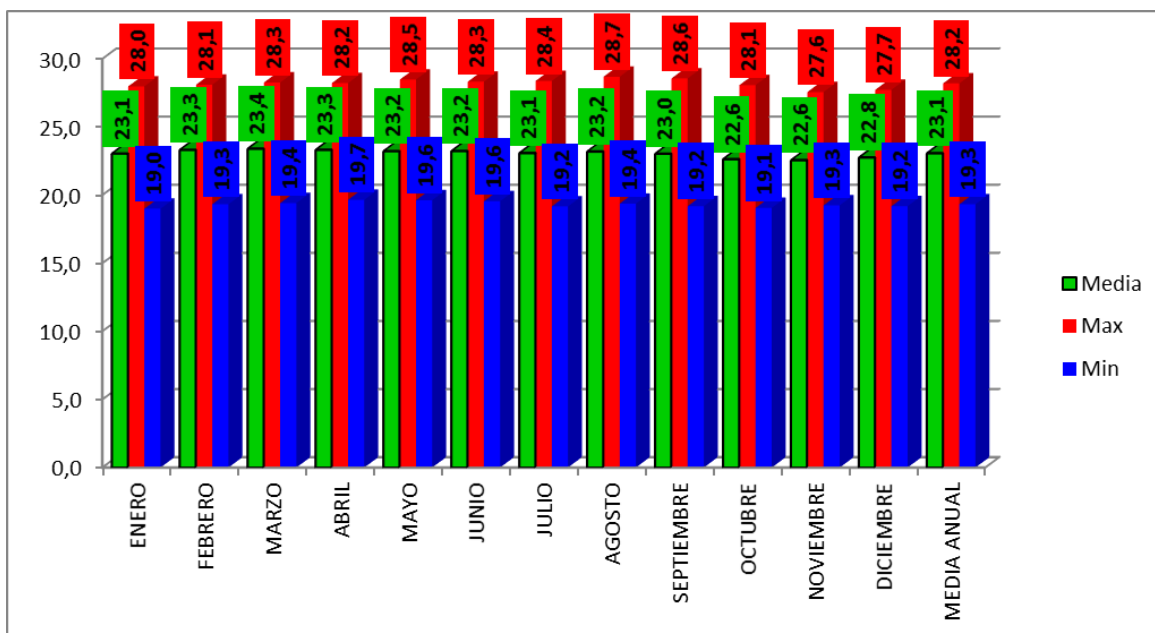
De acuerdo con la anterior tabla, el régimen de lluvias en el área de interés es bimodal, con verano severo en los meses de Diciembre y Agosto, y con dos épocas de lluvia, la primera entre Marzo y Mayo, y la segunda entre Septiembre y Noviembre.

### 3.6.4 Temperatura

Para la determinación de la temperatura ambiente, se seleccionó la estación climatológica de la UIS, la más cercana al sector en estudio, considerada como confiable y representativa del área metropolitana de Bucaramanga.

A continuación se resumen las temperaturas medias mensuales en grados centígrados para la estación UIS (2319504), según datos suministrados por el IDEAM. El sector en estudio posee una temperatura promedio de 23,1 grados centígrados.

Figura 35. Valores Medios Mensuales de Temperatura – Estación UIS

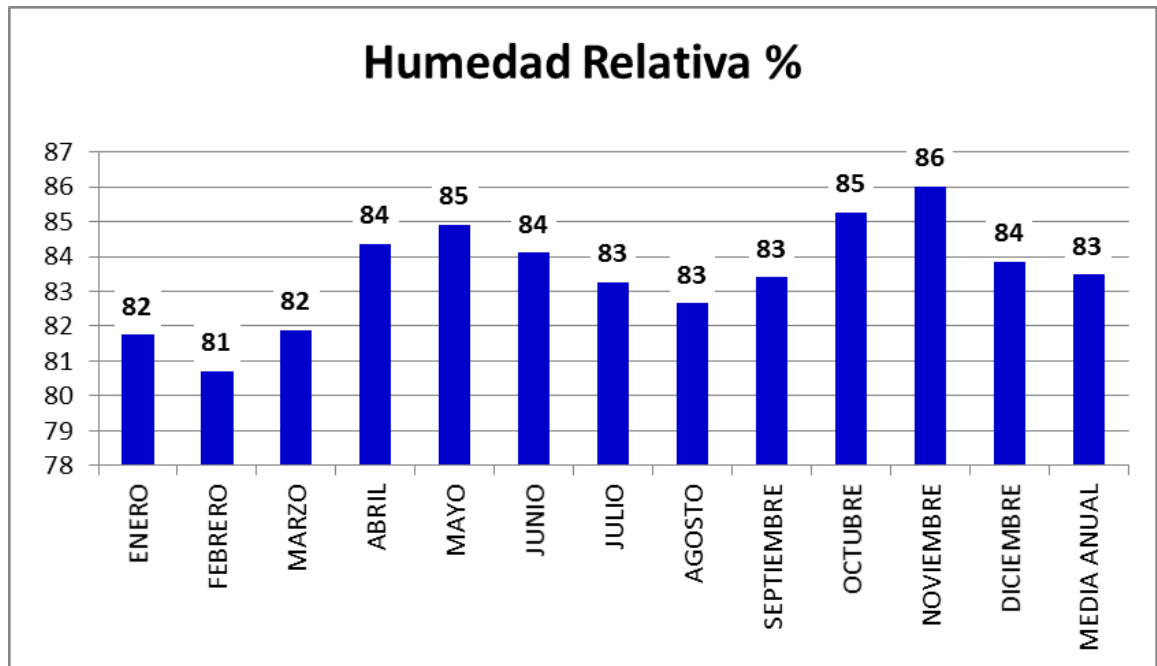


Fuente: Consorcio M&CI, 2009

### 3.6.5 Humedad relativa

En cuanto a la humedad relativa (%) promedio, con base en la cantidad y confiabilidad de la información disponible, se escogió como representativa la Estación UIS. Los valores de humedad relativa de la Estación UIS, son congruentes con los periodos lluviosos.

Figura 36. Humedad Relativa (%) Estación UIS – Media Mensual Multianual

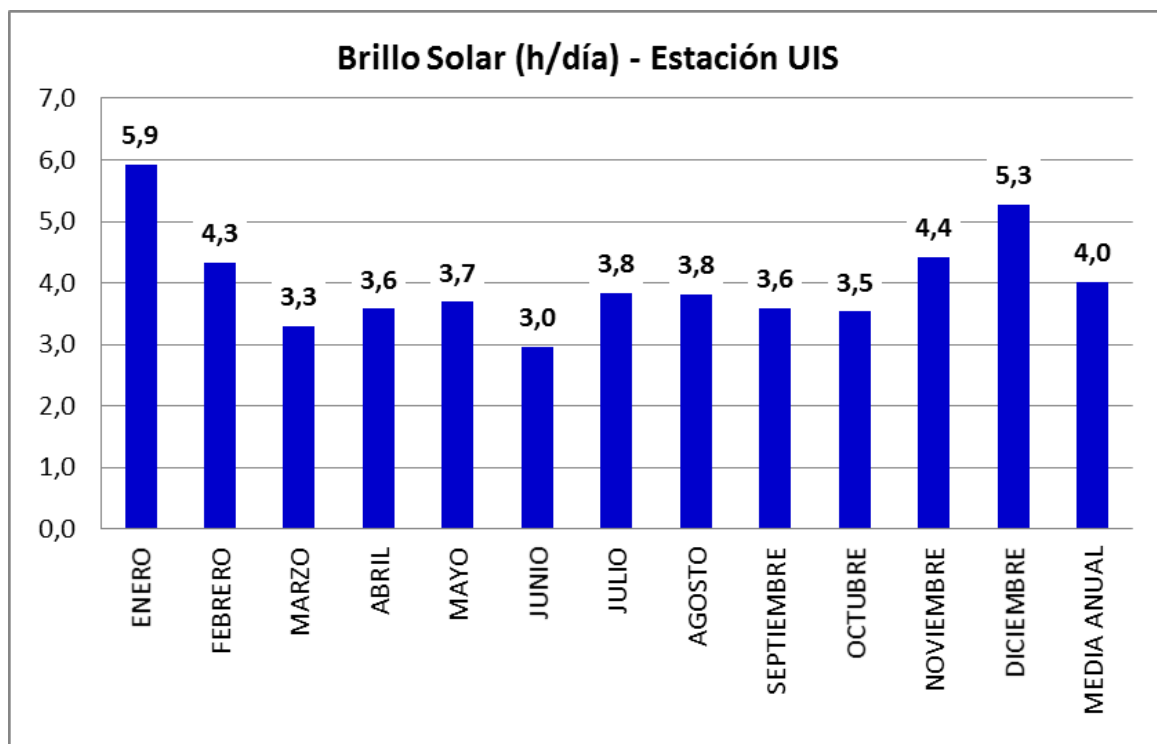


Fuente: Consorcio M&CI, 2009

### 3.6.6 Brillo solar

Las estaciones UIS y Palonegro son las que cuentan con la mayor cantidad de información y con un nivel adecuado de confiabilidad de brillo solar para la ciudad de Bucaramanga. Por su cercanía a la zona de estudio se presenta como representativa del brillo solar, a la Estación UIS. Con base en los registros los meses con mayor número de horas de brillo solar son diciembre y enero.

Figura 37. Brillo Solar (horas/día) Estación UIS – Media Mensual Multianual



Fuente: Consorcio M&CI, 2009

### 3.6.7 Parámetros geomorfológicos del área de estudio

Pese a no evidenciarse la existencia de una quebrada al interior del área de estudio, se presenta un resumen de los principales parámetros geomorfológicos del área de estudio.

#### 3.6.7.1 Áreas

Aunque no existen cuerpos de agua, con base en la topografía se determinaron 4 franjas de escorrentía intermitente, que pueden llegar a conducir flujos concentrados durante eventos de precipitación.

Figura 38. Áreas Aferentes de Escorrentía



Fuente: Autor

Se delimitaron una serie de áreas aferentes por sectores, pese a que la topografía ni la observación in situ identifican una franja definida de escorrentía para estas áreas adicionales. No obstante estas áreas aferentes permiten estimar caudales aportantes, que servirán posteriormente como insumo, en el cálculo de caudales de diseño para obras hidráulicas complementarias a las obras geotécnicas.

Tabla 7. Información básica franjas de escorrentía intermitente

Drenajes	Longitud (m)	Coordenada Inicio		Coordenada Final	
		Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y
D1	41,04	1104851,46	1281544,74	1104861,49	1281583,86
D2	77,83	1105000,08	1281541,38	1104963,42	1281609,94
D3	92,13	1105108,49	1281553,75	1105082,92	1281642,13
D4	148,71	1105640,70	1281769,97	1105689,32	1281900,00

Fuente: Autor

Tabla 8. Áreas Aferentes de Escorrentía delimitadas

<b>Nombre</b>	<b>Áreas (m)</b>
A1	14370.60
A2	15058.20
A3	10698.35
A4	9079.01
A5	4217.42

Fuente: Autor

### 3.6.7.2 Ancho de sección

Debido a que el área de estudio no corresponde a una cuenca hidrológica, no puede denominarse como una sección hidrológica. No obstante el área de estudio tiene una longitud total de 1450 m, y un ancho que varía entre 100 m y 360 m, aproximadamente.

Si el ancho ( $W$ ) se define como la relación entre el área ( $A$ ) y la longitud de la cuenca ( $L$ ); de forma que:  $W = A/L$ , se obtiene un ancho medio de 207 m.

Ahora bien, pese que el área del proyecto no conforma una Microcuenca, ni contiene alguna, si se definieron 4 franjas de escorrentía o drenajes intermitentes (D1, D2, D3 y D4), con sus correspondientes áreas aferentes de escorrentía (E1, E2, E3 y E4), cuyo cálculo de sección media.

### 3.6.7.3 Factores de forma

- Factores de forma de Horton

Las observaciones de un buen número de cuencas reales en todo el mundo, permiten establecer una relación general entre el área de la cuenca A y el área de un cuadrado de longitud L, siendo L la longitud del cauce principal:

$$\frac{A}{L^2} = \frac{A^{-0.136}}{2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{Despejando: } L = 1.41 * A^{0.568}$$

No obstante, existen un sinnúmero de cuencas cuya relación entre la longitud y el área, dista por mucho de la media, por lo que a medida que el área aumenta, su relación A/L<sup>2</sup> disminuye, lo cual indica una tendencia al alargamiento en cuencas grandes.

La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por lo que se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de cuantificar este efecto por medio de un valor numérico. Horton sugirió un factor adimensional de forma R<sub>f</sub>, como índice de la forma de una cuenca así:

$$R_f = \frac{A}{L_b^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde A es el área de la cuenca y L es la longitud de la misma, medida desde la salida hasta el límite de la hoya, cerca de la cabecera del cauce más largo, a lo largo de una línea recta. Este índice y su recíproco han sido usados como indicadores de la forma del hidrograma unitario.

#### **3.6.7.4 Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius**

Este está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \text{ (Ecuación 7)}$$

Por la forma como fue definido se espera que  $K \geq 1$ ; obviamente para el caso  $K = 1$ , obtenemos una cuenca circular.

Tabla 9. Evaluación del Coeficiente de Gravelius

<b>K</b>	<b>Forma</b>
1.00 - 1.25	Redonda
1.25 - 1.50	Ovalada
1.50 - 1.75	Oblonga

Fuente: Gravelius

### **3.6.7.5 Pendiente promedio de la cuenca**

Este parámetro permite estimar un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca, de utilidad principalmente para cuencas en área en estado natural, no obstante la zona de estudio se encuentra modificada en su mayoría, endurecida mediante construcción de vivienda.

Las pendientes para los puntos dados por las intersecciones de la cuadrícula se calculan teniendo en cuenta la diferencia de las dos curvas de nivel entre las cuales el punto quedó ubicado y dividiéndola por la distancia horizontal menor entre las dos curvas de nivel, pasando por el punto ya determinado.

Los resultados de los parámetros geomorfológicos básicos, descritos en los numerales anteriores, se resumen a continuación.

Tabla 10. Parámetros geomorfológicos básicos

Drenajes	Longitud (m)	Área Aferente (m <sup>2</sup> )	Ancho Medio W (L)	Horton Rf	Perimetro (m)	Gravelius		Pendiente Media Cuenca (%)
						K	Forma	
D1	41,04	7257,90	176,85	4,31	344,44	1,14	Redonda	27,9
D2	77,83	5867,28	75,39	0,97	307,63	1,13	Redonda	38,7
D3	92,13	11591,39	125,81	1,37	417,12	1,09	Redonda	42,7
D4	148,71	23318,56	156,81	1,05	635,95	1,17	Redonda	34,3

Fuente: Autor

### 3.6.7.6 Evaluación de la precipitación

Los caudales de escorrentía generados por precipitación son relevantes en los análisis de amenaza que se realizarán en el área de estudio, ya que durante eventos extremos pueden llegar a ser factores detonantes de movimientos en masa, principalmente porque la construcción de viviendas en el sector modificó las condiciones originales del terreno por sus consecuentes variaciones en el uso y la cobertura del suelo, con lo cual se endurece el terreno, se reduce la infiltración, y se incrementan los caudales instantáneos.

Se realizó un análisis de la calidad de la información hidro-meteorológica disponible, encontrándose que en general las estaciones localizadas por fuera de la periferia del área metropolitana, presentan datos con una menor área de cubrimiento y con un menor grado de confiabilidad, mientras que las estaciones localizada en las proximidades de las cabeceras municipales, mejoran tanto la confiabilidad del registro como el volumen de información disponible.

Se elaboró un inventario de información disponible, principalmente de las estaciones con registros climatológicos (CO, CP y SP), y las de tipo Pluviométrico (PM) y Pluviográfico (PG), por ser ésta la información de mayor relevancia para el estudio.

### **3.6.7.7 Información hidrológica**

El Área Metropolitana de Bucaramanga cuenta con una gran cantidad de estaciones hidro-meteorológicas, instaladas principalmente por la necesidad de monitorear la incidencia de las precipitaciones en los fenómenos erosivos y de remoción en masa que se presentan en los límites de la meseta.

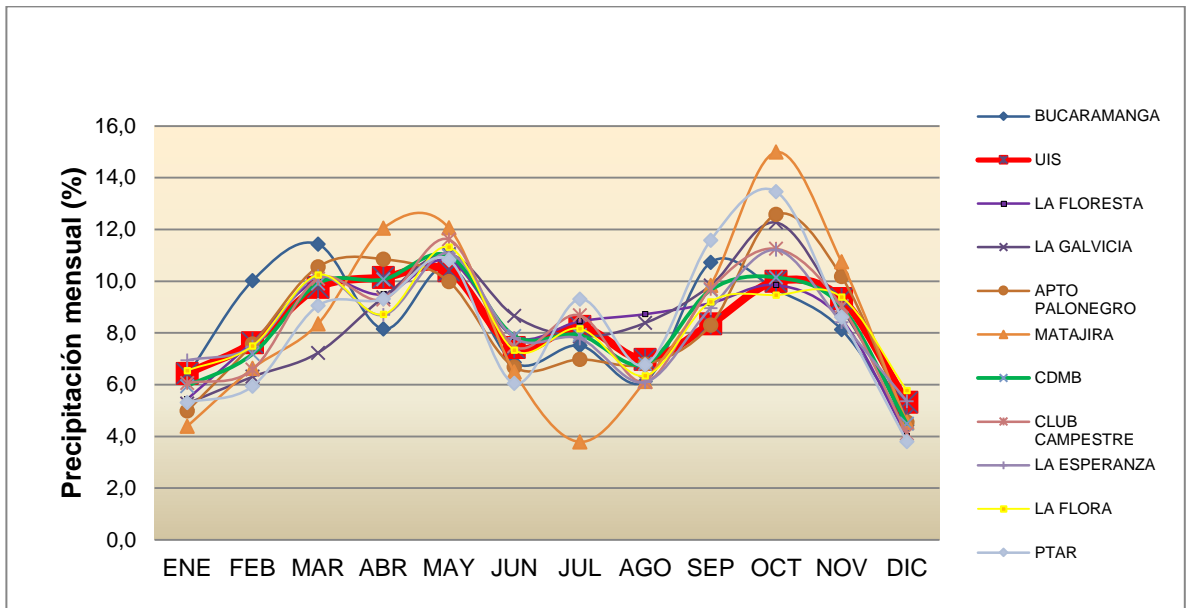
Una evaluación preliminar de la red de monitoreo, arroja que en los municipios de Bucaramanga, Lebrija, Girón, Piedecuesta, Floridablanca, Tona, Rionegro y Matanza, se encuentran 32 estaciones activas, de las cuales sólo la mitad cuentan con información consecutiva en volumen y confiabilidad adecuados, incluyendo tanto estaciones pluviométricas como pluviográficas.

Dentro de las estaciones pluviográficas (automatizadas) se escogen inicialmente las más cercanas a la zona de estudio: Bucaramanga, La Floresta, Galvicia, UIS, palonegro, Matajira, Club Campestre, La Esperanza, La Flora, PTAR Río Frío y La Esperanza.

### **3.6.7.8 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN – ESTACIÓN REPRESENTATIVA**

Precipitación Media Mensual: Las 11 estaciones preseleccionadas se localizan dentro de un radio de 10 Km de la zona de estudio. Con la información de precipitación mensual de las 11 estaciones preseleccionadas, se elaboró un histograma de precipitación.

Figura 39. Histograma Estaciones representativas – Precipitación Media Anual Porcentual



Fuente: Consorcio M&CI, 2009

### 3.6.7.9 Polígonos de Thiessen

La metodología de los polígonos de Thiessen es útil para determinar la estación más representativa de un área aferente de precipitación, o bien la lluvia media en cuencas de mayor tamaño. Se aplica cuando se sabe que las medidas de precipitación en los diferentes pluviómetros sufren variaciones, teniendo además el condicionante que la cuenca es de topografía suave o en lo posible plana.

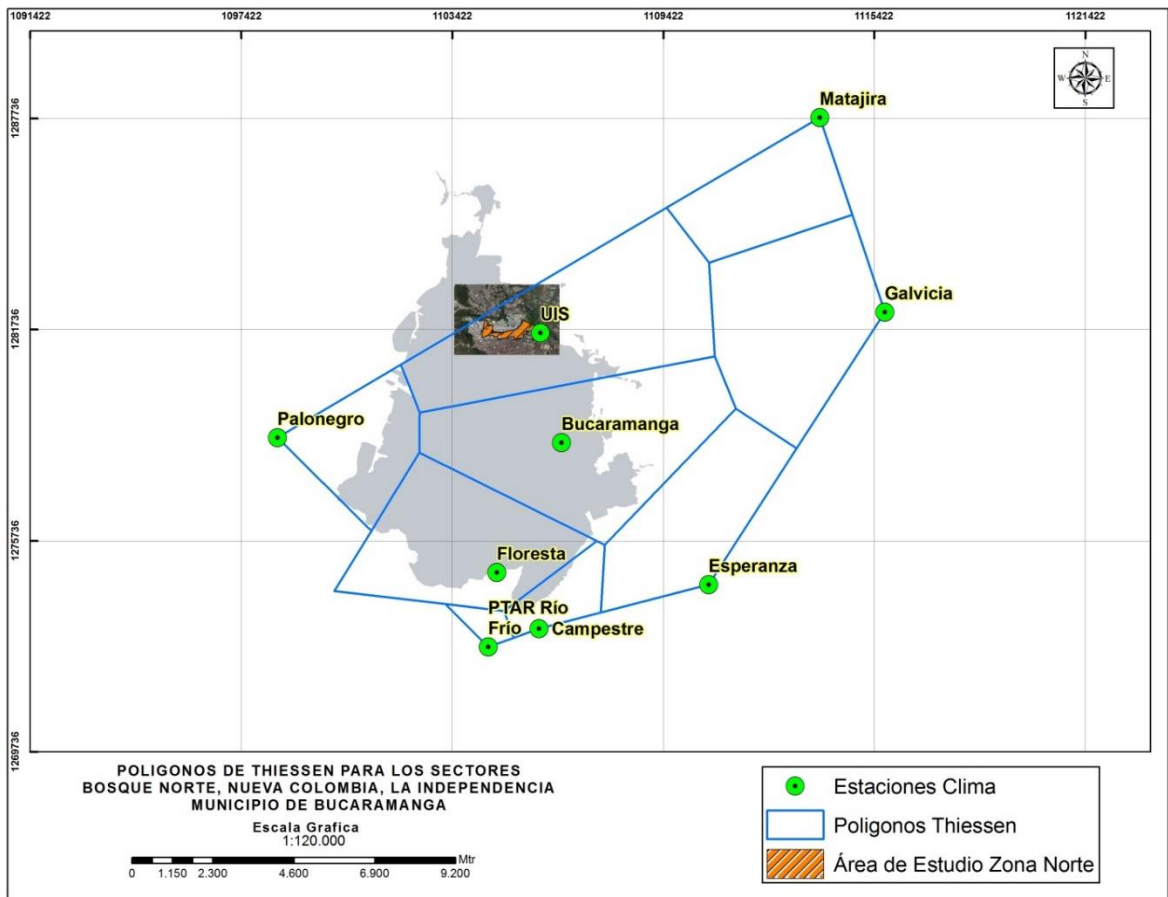
El procedimiento para el cálculo es el siguiente:

- Se unen los pluviómetros adyacentes con líneas rectas, formando triángulos que no se crucen entre sí.
- Se trazan mediatrices a las líneas que unen los pluviómetros. Recordar que una mediatriz es una línea recta perpendicular a un segmento de recta y que parte de su punto medio.

- Se prolongan las mediatrices hasta el límite de la cuenca.
- Se delimita el área formada por las mediatrices para cada pluviómetro, que corresponde al área de influencia de cada estación.

La conformación de los polígonos de Thiessen, arroja que la totalidad del área de estudio se encuentra dentro del área de influencia de la Estación Pluviográfica UIS.

Figura 40. Polígonos de Thiessen para determinar la estación representativa en la zona de estudio

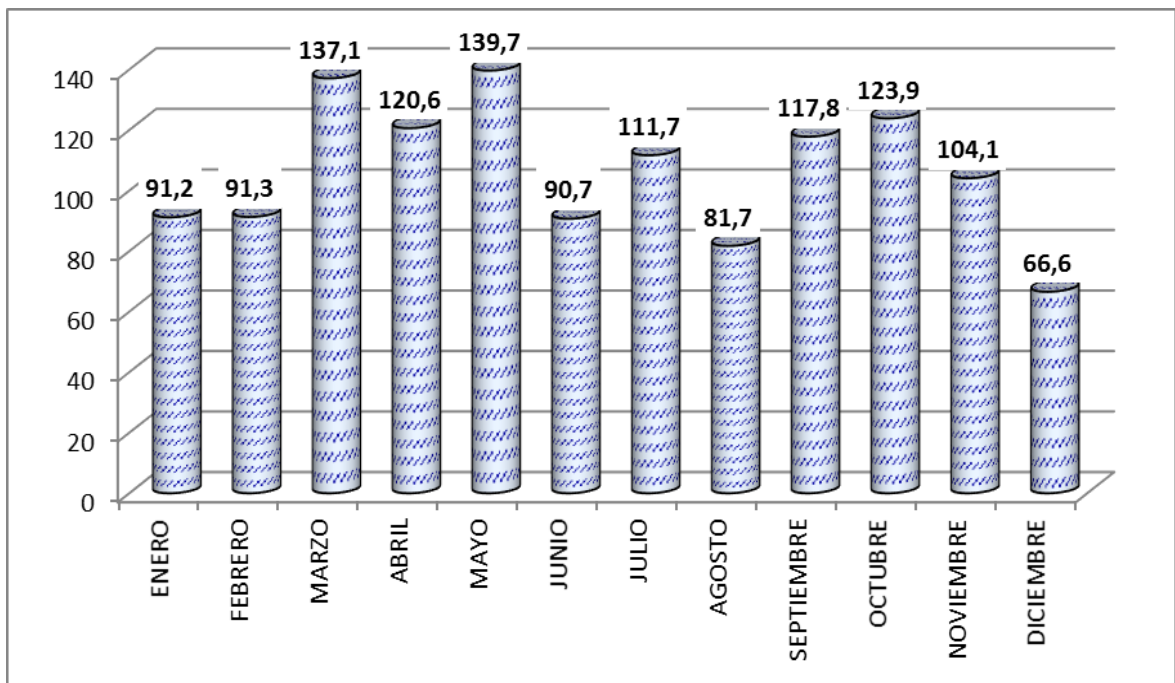


Fuente: Autor

### 3.6.7.10 Estación Representativa

Con base en las áreas de influencia de cada estación, obtenidas mediante el método gráfico de los polígonos de Thiessen, se escoge como representativa la estación UIS, cuya precipitación media mensual se muestra a continuación.

Figura 41. Precipitación Media Mensual Estación UIS



Fuente: Autor

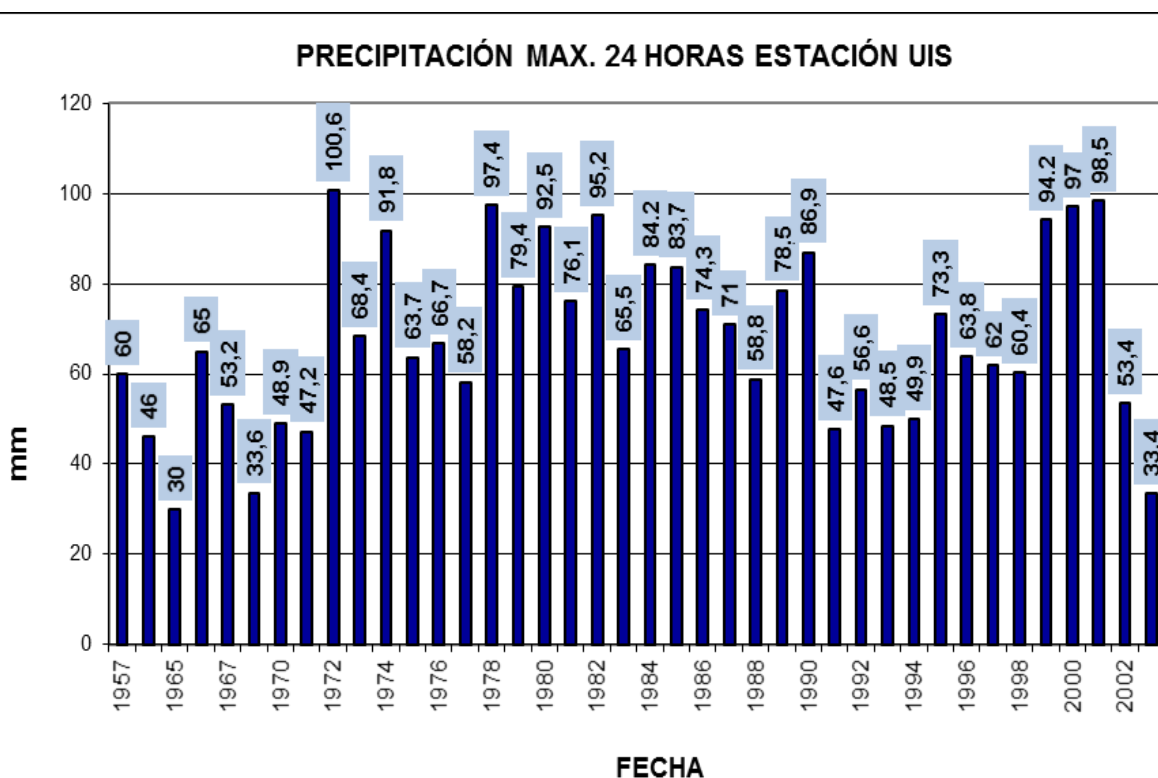
Con base en las precipitaciones medias multianuales de la Estación UIS, representativa para el sector de estudio, se observa un régimen de tipo bimodal, con dos temporadas lluviosas, entre marzo y mayo, así como entre septiembre y noviembre, con picos (precipitación media) del orden de 139,7 mm y 123,9 mm respectivamente, así como dos temporadas de bajas precipitaciones alrededor de

los meses de diciembre y junio, con precipitaciones que pueden bajar hasta los 66.6 mm.

### 3.6.7.11 Precipitación Máxima en 24 horas

Se analizaron los valores de precipitación máxima en 24 horas para la estación representativa. La aplicación de los métodos de prueba de bondad y análisis gráfico arrojaron resultados semejantes, arrojando la distribución de Gumbel como la que más se ajusta a la serie de datos.

Figura 42. Precipitación Máxima en 24 Horas – Estación UIS



Fuente: Autor

### **3.6.7.12 Precipitaciones de Corta Duración y Alta Intensidad**

Las precipitaciones son un aspecto influyente en la estabilidad de taludes, llegando a ser un factor detonante de los fenómenos de erosión superficial y deslizamientos, en eventos de precipitación de gran duración por los volúmenes acumulados, pero más aun principalmente por altas intensidades de precipitación asociadas a eventos de corta duración.

Las lluvias de corta duración y alta intensidad son relevantes en los análisis de este tipo, debido a que generalmente ocasionan un incremento exponencial de las presiones de poros en el terreno, de manera inversamente proporcional con los esfuerzos efectivos. Es decir que este tipo de saturación del suelo disminuye el factor de seguridad de los taludes, haciéndolos susceptibles a eventos de deslizamiento.

Para el análisis de estas lluvias de corta duración se utilizan las Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) de la estación representativa, donde obtenemos la intensidad de la lluvia asociada a un determinado periodo de retorno.

Las curvas IDF se obtienen a partir de registros pluviográficos, preferiblemente continuos y lo más prolongados posible, de modo que se incremente la fiabilidad de la información.

Las metodologías para la realización de las curvas IDF se basan principalmente en la utilización de los registros de precipitación máxima en 24 horas, siendo posible elaborar las curvas IDF también a partir de información procedente de estaciones de tipo pluviométrico (PM), aunque con un menor grado de confiabilidad.

En la presente tesis se adopta la metodología avalada para Colombia por Vargas y Díaz-Granados (1998).

### 3.6.7.13 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia IDF

El análisis de los datos de lluvia básicamente pretende obtener los valores correspondientes de precipitación asociados a un período de retorno de un evento de lluvia. Estos análisis se realizan con base en datos medios diarios de precipitación ajustados con una distribución de probabilidad, o empleando curvas que relacionen la intensidad de lluvia, con la duración y la frecuencia de la misma (curvas IDF), calculadas a partir de los registros pluviográficos de una estación.

Adicionalmente, para emplear un modelo lluvia esorrentía se requiere conocer la distribución temporal de la tormenta cuyo volumen de precipitación corresponde al encontrado ya sea empleando valores obtenido de las series de precipitación, o el dato asociado a un periodo de retorno.

Con base en los valores promedio de precipitación máxima en 24 horas y del promedio de días con lluvia al año en la estación UIS, se construyeron las curvas de Intensidad - Duración – Período de Retorno o frecuencia (IDF), empleando la metodología propuesta por Vargas R. y Díaz-Granados M., en su trabajo titulado “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia”, (Universidad de Los Andes, Santafé de Bogotá, 1998).

Vargas y Díaz-Granados recopilaron información de 250 curvas IDF de diferentes estaciones dentro del territorio Colombiano y establecieron coeficientes para las ecuaciones propuestas por Kothyari y Garde para cada región; la ecuación es la siguiente:

$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e PT^f \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde I es la intensidad de lluvia en mm/h, M el promedio de valores máximos anuales de precipitación en mm, N el promedio del número de días con lluvia al año, y PT la precipitación media anual en mm.

Los coeficientes a, b, c, d, e y f, corresponden a variables empíricas cuyos valores fueron hallados mediante correlaciones, que para la región Andina se han establecido como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de la Curva IDF Sintética

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>
1.61	0.19	0.65	0.75	-0.15	0.08

Fuente: Autor

Para la zona de estudio, a partir de los datos de precipitaciones de la Estación UIS, se establecieron los siguientes parámetros, que se requieren para estimar las IDF a partir de la metodología de Vargas y Díaz-Granados.

Tabla 12. Resumen de información meteorológica básica

<b>PARÁMETROS ESTACIÓN UIS</b>	<b>Prom. Valores Max Anuales Precipitación</b>	<b>Número de Días Lluvia</b>	<b>Precipitación Media Anual</b>
	106	180	1270

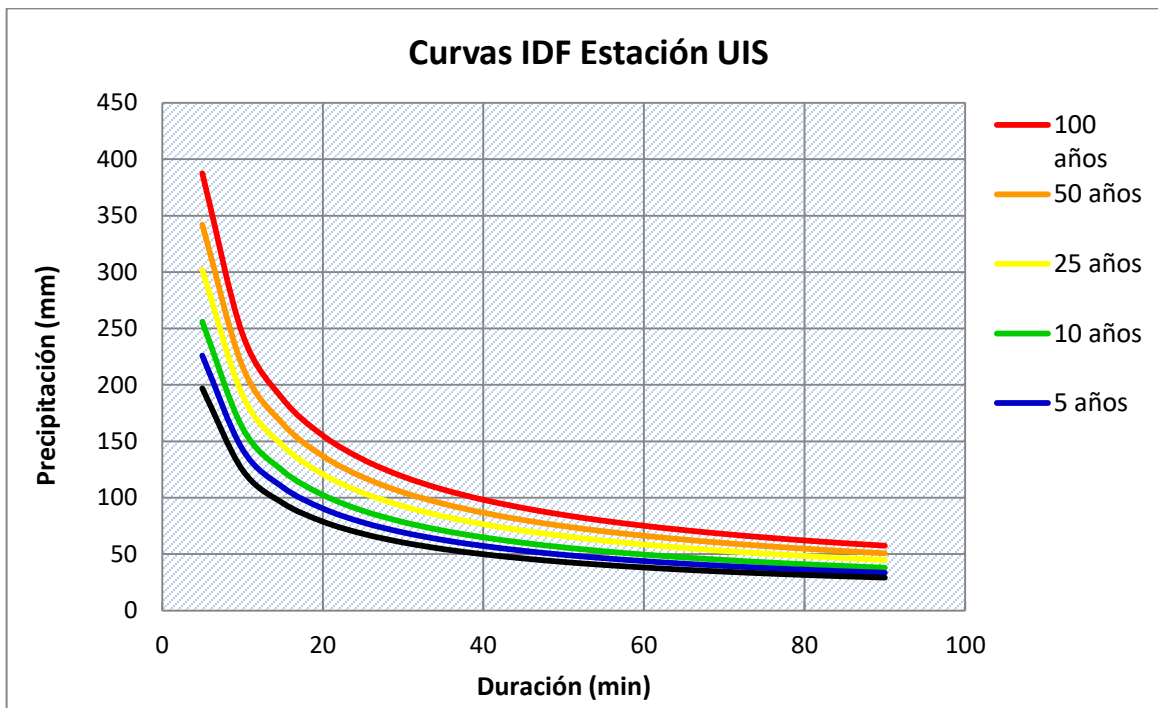
Fuente: Autor

Tabla 13. Datos para las curvas IDF de la Estación UIS

<b>Duración</b>	<b>Período de Retorno / Intensidades (mm/h)</b>					
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
5,00	196,9459	225,9631	255,9899	301,8923	342,009	387,4564
10,00	124,6428	143,0071	162,0105	191,0611	216,4501	245,2128
15,00	95,37772	109,4303	123,9718	146,2016	165,6294	187,6389
20,00	78,88372	90,50611	102,5329	120,9184	136,9865	155,1898
25,00	68,08113	78,11192	88,49173	104,3595	118,2272	133,9377
30,00	60,36249	69,25604	78,45905	92,52781	104,8233	118,7526
35,00	54,52331	62,55655	70,86931	83,57712	94,68317	107,265
40,00	49,92379	57,27935	64,89086	76,52665	86,69581	98,21628
45,00	46,18989	52,99531	60,03753	70,80306	80,21165	90,87048
50,00	43,08707	49,43534	56,0045	66,04685	74,82341	84,76623
55,00	40,46018	46,42141	52,59007	62,02017	70,26165	79,59829
60,00	38,20211	43,83065	49,65503	58,55884	66,34037	75,15593
65,00	36,23634	41,57525	47,09993	55,54558	62,92669	71,28863
70,00	34,50662	39,59068	44,85165	52,89414	59,92292	67,88571
75,00	32,97059	37,82834	42,85511	50,53961	57,25551	64,86384
80,00	31,59568	36,25086	41,06801	48,43206	54,8679	62,15895
85,00	30,35643	34,82902	39,45723	46,53244	52,71585	59,72094
90,00	29,23258	33,53958	37,99645	44,80972	50,76421	57,50996

Fuente: Consorcio M&CI, 2009

Figura 43. Curvas IDF Estación UIS



Fuente: Consorcio M&CI, 2009

### 3.6.8 CÁLCULO DE CAUDALES

En el presente capítulo se estiman los caudales correspondientes a diferentes periodos de retorno para las franjas de escorrentía determinadas con base en la topografía del área de estudio.

Una vez se diseñen obras geotécnicas para mitigación de problemas de estabilidad de terreno, estas se complementarán con obras hidráulicas para control de escorrentía, diseñadas para cada área aferente particular.

### **3.6.8.1 Metodologías para estimación de caudales**

Para el cálculo de caudales de diseño existen varios métodos:

- a. Método racional: Es posiblemente el método más antiguo de la relación lluvia – escorrentía. Este modelo toma en cuenta el área de la cuenca, la altura o intensidad de precipitación, y la relación entre precipitación y escorrentía.
- b. Métodos envolventes: Toman en cuenta sólo el área de la cuenca. Aunque no son métodos que analicen propiamente la relación entre la lluvia y la escorrentía son de enorme utilidad en los casos donde se requiera solo estimaciones gruesas de los gastos máximos probables o bien cuando se carezca por completo de información. Consisten en obtener gráficas de ensayos de forma empírica, existen diferentes fórmulas como la de Creager y Lowry, además de diferentes gráficas para México, EUA, y otros países, pero en nuestro caso no existen.
- c. Método del Hidrograma Unitario: Tiene en cuenta además del tipo de suelo y área, la forma. El volumen escurrido puede ser el mismo para dos cuencas similares pero el caudal máximo, y las demás características del hidrograma varían de una cuenca a otra, el método del hidrograma unitario toma en cuenta estas variaciones considerando además la altura total de precipitación y el área de la cuenca, su forma, pendiente, vegetación, etc., aunque no de forma explícita.

### **3.6.8.2 Caudales de escorrentía aferentes**

Los sectores La Independencia, Bosque Norte y Nueva Colombia, incluidos en el presente estudio, poseen un área total de estudio de 27 Ha, no obstante la subdivisión de áreas aferentes de escorrentía suman un total de 30 Ha.

Debido a su poca extensión, es adecuado suponer una distribución homogénea de la precipitación sobre la totalidad del área aportante, obteniendo un caudal resultante igual un porcentaje de la precipitación multiplicado por el área de la cuenca hasta el sector estudiado.

La duración de la lluvia seleccionada deberá ser el tiempo necesario, para que una gota de agua recorra la mayor distancia posible dentro del área aferente. Este tiempo corresponde al tiempo de concentración ( $T_c$ ).

Por lo tanto debido a las características del área aportante, de las tres metodologías descritas en el Numeral 3.6.8.1, se selecciona como más confiable el método racional.

### **3.6.8.3 Utilización del Método Racional**

Según la Dirección Nacional de Carreteras de España, entidad que adelantó un perfeccionado estudio para determinar el cálculo de caudales máximos en pequeñas cuencas (áreas menores a 75 Km<sup>2</sup>), el Método Racional es un método que además de ser sencillo cumple con los requisitos de confiabilidad requeridos.

Otros autores como H.H. Barnes, V. T. Chow y el U.I.S. Forest Service lo recomiendan por su sencillez y confiabilidad aunque ellos difieren en que el tamaño de la cuenca debe ser menor de 12,5 Km<sup>2</sup>.

Según “Carreteras, Estudio y Proyecto” de Jacobo Carciente, esta fórmula solo es confiable en cuencas pequeñas menores de 5 Km<sup>2</sup> (500 Ha).

El método es criticado debido a que lleva en sí un grado de incertidumbre que puede aportar valores de caudal sobrestimados en cuencas grandes, pero otras entidades lo tienen como base de sus estudios, entre los cuales se cuentan las normas de la TEM (Trans European North – South Motorway), Asphalt Institute, MOPU (Ministerio

de obras públicas y Urbanismo de España) ASCE & WPCF en el diseño de alcantarillados y el Ministerio de Obras Públicas de Venezuela.

Por lo tanto debido a las características del área aportante, de las tres metodologías descritas, se selecciona como más confiable el método racional.

#### **3.6.8.4 Marco Teórico Método Racional**

La fórmula racional expresa que la descarga es igual a un porcentaje de la precipitación multiplicado por el área de la cuenca. La duración de la lluvia seleccionada deberá ser el tiempo necesario, en minutos, para que una gota de agua llegue a la estructura de drenaje desde el punto más alejado de la cuenca. Este tiempo se llama tiempo de concentración ( $T_c$ ).

La estimación de los caudales se hará entonces utilizando el Método Racional que matemáticamente se expresa así:

Donde;

$Q$  = Descarga o caudal estimado en un sitio determinado.

$C$  = Coeficiente de escorrentía (adimensional).

$I$  = Intensidad de lluvia.

$A$  = Área de drenaje.

$k$  = Coeficiente por corrección de unidades.

La fórmula racional está basada en las hipótesis de Krimgold:

- El escurrimiento resultante de cualquier intensidad de lluvia es un máximo cuando esta intensidad de lluvia dura, al menos tanto como el tiempo de concentración.
- El escurrimiento resultante de una intensidad de lluvia, con una duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es una fracción de la precipitación.
- La frecuencia de la máxima descarga es la misma que la de la intensidad de lluvia para el tiempo de concentración dado.
- La relación entre máxima descarga y tamaño del área de drenaje es la misma que la relación entre duración e intensidad de precipitación.
- El coeficiente de escorrentía es el mismo para lluvias de diversas frecuencias.
- El coeficiente de escorrentía es el mismo para todas las lluvias en una cuenca dada.

El Método Racional no toma en cuenta el efecto de almacenamiento de la cuenca, pues supone que la descarga es igual a la precipitación pluvial menos toda la retención de la cuenca.

Con valores correctos de precipitación pluvial y para un escurrimiento dado, la fórmula racional siempre sobrestima el escurrimiento, con errores apreciables al aumentar el tamaño de la cuenca. Por consiguiente esta fórmula solo es confiable en cuencas pequeñas, como la que nos ocupa, generalmente de menos de 500 hectáreas (5 Km<sup>2</sup>).

### **3.6.8.5 Parámetros para el Método Racional**

Coeficiente de Escorrentía (C)

Tabla 14. Coeficientes de escorrentía recomendados

Zonas comerciales o industriales	0,60 - 0,95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0,75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre éstos	0,60 - 0,75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0,40 - 0,60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0,45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques - cementerios	0,30
Laderas sin vegetación	0,60
Laderas con vegetación	0,30
Parques recreacionales	0,20 - 0,35

Fuente: RAS 2000.

El coeficiente de escorrentía depende las características y las condiciones del suelo. La tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continúa y también es influida por las condiciones de humedad antecedentes en el suelo.

Otros factores que influyen son la intensidad de la lluvia, la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

#### **3.6.8.6 Tiempo de Concentración (Tc)**

Una de las hipótesis básicas de la fórmula racional es la de suponer que la lluvia tendrá una duración suficiente para permitir la llegada simultánea del agua que cae sobre toda la superficie de la cuenca al sector de interés. Ese tiempo se ha denominado tiempo de concentración y es el requerido para que el agua que cae

en el punto más alejado del área aferente llegue al punto más bajo durante un evento de precipitación.

Si la lluvia es de mayor duración que el tiempo de concentración  $T_c$ , el escurrimiento será menor que el calculado para dicho tiempo debido a que la intensidad de esta lluvia será menor que la de duración del  $T_c$ . Si la lluvia que cae es de menor duración que  $T_c$ , también la descarga será menor, debido a que no toda la cuenca contribuye simultáneamente al escurrimiento.

La ecuación de Giandotti es una de las más utilizadas localmente para el cálculo del tiempo de concentración:

$$T_c = \frac{4 * A^{0.5} + 1.5 * L}{0.8 * H^{0.5}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración, en horas.

$A$  = Área, en Km<sup>2</sup>.

$L$  = Longitud del cauce desde el punto más alejado, en Km.

$H$  = Diferencia de cotas, en m.

Otra ecuación muy utilizada es la Kirpich:

$$T_c = 0.066 * \left( \frac{L}{9} \right)^{0.77} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración, en horas.

$L$  = Longitud del cauce desde el punto más alejado, en Km.

$J$  = Pendiente, en m/m.

Intensidad de Lluvia ( $I$ )

Para el análisis de intensidad de lluvia se adoptan las curvas IDF calculadas para la estación UIS, establecida como representativa mediante la metodología de los polígonos de Thiessen.

Las curvas IDF de la estación representativa, arrojan el valor de intensidad de la precipitación para diferentes periodos de retorno, con base en el  $T_c$  de cada área aferente.

#### **3.6.8.7 Periodos de Retorno ( $T_r$ )**

El período de retorno ( $T_r$ ) es un término probabilístico, conocido también como intervalo de recurrencia o frecuencia de diseño, que corresponde al intervalo de tiempo en el cual se espera que un evento dado sea igualado o excedido una sola vez en promedio.

Otros autores utilizan la probabilidad asociada de ocurrencia del evento, conocida como probabilidad de excedencia anual que corresponde al inverso del período de retorno ( $1/T$ ) expresado como porcentaje.

De acuerdo a la normatividad vigente, para la determinación de los niveles máximos de inundación se deben utilizar periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años; no obstante las obras hidráulicas para control de escorrentía requieren de periodos de retorno menores.

Tabla 15. Periodos de retorno en obras de drenaje

TIPO DE OBRA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS) <sup>1</sup>
Cunetas	5
Zanjas de Coronación <sup>2</sup>	10
Estructuras de Caída <sup>2</sup>	10
Alcantarillas de 0.90 m de diámetro	10
Alcantarillas mayores a 0.90 m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10 m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10 m y menor a 50 m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50 m	100
Drenaje subsuperficial	2

Fuente: INVIAS, 2009 <sup>7</sup>

Las curvas IDF de la Estación UIS se calcularon para periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, de modo que permitan estimar caudales para una serie de obras hidráulicas diversas. No obstante una vez se definan las obras hidráulicas complementarias a las obras geotécnicas, se definirá específicamente para cada tipo de obra, el periodo de retorno de diseño.

### **3.7 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.**

#### **3.7.1 Metodología**

“Como método de trabajo se acoge una aproximación semi –empírica, la caracterización tiene un componente altamente empírico y sujeto dado por el juicio de los especialistas para establecer el tipo de parámetros a considerar en ella, los rangos de variación de estos y el método de combinación de los mismos. Los

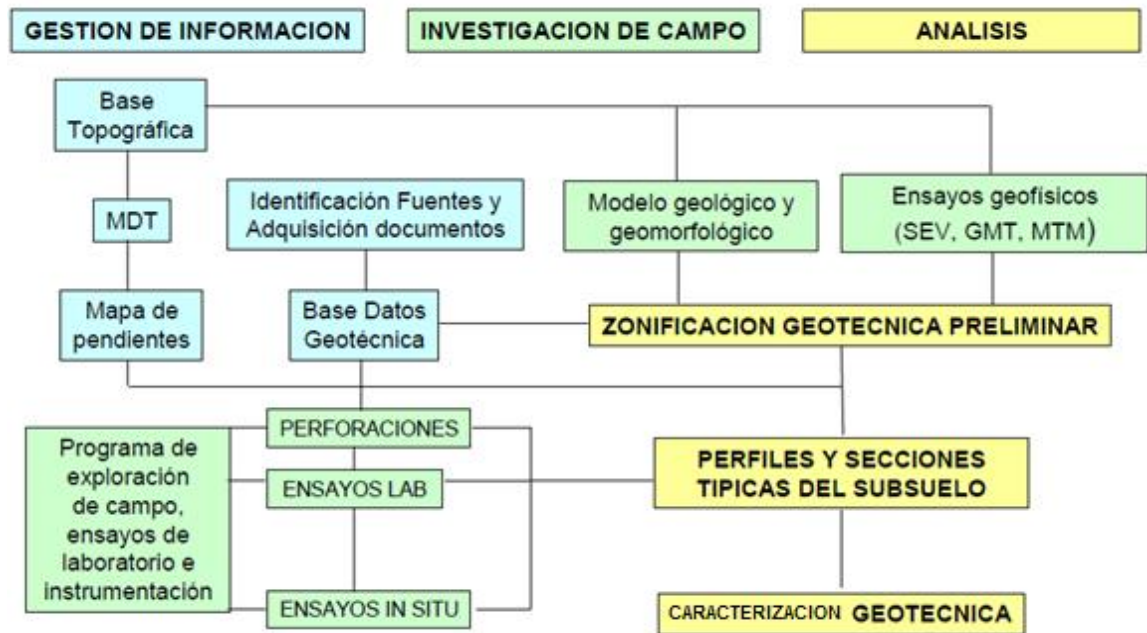
---

<sup>7</sup> Manual de Drenaje para carreteras 2009 – INVIAS

valores cuantitativos, sin embargo, serán los obtenidos de los diferentes ensayos de exploración de campo, ensayos de laboratorio y ensayos geofísicos que se realicen en el transcurso del estudio” INGEOMINAS – DAGMA (2005).

El proceso metodológico general se ilustra a continuación, se componen de una sola actividad, la caracterización resultara de la investigación que se ejecute en el subsuelo con base a métodos directos y geofísicos indirectos.

Figura 44. Metodología general para la caracterización geotécnica<sup>8</sup>



Fuente: INGEOMINAS –DAGMA, 2005

<sup>8</sup> INGEOMINAS-DAGMA, Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, pág. 4, 2005

### 3.7.2 Exploración geotécnica (mecánica)

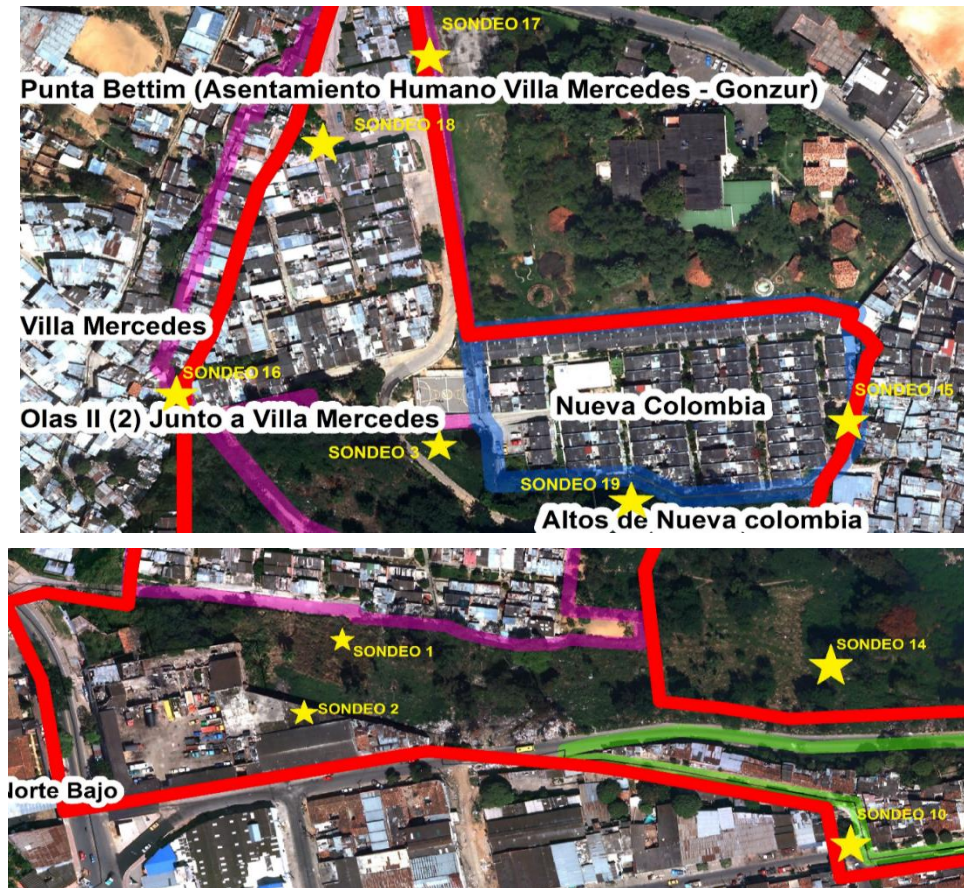
Las exploraciones realizadas en el lugar de estudio fue ejecutada por JC Laboratorios y Geotécnia S.A.S., para ello se planteó una investigación compuesta de sondeos y apiques sobre el perfil analizado, cabe aclarar que el estudio completo de la zona estuvo compuesto por una amplia exploración geotécnica, sin embargo se tomo la informacion de los sondeos representativos para el perfil analizado.

Tabla 16. Localización de sondeos Exploratorios.

COORDENADAS SONDEOS					COORDENADAS APIQUES				
SONDEO	E (m)	N (m)	Barrio	PROF. (m)	APIQUE	E (m)	N (m)	Barrio	PROF. (m)
1	1104410	1281640	Bosque Norte	15	1	1104368	1281909	Bosque Norte	0,5
2	1104447	1281592	Bosque Norte	15	2	1104317	1281788	Bosque Norte	0,5
3	1104405	1281782	Nueva Colombia	15	3	1104380	1281654	Bosque Norte	0,5
14	1104624	1281598	Independencia	15	14	1105597	1281794	Independencia	0,5
15	1104504	1281795	Nueva Colombia	15	15	1104984	1281616	Independencia	0,5
16	1104324	1281780	Bosque Norte	15	16	1105315	1281796	Independencia	0,5
17	1104413	1281927	Bosque Norte	15	17	1105441	1281837	Independencia	0,5
18	1104372	1281898	Bosque Norte	15	18	1105451	1281983	Independencia	0,5
19	1104468	1281759	Nueva Colombia	15	19	1105420	1281875	Independencia	0,5

Fuente: Autor

Figura 45. Ubicación sondeos



Fuente: Autor

Para la localización de los sondeos presentados, se basó en métodos de observación, en los cuales se determinaron los lugares de exploración por factores como:

- Fácil acceso al lugar de exploración.
- Cercanía de servicio de agua para la refrigeración durante la perforación.
- Cercanía a bordes de lomos y escarpes.
- Zonas cercanas a pie de taludes.

- Lugares de intercambio de unidades geológicas superficiales.
- Zonas donde se evidencie afectación por erosión superficial o posibles fenómenos de remoción en masa.

Como se mencionó anteriormente, las exploraciones de campo se realizaron a rotación y percusión, por lo cual la empresa perforadora JC Laboratorios y Geotécnia S.A.S. la cual ejecuto las perforaciones con equipo de perforaciones con las siguientes características:

- Equipo de perforación marca PETTY, motor diésel Ruggerini 24 HP.
- Motobomba para lodos.
- 30 metros de tubería BW-AW.
- Tubería de revestimiento NW.
- Torre de perforación (trípode).
- pesa de 140 libras, 1 contrapesa.
- Dos diferenciales para extraer los núcleos,
- 10 metros de tubería de perforación AW,
- 3 muestreadores cuchara partida estándar (split spoon) y lazo.
- Llaves de tubo de 24 y 36".
- Muestreador de pared delgada U-100.
- Barrena con broca en tricono diamantada.

Durante la exploración mecánica, efectuada, se recolecta una serie de muestras para aplicar ensayos de laboratorio.

A continuación se observa los registros de perforación y apique realizados en campo para el sondeo 1 y apique 1 respectivamente, los demás registros de exploración mecánica se muestran en los respectivos anexos.

Figura 46. Registro del sondeo 1.



<b>SONDEO 1</b>	<b>E: 1104410 N: 1281640 PROF: 15.0 m</b>
-----------------	---

Fuente: Autor

Figura 47. Registro del Apique 1.



<b>APIQUE 1</b>	<b>E: 1104368</b>	<b>N: 1281909</b>	<b>PROF: 0,50 m</b>
-----------------	-------------------	-------------------	---------------------

Fuente: Autor

### 3.7.3 Estudio Geofísico

Estos estudios se realizaron con el apoyo de la empresa INGERCIVIL LTDA y fueron dirigidos por el Ingeniero Civil German Darío Tapia Muñoz con Tarjeta Profesional 25202-60095 CND.

Para la ejecución de estos estudios geofísicos se realizaron las siguientes exploraciones: Líneas de Refracción Sísmica (LRS), Tomografías Eléctricas (T) y Sondeos Eléctricos Verticales

Las tomografías y líneas de refracción sísmica se localizaron de acuerdo a lo mostrado en la siguiente figura.

Figura 48. Imagen satelital de Google Earth (2015) con Localización de las líneas de refracción sísmica (LRS), ubicación de las tomografías (T) y los sondeos eléctricos verticales (SEV).



Fuente: Google Earth (2015)

Figura 49. Imagen satelital de Google Earth (2015)



Google Earth (2015)

### 3.7.3.1 Metodología de trabajo tomografías, SEV y refracciones sísmicas

Para la ejecución del Estudio Geo eléctrico se efectuaron cuatro (4) fases o etapas de trabajo que incluyeron las siguientes actividades:

i. Fase de Reconocimiento Lito-Estratigráfico y Estructural: Realizada en los alrededores del área del proyecto, con el fin de reconocer la geología local, estratigrafía, geomorfología, inclinación (actitud) de las capas de roca en superficie y constatar e identificar los principales agentes hídricos.

ii. Fase de Adquisición de Datos: Efectuada con la visita de anterioridad y puntual al predio del proyecto para planear la ubicación y ejecución de Tomografías Eléctricas 2D, T-2, T-3, T-4, T-5, con 24 geófonos, separados cada cinco (5) metros.

iii. Fase de Valoración de Información: Revisión bibliográfica y análisis de la Información geológica existente de superficie y subsuelo, para el sector del estudio.

iv. Fase de Procesamiento e Interpretación

### **3.8 SISMOLOGÍA**

En el desarrollo del presente estudio, se analizaron condiciones especiales del subsuelo (sismicidad), entre los que se encuentran parámetros base para el análisis de estabilidad pseudo-estático que se presentará más adelante.

#### **3.8.1 Amenaza sísmica según la Norma NSR-10.**

Según las normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo Resistente, NSR-10, el Municipio de Bucaramanga se encuentra en la región 5 y se define como amenaza sísmica alta. ( Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa (coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño, dado en A.2.2) y Av (coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño, dado en A.2.2)).

Figura 50. NSR-10 Figura A.2.3-2

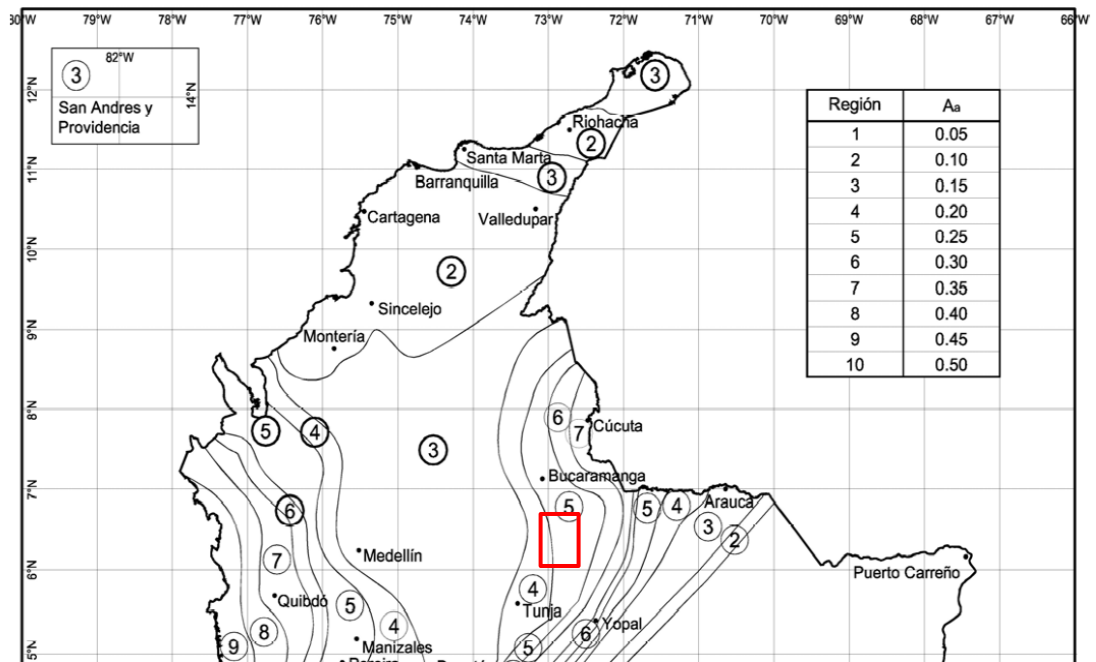
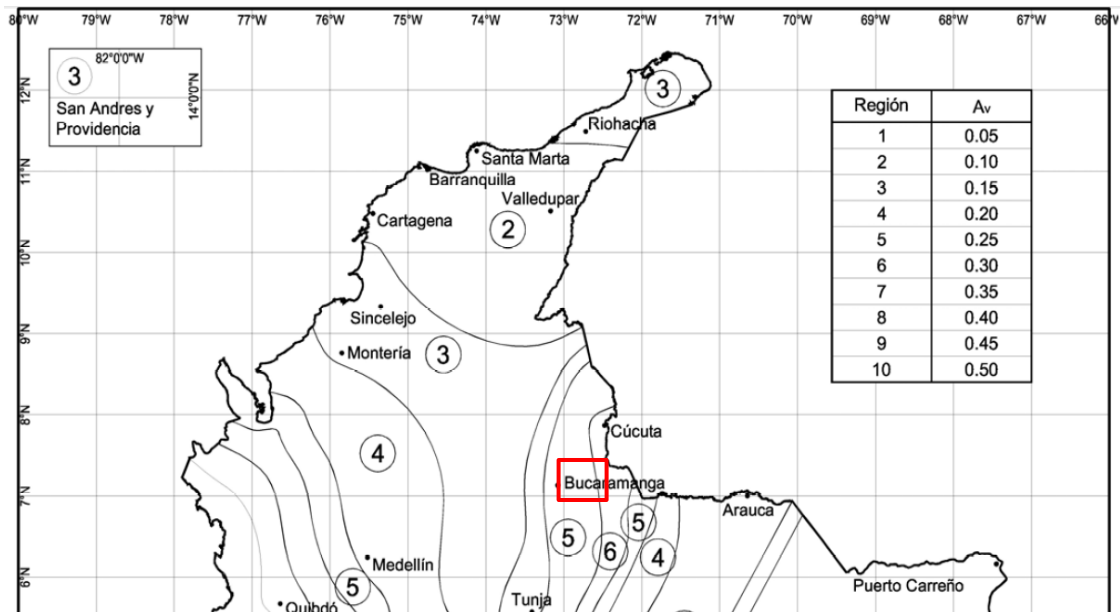


Tabla 17. NSR-10 Tabla A.2.3-1

Mayor valor entre A <sub>a</sub> y A <sub>v</sub>	Asociado en mapas de las figuras A,2,3-2 y A,2,3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0,50	10	Alta
0,45	9	Alta
0,40	8	Alta
0,35	7	Alta
0,30	6	Alta
0,25	5	Alta
0,20	4	Intermedia
0,15	3	Intermedia
0,10	2	Baja
0,05	1	Baja

Fuente: NSR-10

Figura 51. NSR-10 figura A.2.3-3



Fuente: NSR-10

### 3.8.1.1 Movimiento sísmico de diseño.

Los movimientos sísmicos de diseño se definen en función de la aceleración pico efectiva, representada por el parámetro  $A_a$ , y de la velocidad pico efectiva, representada por el parámetro  $A_v$ , para una probabilidad del diez por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años. Los valores de estos coeficientes para el Municipio de Bucaramanga son:  $A_a=0.25$ ,  $A_v=0.25$ , además se dan a conocer los coeficientes de aceleración pico efectiva de diseño con seguridad limitada y coeficiente de aceleración efectiva para umbral de daño  $A_e=0.15$  y  $A_d=0.09$  (Ver A.2.2.2 y A.2.2.3. NSR-10 - Apéndice A-4 - Valores de  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$  y definición de la zona de amenaza sísmica de municipios).

### **3.8.1.2 Efectos locales**

El perfil de suelo debe ser determinado por el ingeniero geotécnica a partir de unos datos geotécnicos debidamente sustentados.

### **3.8.1.3 Tipo de Perfil del suelo.**

Los efectos locales de la respuesta sísmica de una obra civil deben evaluarse de acuerdo a los perfiles de suelo mostrados, los cuales se determinan en base a la exploración geotécnica realizada por el especialista de suelos y no dependen del tipo de cimentación empleado. Para el caso en particular la determinación del tipo de suelo se da gracias al parámetro de golpes promedio  $\bar{N}$  el cual varía de 16 a 101 como se pueden observar en los registros de perforación, por ello el perfil de suelo encontrado corresponde al Tipo C, el cual es el suelo de mayor espesor en la zona de estudio.

Se determinan dos factores de amplificación del espectro por efectos de sitio,  $F_a$  (coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio) y  $F_v$  (coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio), estos valores son adimensionales y dependientes de los coeficientes de aceleración  $A_a$ ,  $A_v$  y del perfil de suelos de la zona de estudio, para el caso en particular.

Tabla 18. Clasificación de los perfiles de suelos, título A de la NSR-10, tabla A.2.4-1.

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez Media	$1500$ m/s > $V_s \geq 760$ m/s
<b>C</b>	Perfil de suelos muy densos o roca blanda	$760$ m/s > $V_s \geq 360$ m/s
		$N \geq 50$ - $S_u \geq 100$ Kpa
<b>D</b>	Perfil de suelos rígidos	$360$ m/s > $V_s \geq 180$ m/s
		$50 > N \geq 15$ - $100$ Kpa > $S_u \geq 50$ Kpa
<b>E</b>	Suelos que cumplan con el criterio de $V_s$	$180$ m/s > $V_s$
	Espesores H mayores a 3m de arcillas bandas	$IP > 20$ - $w \geq 40\%$ - $50$ Kpa > $S_u$
<b>F</b>	<p>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:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- F1: Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como Suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados.</li> <li>- F2: Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H&gt; 3m de estos materiales).</li> <li>- F3: Arcillas de muy alta plasticidad (H&gt; 7.50m con IP&gt;75).</li> <li>- F4: Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H&gt;36).</li> </ul>	

Fuente: NSR-10

Tabla 19. Tipo de suelo de acuerdo al título A de la NSR-10, tabla A.2.4-1 y valores de  $F_a$  y  $F_v$  de las tablas A.2.4-3 y A.2.4-4.

PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO DE ACUERDO AL TITULO A DE LA NSR-10	$F_a$	$F_v$
1,00 – 3.0	TIPO D	1,3	1.90
3,00 – <40.0	TIPO C	1,15	1.55

Fuente: NSR-10

#### 3.8.1.4 Coeficiente de Importancia.

Se define el grupo de tipo de uso de todas las obras civiles que se puedan plantear en el talud como Grupo I con un coeficiente de importancia, I, igual a 1.0 Tabla A.2.5-1 (Valores de coeficiente de Importancia I), esta asignación se da debido a la ocupación de características normales que ha tenido el sector.

Tabla 20. Valores de coeficiente de Importancia I (NSR-10).

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1,50
III	1,25
II	1,10
I	1,00

Fuente: NSR-10

Figura 52. Espectro de aceleraciones

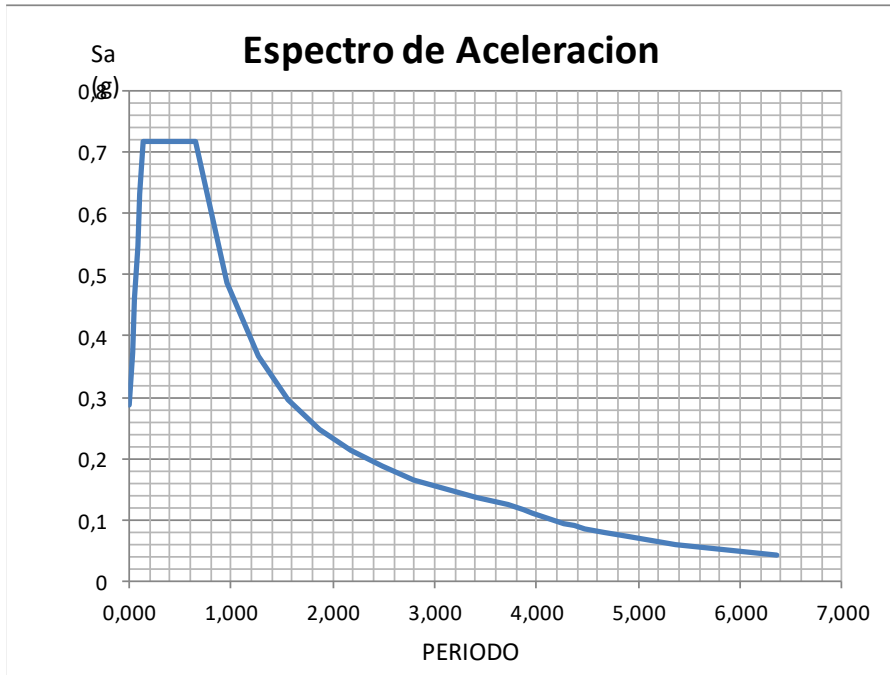
**ESPECTRO DE ACELERACIONES**

Aa=	0,25
Av=	0,25
Codigo Perfil suelos	3
Tipo de perfil	C
Fa=	1,15
Fv=	1,55
I=	1

0	0
To=	0,13478261
Tc=	0,64695652
TL=	3,72

Sa(0)=	0,2875
Sa(To)=	0,71875
Sa(Tc)=	0,71875
Sa(TL)=	0,125

T	Sa(T)
0,000	0,2875
0,027	0,37375
0,054	0,46
0,081	0,54625
0,108	0,6325
To= 0,135	0,71875
0,391	0,71875
Tc= 0,647	0,71875
0,954	0,4872881
1,262	0,3685897
1,569	0,2963918
1,876	0,2478448
2,183	0,212963
2,491	0,1866883
2,798	0,166185
3,105	0,1497396
3,413	0,1362559
TL= 3,720	0,125
3,770	0,1233422
3,820	0,1185412
3,870	0,1154979
3,970	0,1097526
4,070	0,1044256
4,170	0,0994773
4,270	0,0948725
4,370	0,0905801
4,470	0,0865727
4,670	0,0793162
4,870	0,0729353
5,370	0,0599856
6,370	0,0426302



Fuente: Autor

Figura 53. Espectro de Aceleraciones

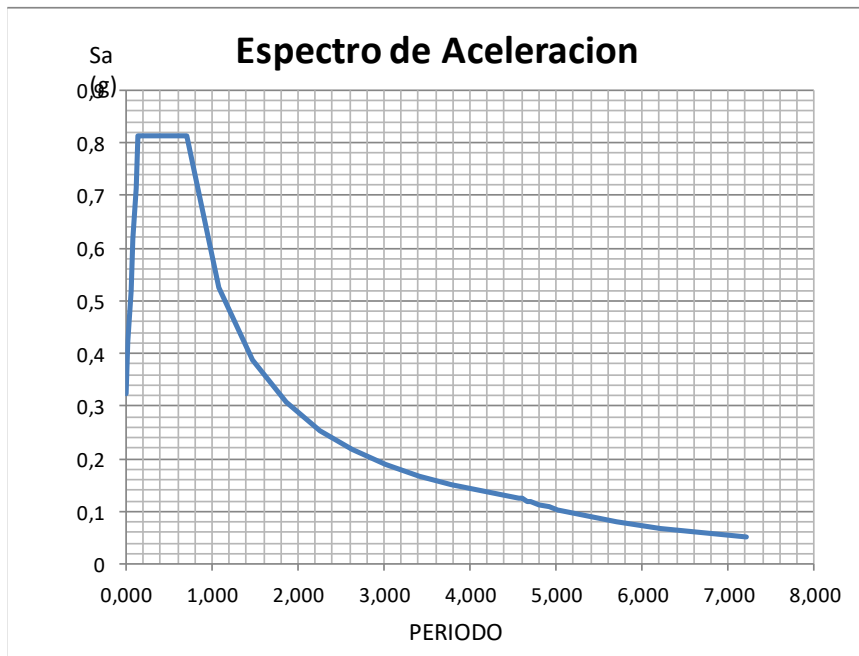
**ESPECTRO DE ACELERACIONES**

Aa=	0,25
Av=	0,25
Código Perfil suelos	4
Tipo de perfil	D
Fa=	1,3
Fv=	1,9
I=	1

0	0
To=	0,14615385
Tc=	0,70153846
TL=	4,56

Sa(0)=	0,325
Sa(To)=	0,8125
Sa(Tc)=	0,8125
Sa(TL)=	0,125

T	Sa(T)
0,000	0,325
0,029	0,4225
0,058	0,52
0,088	0,6175
0,117	0,715
To= 0,146	0,8125
0,424	0,8125
Tc= 0,702	0,8125
1,087	0,5241935
1,473	0,3869048
1,859	0,3066038
2,245	0,2539063
2,631	0,2166667
3,017	0,1889535
3,402	0,1675258
3,788	0,150463
4,174	0,1365546
TL= 4,560	0,125
4,610	0,1236443
4,660	0,1196928
4,710	0,117165
4,810	0,1123439
4,910	0,1078144
5,010	0,1035534
5,110	0,0995401
5,210	0,0957556
5,310	0,092183
5,510	0,0856124
5,710	0,07972
6,210	0,0673995
7,210	0,0499999



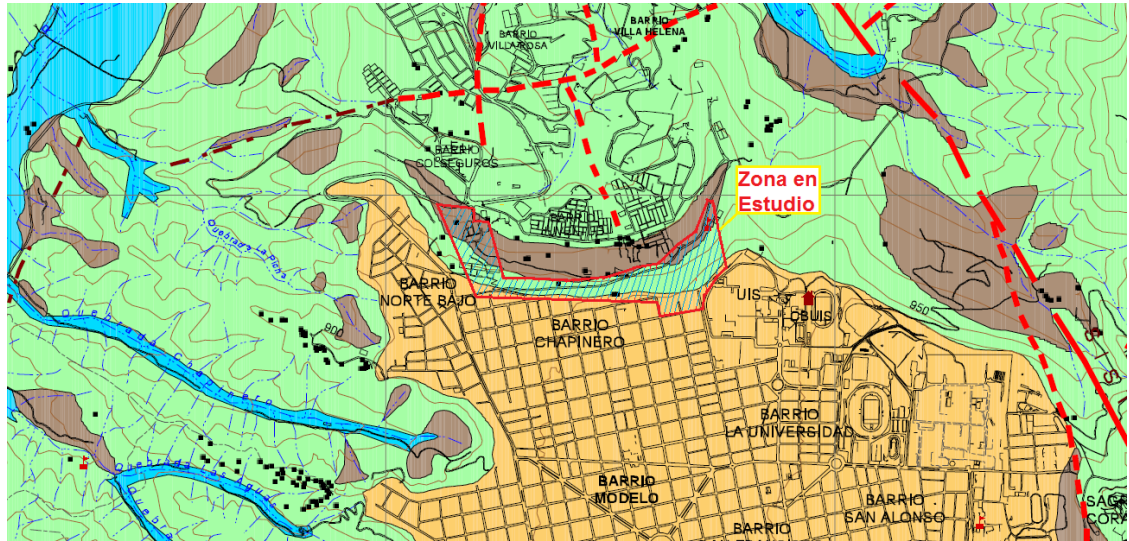
Fuente: Autor

De acuerdo al análisis del espectro del diseño la Aceleración máxima ( $A_{max}$ ) presentada en el sector de acuerdo a la NSR-10 Título A, para un periodo (T) igual a cero (0) evaluado de acuerdo a lo descrito en el título H.5 de la NSR-10 es de:

$$A_{max} = 0.325 \text{ g.}$$

### 3.8.2 Amenaza sísmico según la Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga de 2001.

Figura 54. Zonificación Sismo-geotécnica del lugar de estudio de 2001



#### LEYENDA

- 1 **Zona 1 (Roca):** Depósitos de roca correspondientes a la formación Girón; roca blanda y/o suelos residuales competentes sobre manto rocoso (Formación Neis, Bad Lands y Cañaveral); y cualquier depósito que se pueda considerar como roca pura (R).
- 2 **Zona 2 (Suelo Rígido):** Depósitos de suelo rígido. Reúne las zonas del Abanico de Bucaramanga, Flujos de escombros y Terrazas bajas y medias. Corresponde a las zonas donde se encuentra concentrada la mayor parte de la población del Área Metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Florida, Piedecuesta y Girón).
- 3 **Zona 3 (Llenos):** Llenos antrópicos y mecánicos.
- R **Ronda de río**
- C **Coluviones**

Fuente: Estudio de Zonificación Sismo geotécnica Indicativa del área metropolitana de 2001

Con base al estudio de zonificación sismo geotécnica del área metropolitana de Bucaramanga de 2001, se sectoriza los valores sísmicos en tres zonas fundamentales debido a la cercanía de la falla Bucaramanga – Santa Marta.

De acuerdo a este estudio la zona de análisis se denomina Zona 2, debido a las características que presenta ya que allí prevalecen los suelos de la formación Bucaramanga (Qb), correspondiente a suelos rígidos con una aceleración máxima para un periodo  $T=0$  seg de  $A_m$  igual a 0.40g.

### **3.8.3 Resultado de la sismología de acuerdo a la NSR-10 y la microzonificación sísmica de Bucaramanga de 2001.**

De la zonificación sísmica se tienen en cuenta los siguientes valores:

$$A_a = 0.25g$$

$$A_v = 0.25 g$$

$$A_{max} = 0.325 g$$

$$F_a = 1.3 \text{ para suelo tipo D para estratos de } 1.0 - 3.0 \text{ m}$$

$$F_a = 1.15 \text{ para suelo tipo C para estratos de } 3.0 \text{ a mayores de } 40.0 \text{ m}$$

$$F_v = 1.9 \text{ para suelo tipo D para estratos de } 1.0 - 3.0 \text{ m}$$

$$F_v = 1.55 \text{ para suelo tipo C para estratos de } 3.0 \text{ a mayores de } 40.0 \text{ m}$$

$$\text{Grupo} = I$$

$$I = 1.0$$

Zonificación sísmica: ALTA – ver Mapa A.2.3-2 y A.2.3-3 de la NSR-10.

$A_m = 0.40g$  de acuerdo al estudio de Zonificación Indicativa del área metropolitana de Bucaramanga de 2001.

Análisis y sismo de diseño para el modelo geológico geotécnico (H.5.2.5 Título H, NSR-10).

El sismo de diseño para el análisis pseudoestático en taludes se analiza de acuerdo a la aceleración sísmica máxima predominante, como se indicó anteriormente la NSR – 10 toma un  $A_{max}$  de 0.325 g, la cual es menor a la presentada por el estudio de Zonificación sismo - geotécnica del Área Metropolitana de 2001, la cual es de  $A_{max} = 0.40$  g, se tomara esta última como valor base para realizar el sismo de diseño de acuerdo a lo establecido por el título H de la NSR-10.

Tabla 21. Valores de  $K_{st}/a_{max}$  mínimos para análisis pseudoestáticos en taludes

MATERIAL	$K_{st}/a_{max}$	Análisis de Amplificación mínimo
Suelos, enrocados y Macizos Rocosos muy Fracturados (RQD < 50%)	0,8	Ninguno
Macizos Rocosos (RQD > 50%)	1	Ninguno
Todos los materiales Térreos	0,67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales Térreos	0,5	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: NSR-10, Título H, Tabla H.5.2-1

De la tabla anterior  $K_{st}/a_{max}=0.80$  debido a que no se realizó análisis de amplificación, Por lo cual el sismo de diseño para el análisis pseudo – estático es igual a:

$$K_{st} = 0.8 * 0.40 = 0.32g.$$

Donde:

$K_{st}$ : Sismo de diseño a ingresar en el modelo geológico geotécnico y análisis pseudoestático en los modelos de estabilidad.

En el presente proyecto se analizarán las condiciones estáticas, ya que el componente sísmico es un factor detonante independiente, y la probabilidad de ocurrencia de los dos escenarios críticos simultáneos es muy baja. Es necesario plantear otro proyecto que analice la influencia de los factores pseudoestáticos, ya que está fuera del alcance del presente proyecto.

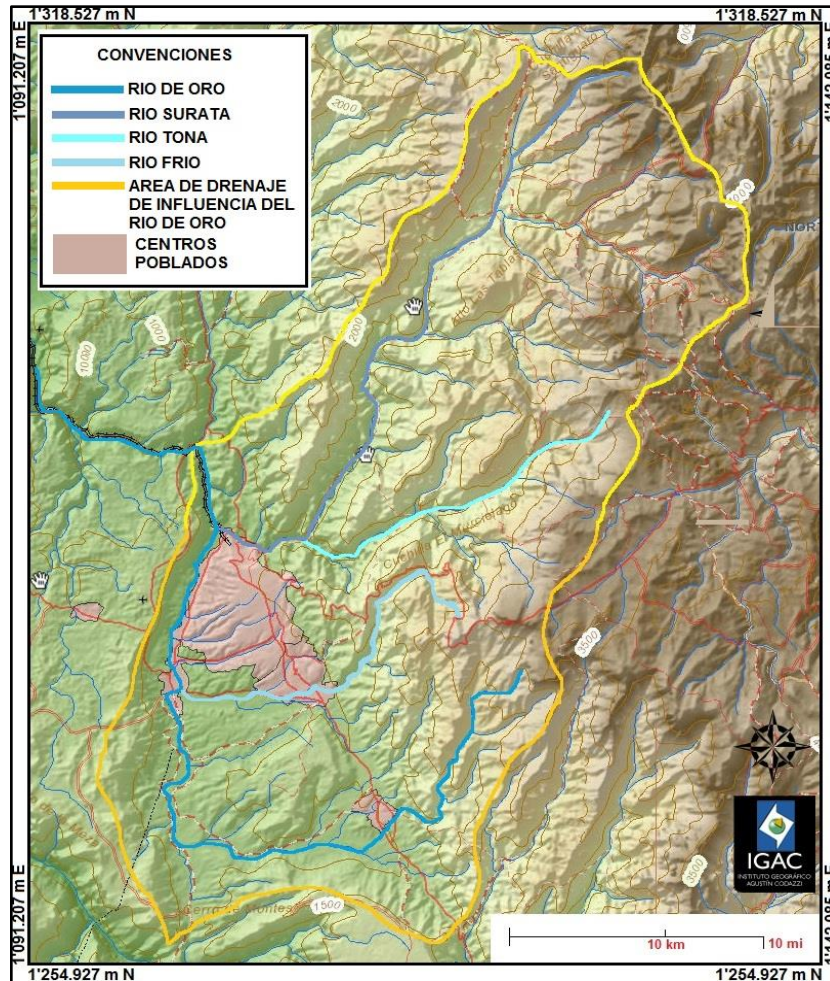
### **3.9 HIDROGEOLOGÍA**

Para el presente capítulo se desarrolla el análisis Hidrogeológico tomando en cuenta ciertos estudios efectuados en la zona, de los cuales se puede mencionar entre otros el estudio **“Colombia, Ministerio de Minas y Energía, INGEOMINAS-UIS: MEMORIA EXPLICATIVA DE LA INVESTIGACION GEOLOGICA E HIDROGEOLOGICA EN EL MACIZO DE SANTANDER (2007)”**, el estudio **“INGEOMINAS, Modelo Geológico - Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga (2004)”**, el estudio **“INGEOMINAS, EVALUACION DE AGUA SUBTERRANEA EN EL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, SANTANDER A ESCALA 1:25000”** y el estudio **“CDMB - Gómez Sully. RELACIONES ENTRE NIVELES FREATICOS, PRECIPITACIONES Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES-1989”**, este último tiene gran importancia en cuanto a que se desarrolló tomando datos de información piezométrica en diferentes sectores de la meseta, instrumentos de medición que actualmente no están funcionando, una breve explicación del contenido de los documentos relacionados se muestra en el capítulo de información secundaria.

En este capítulo además de tomar la base de información de estudios anteriores, se realizara el análisis de acuerdo a lo visto en los ensayos de geofísica y un ensayo de sensibilidad tomando los parámetros de porosidad encontrados en los seis ensayos de percolación registrados en la zona y que permite definir el nivel freático, así mismo se determinara el factor de RU en saturación total el cual no se presta en

la zona de estudio y uno relacionado con la humedad actual del suelo, el cual puede ser usado en el análisis de amenaza en caso de ser requerido.

Figura 55. Mapa de localización de las principales afluentes de drenaje del área metropolitana de Bucaramanga y su área de influencia (Cuenca superior río Lebrija).



Fuente: IGAC – Autores.

### 3.9.1 Hidrografía

Los ríos principales del área metropolitana de Bucaramanga son el Río de oro, Surata, Toná, río frío, y las quebradas de La flora, Honda, Chiquita, suratoque, La

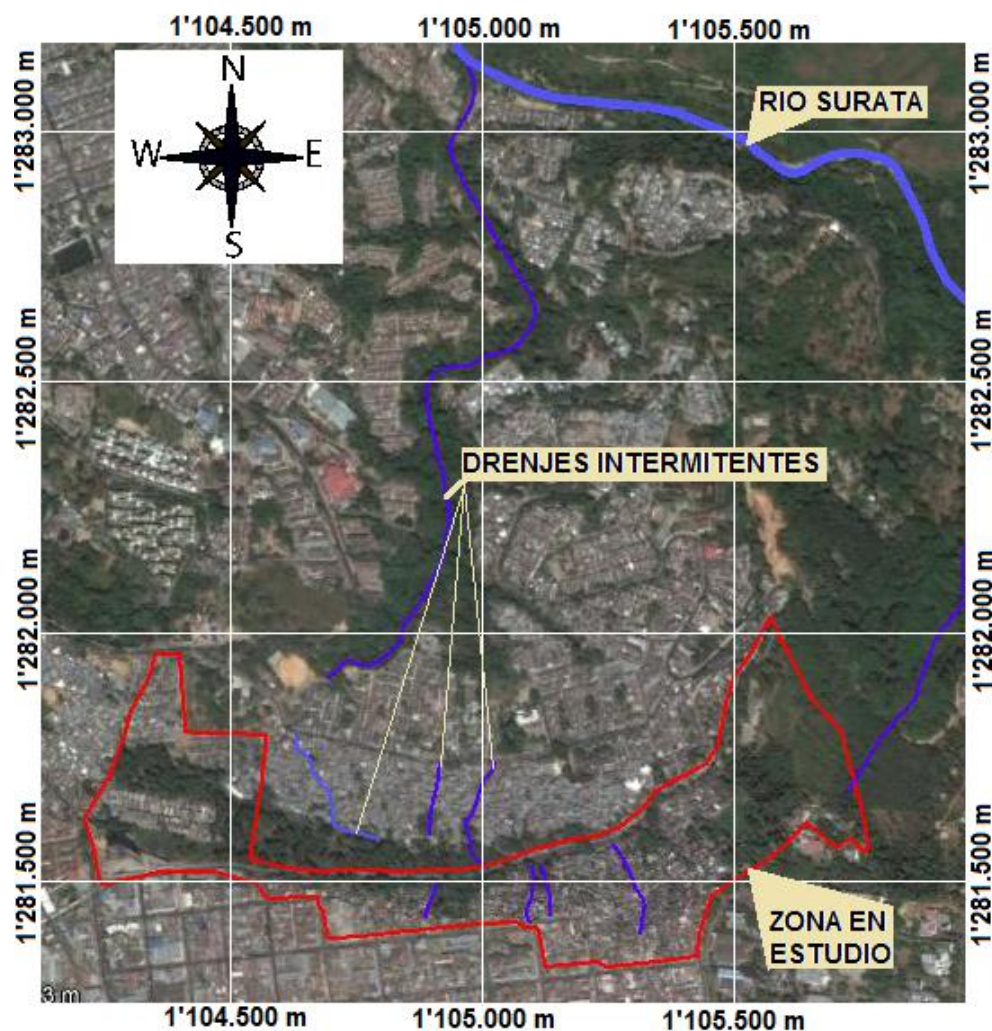
iglesia, Quebrada seca, Cacique, El Horno, san Isidro, Las Navas, La rosita y Bucaramanga.

El río de Oro es uno de los más importantes que atraviesan el área metropolitana, según el POT de Bucaramanga, este se ubica en la escarpa occidental, nace en el macizo de Santander (Cordillera localizada al oriente de la falla de Bucaramanga – Santander donde quedan el páramo de Santurban), desemboca en los drenajes de Piedecuesta, la quebrada Grande, Suratoque y el río Loto, en la zona de Girón recibe las aguas del río Frio, de la quebrada la iglesia, la quebrada Chimita, la Rosita que tiene como afluentes a la quebrada del Loro y la quebrada Seca que tiene a su vez a la quebrada la Joya como afluente, estas últimas son los principales drenajes de la meseta de la ciudad de Bucaramanga, en el norte de la ciudad el río de Oro recibe al río Suratá en el sector conocido como Café Madrid, el cual tiene como afluente al río Toná y a la quebrada Honda, desde este sector a 8.0 Km agua abajo el río de Oro se une con el río Negro formando el río Lebrija en el corregimiento Bocas del municipio de Girón, este último desembocando en el río Magdalena.

Debido a la intervención antrópica registrada, los drenajes naturales desaparecen o se canalizan; para la zona alta del barrio la independencia (interface entre la meseta de Bucaramanga y la ladera) el agua de precipitación es captada por el alcantarillado presente sobre la calle 4 y calle 5.

La zona de la ladera que se localiza entre la calle 3, calle 4 y calle 5, la precipitación es conducida por las vías peatonales, muchas de las cuales fueron construidas de manera artesanal y se capta por el alcantarillado de la calle 3 o se infiltra en el talud. Observando por fuera del polígono de estudio en la ladera entre la calle 2 y la calle 3, allí en el barrio La Transición, aparece afloramiento de agua sobre la vía (calle 2), los cuales se encausan a drenajes naturales y son llevados al alcantarillado de la calle 1.

Figura 56. Localización del drenaje local de la zona de estudio



.Fuente: Autor

Para la zona de influencia del barrio Bosque norte alto, la calle 2A, es la vía que controla el flujo que proviene de la parte alta y es encausado al alcantarillado del municipio, por otro lado al igual que en la ladera del barrio Independencia, la precipitación se encausa por la vías peatonales o se infiltra, la encausada es intercepta por la calle 2E y es entregada en algún porcentaje al alcantarillado, l otro porcentaje es vertido hacia el talud.

Para la zona de bosque Norte parte baja y Nueva Colombia, son las zonas más planas del sector por lo cual y al igual que los otros sectores el agua es encausada al alcantarillado y en las zonas verdes se infiltra al suelo.

Al final el alcantarillado conducirá todas las aguas del sector hacia el río Surata, al igual que el agua infiltrada ya que es el flujo base de esta afluente.

### **3.9.1.1 Recarga del acuífero**

Esta se realiza como consecuencia de las precipitaciones pluviales sobre el macizo de Santander, aunque no existe porosidad primaria en muchos de los casos ya que en este sector predominan rocas cristalinas debido al entorno geológico el cual está compuesto principalmente por unidades ígneo – metamórficas (Neis de Bucaramanga pEb – Ortogneis de Berlin pDo – Formación silgara pDs – Tonalita del páramo Rico TRt – Cuarzo monzonita de la corcova TRJc - Cuarzo monzonita de Santa Bárbara Jcs – Formación Girón Jg – Formación los Santos Kils – Formación Paja Kip y Formación Tablazo Kit) cuya porosidad y permeabilidad se limita a lo que puede ofrecer la meteorización y/o sistemas de fracturas presentes debido a la tectónica de la zona (porosidad secundaria)<sup>9</sup>.

Para el lugar de estudio, el cual se encuentra sobre depósitos del cuaternario como es la formación Bucaramanga Qb, de origen Fluvial, esta cuenta con porosidad primaria, de acuerdo a BERMOUDES Y VASQUEZ; 2004<sup>10</sup>, los cuales mencionan a los miembros Órganos (Qbo) y miembro Gravoso (Qbg) como formaciones de interés Hidrológico, por su grado de porosidad e infiltración, pueden conducir y en un momento dado almacenar agua en espesores pequeños, para toda la zona

---

9 INGEOMINAS – UIS Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander – 2007.

10 - INGEOMINAS, Evaluación de agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander a escala 1:25000

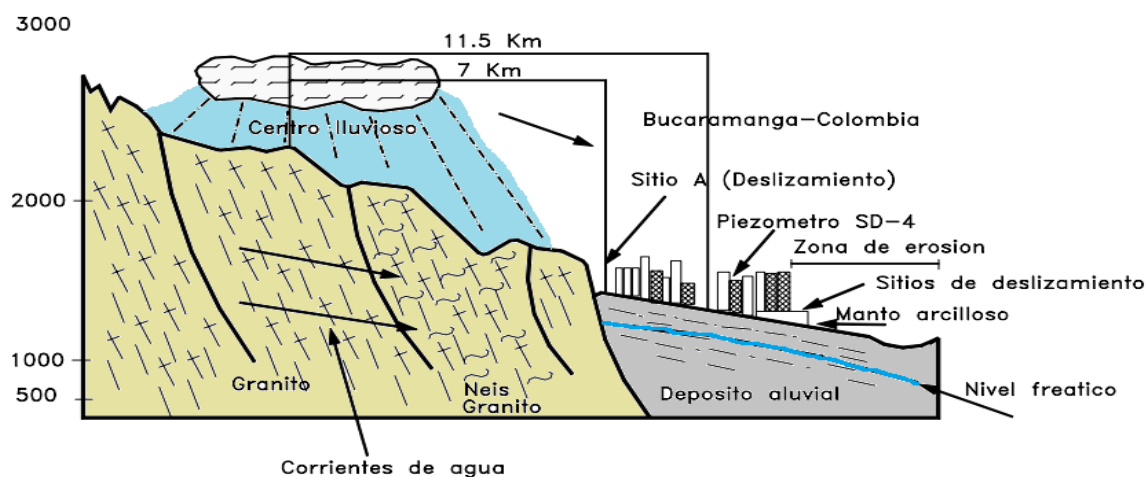
urbana de Bucaramanga la recarga se genera de dos formas, la primera de manera lateral, la cual capta todo el fluido proveniente del macizo de Santander en el contacto que se especifica por la falla de Bucaramanga y la segunda hace referencia a una recarga distribuida que se da en las zonas libre de construcciones o zonas verdes localizadas en la meseta,

Para los sectores Independencia, Bosque Norte y Nueva Colombia, de acuerdo al análisis de cobertura, se encuentra urbanizada en un 62%, una asociación de pastos, árboles y rastrojos en 11%, bosque secundarios en 6% y consociaciones entre rastrojos, pastos, árboles y suelos desnudos en un 10%, encontrándose suelos desnudos en 1%, por lo cual la gran parte de la precipitación es captada y conducida al alcantarillado, lo que no garantiza que existan fugas en el sistema, y las cuales también influyen en la recarga del acuífero o la infiltración primaria.

### **3.9.2 Análisis Hidrológico**

Para la zona de estudio, de acuerdo al análisis de precipitaciones para Bucaramanga, se considera como precipitación promedio 1270 mm por año, la estación Hidrológica base es la Universidad Industrial de Santander, que registra una intensidad de 255.96 mm/h para una concentración de 18 min y un periodo de retorno de 10 años, así mismo en esta caracterización, se reconoce que la zona de estudio tiene un régimen bimodal, que evacua la hidrología de la zona en estudio. En la siguiente figura se observa un esquema del modelo hidrológico de Bucaramanga.

Figura 57. Esquema del modelo Hidrológico de Bucaramanga<sup>11</sup>.



Fuente: Suárez, 1998

En la figura anterior se generaliza el flujo de agua que se obtiene durante los procesos de infiltración primaria y secundaria que comienza en el masivo de Santander ingresando de manera lateral al depósito aluvial donde se ubica la zona de estudio y llega a la parte baja en la zona (Rio Surata).

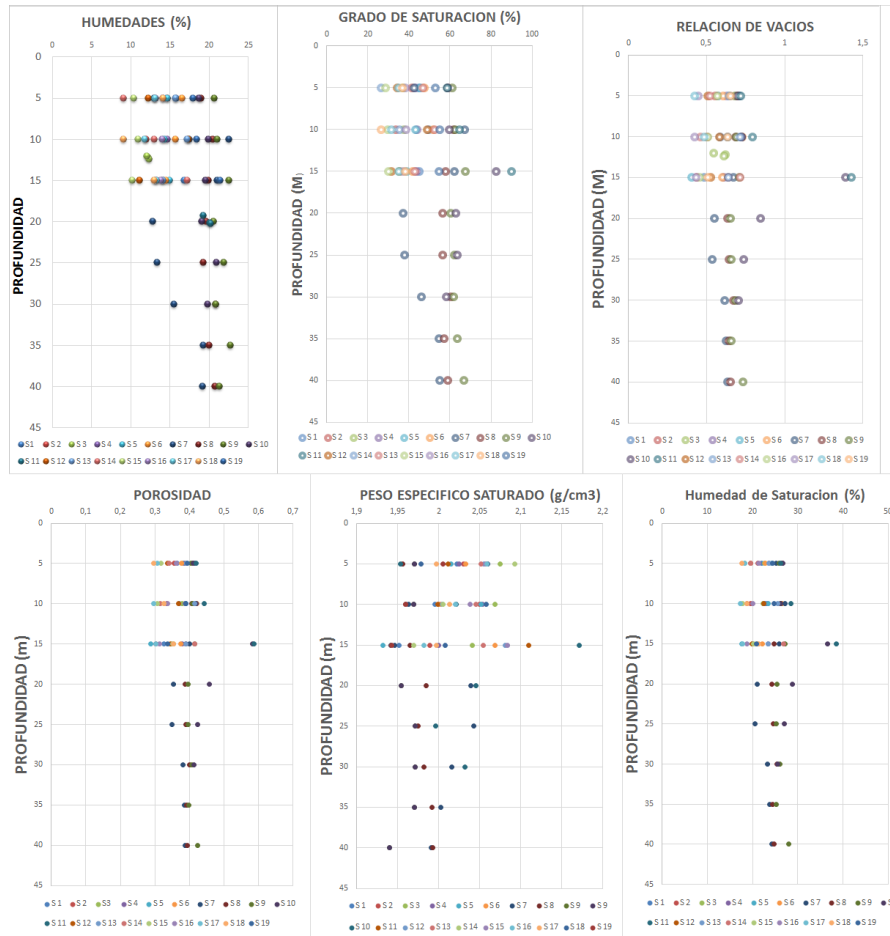
### 3.9.2.1 Condiciones topográficas

La zona de estudio se encuentra en el borde Norte de la meseta de Bucaramanga, con pendientes planas en la parte superior y la zona inferior que varían de 0% a 20% variando de muy baja a baja alcanzando porcentajes de 54%, pendientes entre 45% a 90% corresponden al 7%, las demás varían de 20% a 45% correspondiendo al 39% de la zona de estudio.

11 Tomado de Suarez Jaime. Libro de deslizamiento en zonas tropicales, capitulo 7: Lluvias, presión de poros y sus efectos.

### 3.9.2.2 Nivel freático, humedad y características hidráulicas.

Figura 58. Valores de porosidad, Humedad y grado de saturación, peso específico saturado, relación de vacíos y humedades.



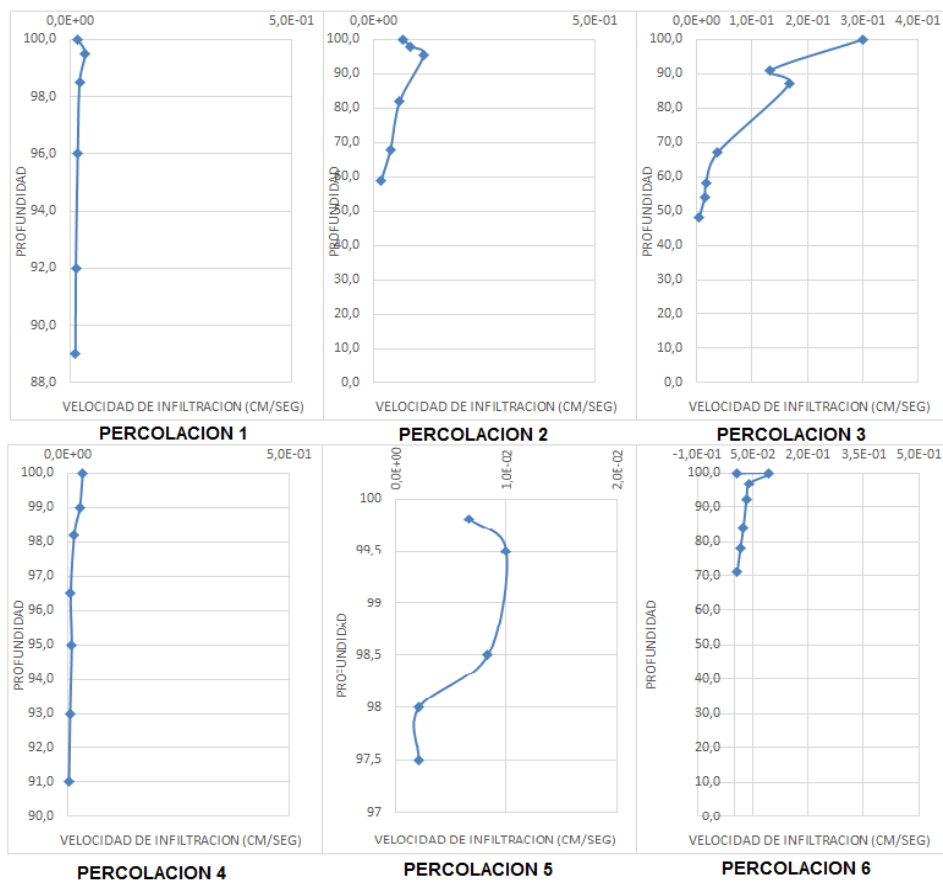
Fuente: Autor

De acuerdo a las perforaciones de campo realizadas en el sector Bosque Norte, Independencia y Nueva Colombia, con profundidades que van hasta los 40.0 m, no se encontró nivel freático, para la zona de estudio las humedades naturales analizadas se encuentran entre 9% a 23%.

Así mismo y utilizando las relaciones peso-volumen<sup>12</sup> para los suelos en estudio, se determinan ciertas propiedades características que se basan en la humedad, encontramos que el grado de saturación no supera el 80%, pero no es inferior al 20 %, la relación de vacíos varía entre 0.42 a 0.85 y el peso específico saturado es inferior a 2.09 g/cm<sup>3</sup>.

Así mismo durante los ensayos de percolación se muestra la siguiente variación:

Figura 59. Resultados de la Percolación



Fuente: Autor

12 Braja M Das. Ingeniería de cimentaciones. 2001, Capítulo 1: Propiedades geotécnicas del suelo, pág. 10.

En la figura anterior se muestra la velocidad de infiltración en la capa superficial, en ella se observa que la velocidad inicial es superior ya que inicia el proceso de saturación del suelo, disminuyendo a medida que aumenta en el tiempo, la rata promedio de infiltración es media variando de 0.014 cm/seg a 0.092 cm/seg, con excepción del estrato inferior del miembro órganos arcillo donde es baja con un valor promedio de 0.005 cm/s.

De acuerdo a ensayos registrados en el área metropolitana de Bucaramanga y a la formación aluvial descrita en el sector Bosque Norte, Independencia y Nueva Colombia, se obtuvieron medidas de permeabilidad más bajas, 0.00002 m/s, siendo el más típico 0.00010 m/s a grandes profundidades (CDMB - Gómez Sully 1989<sup>13</sup>), además de dar a conocer un coeficiente de almacenamiento el cual es de 0.00611 y una transmisibilidad de 0.0003 m<sup>2</sup>/s, determinándose una porosidad de 30% aproximadamente, los valores anteriores son obtenidos de una prueba de bombeo realizado y tomado del estudio de referencia.

Al comparar el ensayo de percolación realizado actualmente en la zona de estudio con los valores típicos mostrado en estudios anteriores, es posible deducir en superficie el alto contenido de infiltración el cual se reduce conforme se aumenta en profundidad, lo mismo ocurre con la porosidad ya que en superficie es superior acercándose a los valores de 35% en promedio.

En condiciones generales, cuando existe un evento de lluvia de manera normal o crítica, dentro de suelo se genera un frente húmedo, el cual dependerá del grado de saturación, permeabilidad y porosidad, conociendo estas condiciones, se determina su velocidad de acuerdo a lo siguiente:

$$v = \frac{k}{(1 - S) * n}$$

---

<sup>13</sup> CDMB - Gómez Isidro, Sully. Relaciones entre Niveles freáticos, precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes

Para la zona de estudio la velocidad del frente húmedo se generó de la siguiente manera:

Tabla 22. Velocidad de Frente Húmedo.

Profundidad (m)	velocidad (cm/s)
0-5	0,06
5-10	0,06
10-15	0,07
15-20	0,06
20-25	0,06
25-30	0,06
30-35	0,06
35-40	0,05

Fuente: Autor

Como el frente húmedo avanza saturando todos los estratos, Lumb en 1975 determino que los frentes contribuirán al aumento de los niveles freáticos, generando así una ecuación en la cual se pueden determinar los espesores

basándose en la duración del evento de precipitación, la porosidad, la permeabilidad y el grado de saturación:

$$h = \frac{k * T}{n * (S_F - S_0)}$$

Para el lugar de estudio se determinó asumiendo saturación total de los estratos por lo cual se obtuvieron los siguientes espesores del frente húmedo:

Tabla 23: Espesores de Frente Húmedo.

Profundidad (m)	Espesores frente húmedo (m)
0-5	0,38
5-10	0,38
10-15	0,40
15-20	0,34
20-25	0,35
25-30	0,33
30-35	0,34
35-40	0,33

Fuente: Autor

De acuerdo al análisis anterior, a nivel superficial, sobre la cabeza del talud, el frente húmedo se infiltrara hasta obtener un espesor de 0.36 m el cual por gravedad bajara en un tiempo determinado (meses) hasta la zona de recarga del acuífero.

### **3.9.3 Análisis de infiltración.**

Con el fin de realizar el modelo geológico geotécnico en condiciones extremas de nivel freático, es necesario conocer el comportamiento hidrológico de la zona, y con metodologías racionales, calcular los niveles de infiltración y el aumento de los niveles freáticos. Puntualmente en el proyecto, se identifica un suelo aluvial matriz-soportado, el cual presenta infiltración moderada, de gran espesor y alta compactación, el cual de acuerdo a autores como BERMOUDES Y VASQUEZ - 2004, son suelos de almacenamiento de acuíferos.

Con el propósito de estimar el ascenso de los niveles se acudió al método de la Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados (SCS). Según este método, la infiltración diaria (q) corresponde a la precipitación diaria (P) menos la escorrentía superficial (R):

$$q = P - R$$

Donde, P: datos suministrados por el IDEAM y se toma como base la mayor precipitación en 24 horas registrada en la estación UIS desde 1967 a 2001 como se observa en el respectivo capítulo de evaluación hidrológica.

$$R = (P - 0,2 Fw)^2 / (P + 0,8 Fw).$$

Fw es un coeficiente que se calcula como  $Fw = (1000/CNI) - 10$ .

CNI se obtiene a partir de un segundo coeficiente CN II que depende de las características del suelo y de la cobertura vegetal de sitio.

Tabla 24. Números de Curva para los usos Potenciales

USO POTENCIAL	CN
BOSQUES	66
EXPANSION URBANA	90
ZONA DE PROTECCION	65
ZONA URBANA	90
CULTIVOS	76

Fuente: Soil Conservation Service - SCS

A continuación se presenta el cálculo del aumento de los niveles freáticos para el modelo geológico geotécnico.

Tabla 25. Cálculo del ascenso máximo del nivel freático (SCS)

VARIABLE	CLASIFICACION	OBSERVACION
Uso de Suelo	Cu+P+Ar+R+Bs	Asociaciones y consociaciones de Construcciones Urbanas, Pastos, Arbustos, Rastrojos, Bosques secundarios y Suelos desnudos
Tratamiento o Practica	Área Urbana	Área Urbana, Área de expansión urbana ilegal, zona de protección
Condición Hidrológica	Pobre	El 62% del área en estudio corresponde a zonas de construcción urbana
Grupo Hidrológico de Suelo	B	Suelos de infiltración moderada, compuestos por material fino de manera moderada, medianamente profundos
CN II	90	Bosques: 66, Expansión Urbana: 90, Zona de protección: 65, Zona urbana 90, Cultivos:76
CN I	79,65	$CN I = CN II / (2,3 - 0,013CN II)$
Fw	2,56	$Fw = (1000 / CN I) - 10$

Precipitación diaria P	3,96 pulg	100,60 mm	Capítulo 10.4,3,4, sección de Análisis Hidrológico
R	1,98 pulg	50,33 mm	$R = (P - 0,2 Fw)^2 / (P + 0,8 Fw)$ .
Infiltración diaria q	1,98 pulg	50,27 mm	$q = P - R$
Duración critica	8 días		
Infiltración total	15,83 pulg	402,15 mm	
FS	3,00		
Ascenso Máximo del nivel freático	47,50 pulg	1,21 m	

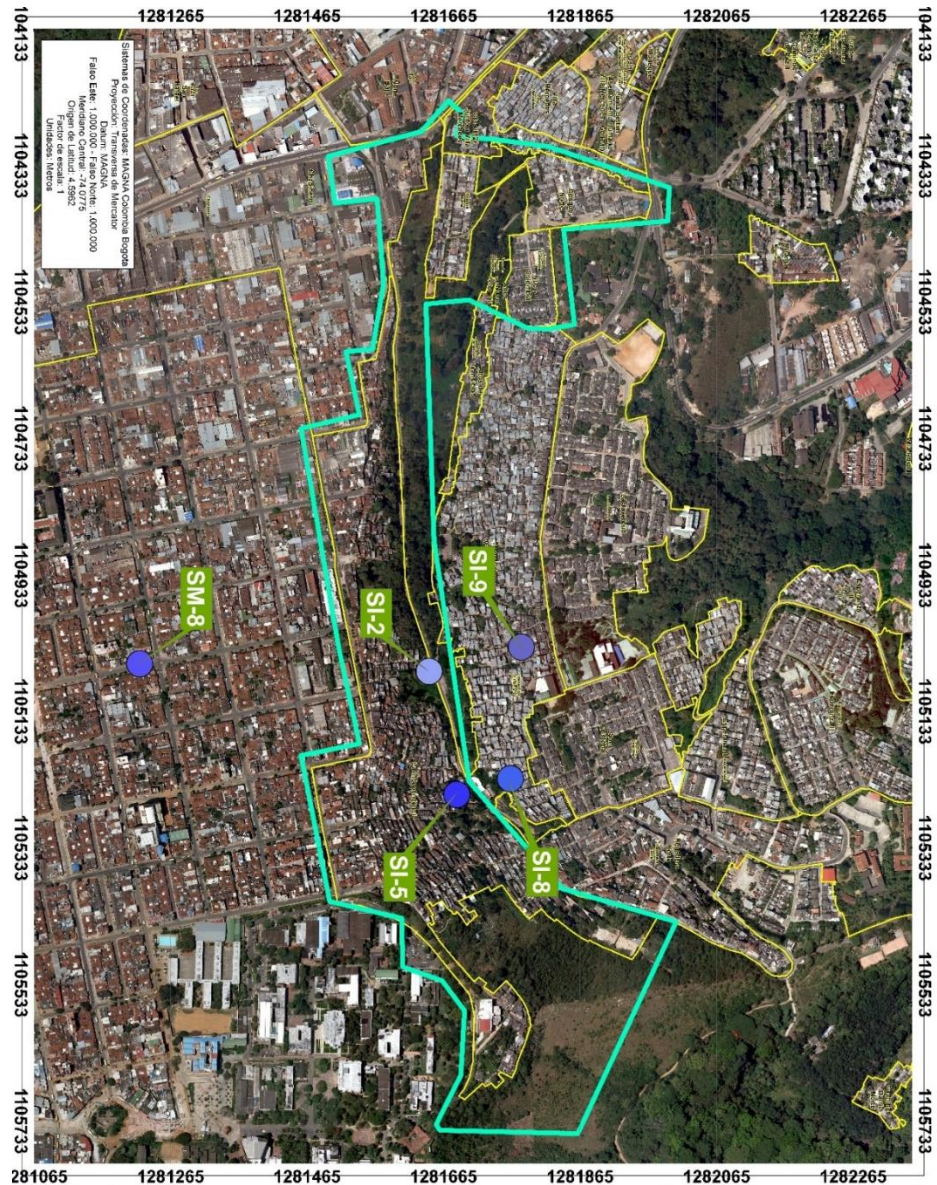
Fuente: Autor

El ascenso de nivel freático calculado es de 1.21 m para un día de infiltración por precipitación, pero no se toma en cuenta las variaciones del nivel causado por acumulación de infiltración en el subsuelo, el cual como se verá más adelante en el análisis de los niveles piezométricos, supera ampliamente ya que las fluctuaciones se dan alcanzando valores superiores a 10.0 m.

#### **3.9.4 ANÁLISIS DE PIEZÓMETROS DE LA ZONA DE ESTUDIO.**

Los piezómetros localizados en la zona de estudio son los mostrados, haciendo referencia a las denominaciones SI-2, SI-5, SI-8 y SI-9, al mismo tiempo se darán a conocer valores medidos en piezómetro localizados en diferentes sectores de la meseta de Bucaramanga (piezómetros SM-1, SM-2, SM-3, SM-5, SM-6, SM-7 y SM-8).

Figura 60. Localización de piezómetros aferentes a la zona en estudio.



Fuente: CDMB y Gómez, 1989.

Los piezómetros denominados SM-1, SM-3, SM-5, se encuentran en la zona oriental de la meseta por lo cual se muestran fluctuaciones de nivel freático que van desde

9.77 m a 21.78 m, teniendo un promedio de 12.18m, y van aumentando a medida que llegan al borde de la escarpa, como se evidencia en los piezómetros SM-6, SM-7 y SM-8, donde la fluctuaciones van desde 21.14m a 28.53 m, existiendo un promedio de 17.46m y siendo mayor en la zona próxima de la escarpa a 25.91m, desplazándose el flujo de manera paralela al terreno, cuyo medio de conducción es el miembro gravoso (Sft2) de la formación Bucaramanga, precipitando la caída al llegar a la zona de estudio, por el aumento del gradiente hidráulico, al carecer el sector norte del miembro finos (Sfl1), los miembros Órganos (Sft3) y Gravoso (Sft2) se unen, por lo cual se amulan la salida de flujo en el sector ya que existirá un solo acuífero primario, acercándose a la superficie, esto se observa en la zona del barrio independencia parte baja y en el barrio transición; en la parte baja del barrio independencia, donde el nivel piezómetro varia de 6.4 m a 21.4 m, estos se ubican en la zona de pendiente del talud, en la parte baja donde la geomorfología es plana (barrio transición, nueva Colombia y Bosque norte bajo), la variación del nivel freático es de 3.6 m a 9.3, por lo cual es posible el afloramiento de agua, como ocurre en la zona de los lavaderos de barrio La Transición.

De acuerdo a este análisis, las fluctuaciones (aumento) de agua en la meseta es de 1.3m a 4.21 m; en la zona baja del barrio Independencia este aumento en el nivel freático es de entre 2.41m a 11.06m, mientras que en la zona plana (barrio Transición, Bosque norte bajo y Nueva Colombia) las fluctuaciones de altura del nivel freático son entre 0.48 m a 2.39 m.

Tabla 26. Piezómetros zona Transición.

<b>PIEZÓMETROS ZONA DE TRANSICIÓN (1984-1991)</b>				
<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>SI-2</b>	<b>SI-8</b>	<b>SI-5</b>	<b>SI-9</b>
<b>NIVEL MÁXIMO (m)</b>	878,2	832,51	869,98	826,35
<b>NIVEL MÍNIMO (m)</b>	872,4	830,21	854,93	821,66
<b>NIVEL PROMEDIO (m)</b>	875,8	830,69	865,99	823,96
<b>CANTIDAD DE LECTURAS</b>	60,0	62	57	45
<b>COTA DEL TERRENO (m)</b>	885,5	836,07	876,33	830,94
<b>PROF. NI MIN (m)</b>	7,3	3,6	6,4	4,6
<b>PROF. NF MAX (m)</b>	13,1	5,9	21,4	9,3
<b>PROF. NF PROM (m)</b>	9,7	5,4	10,3	7,0

Fuente: CDMB y Gómez, 1989

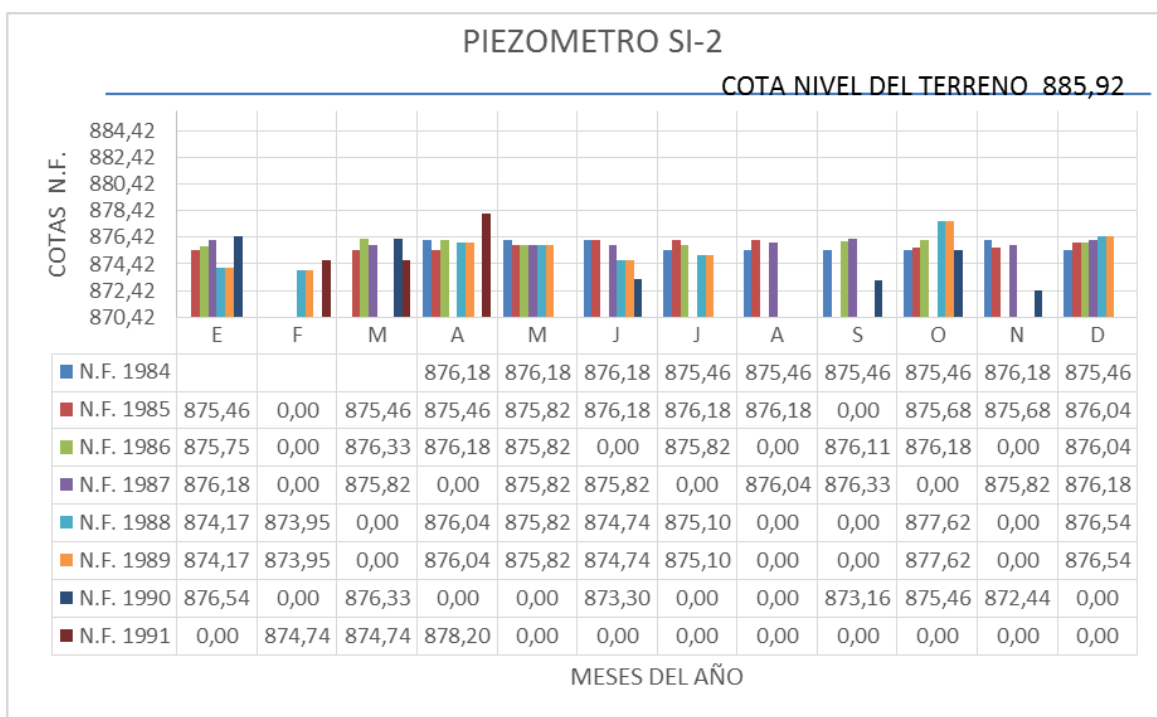
Tabla 27. Piezómetro Zona Meseta de Bucaramanga

<b>PIEZÓMETROS ZONA DE LA MESETA (1984-1991)</b>							
<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>SM-1</b>	<b>SM-3</b>	<b>SM-5</b>	<b>SM-6</b>	<b>SM-7</b>	<b>SM-8</b>	<b>SM-11</b>
<b>NIVEL MÁXIMO (m)</b>	1029,16	1027,44	1019,13	980,09	971,32	939,11	1029,35
<b>NIVEL MÍNIMO (m)</b>	1025,45	1019,52	1014,09	977,14	963,54	936,23	1023,59
<b>NIVEL PROMEDIO (m)</b>	1026,75	1023,23	1016,11	978,13	967,22	937,75	1025,72
<b>CANTIDAD DE LECTURAS</b>	57	60	62	57	61	47	60
<b>COTA DEL TERRENO (m)</b>	1038,93	1041,3	1035,1	1005,67	984,68	963,66	1030,67
<b>PROF. NF MIN (m)</b>	9,77	13,86	15,97	25,58	13,36	24,55	1,32
<b>PROF. NF MAX (m)</b>	13,48	21,78	21,01	28,53	21,14	27,43	7,08
<b>PROF. NF PROM (m)</b>	12,18	18,07	18,99	27,54	17,46	25,91	4,95

Fuente: CDMB y Gómez, 1989

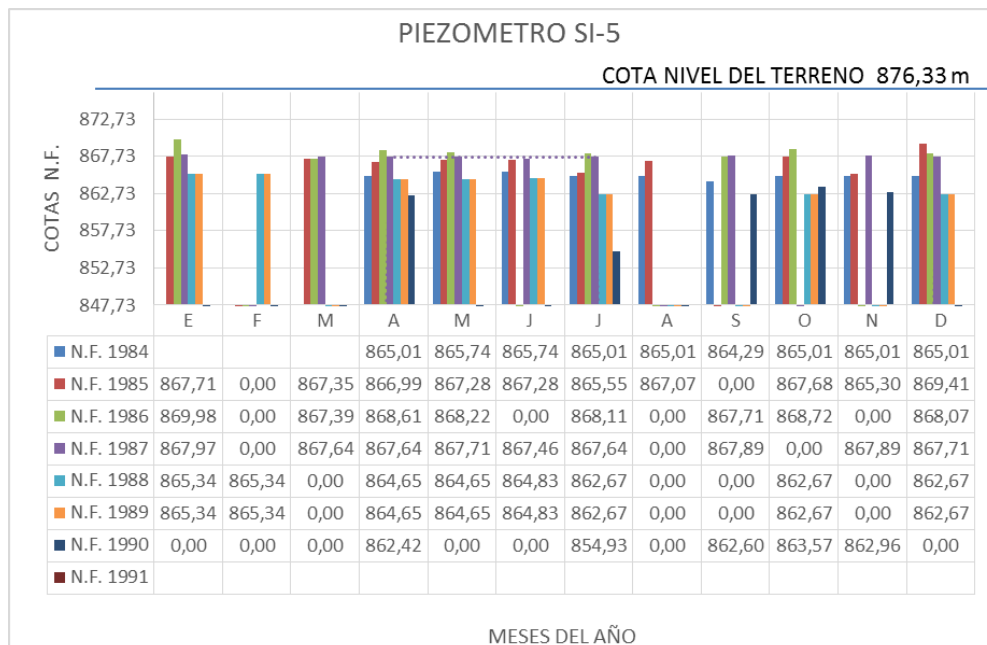
Los resultados mostrados en las tablas anteriores se obtuvieron a partir de los datos de campo tomados de los instrumentos de medición entre los años de 1984 a 1991, todas estas variaciones son también mostradas dentro del estudio de la CDMB-Sully 1989, cuyo ejemplar se encuentra dentro de la biblioteca de la corporación ambiental.

Figura 61. Piezómetro SI-2.



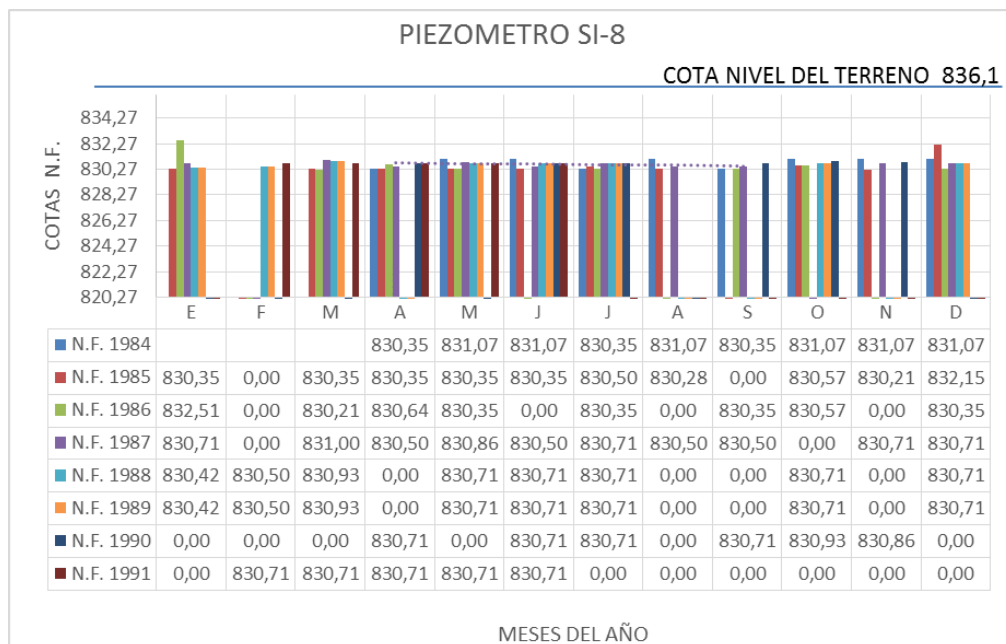
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 62. Piezómetro SI-5.



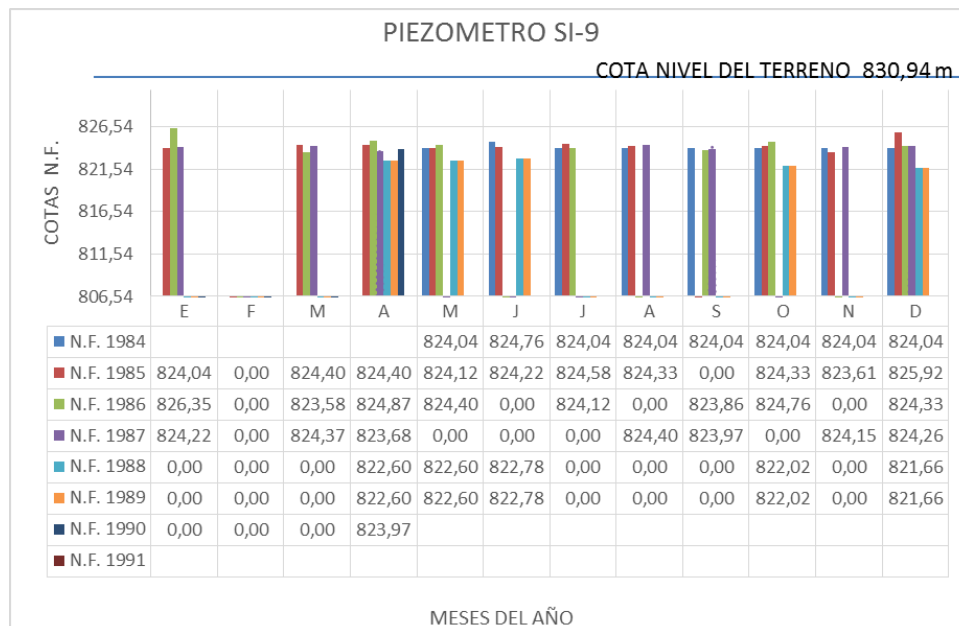
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 63. Piezómetro SI-8.



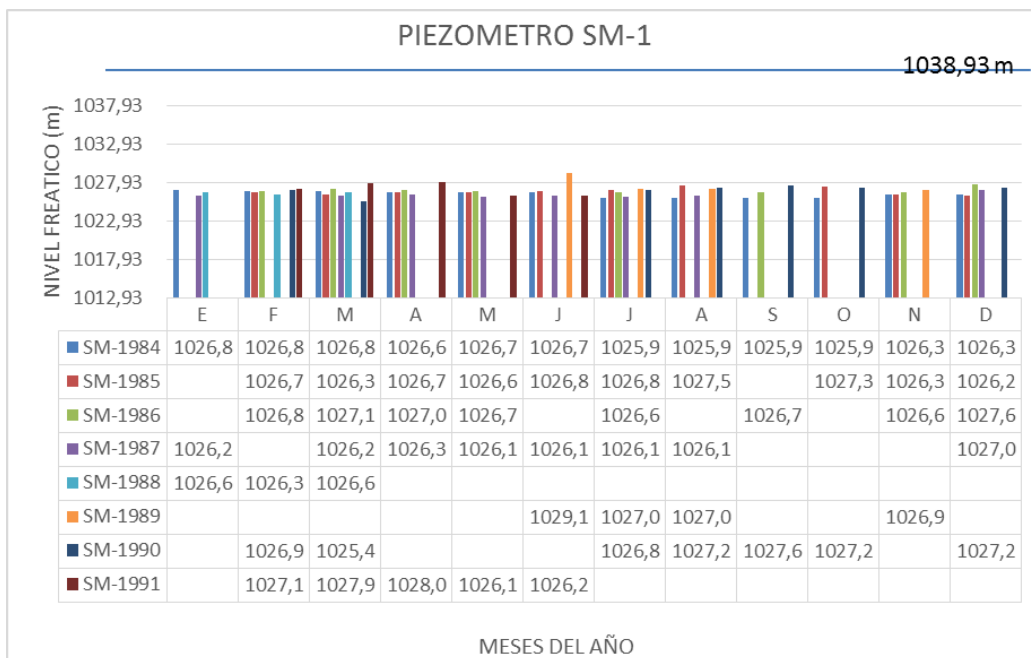
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 64. Piezómetro SI-9.



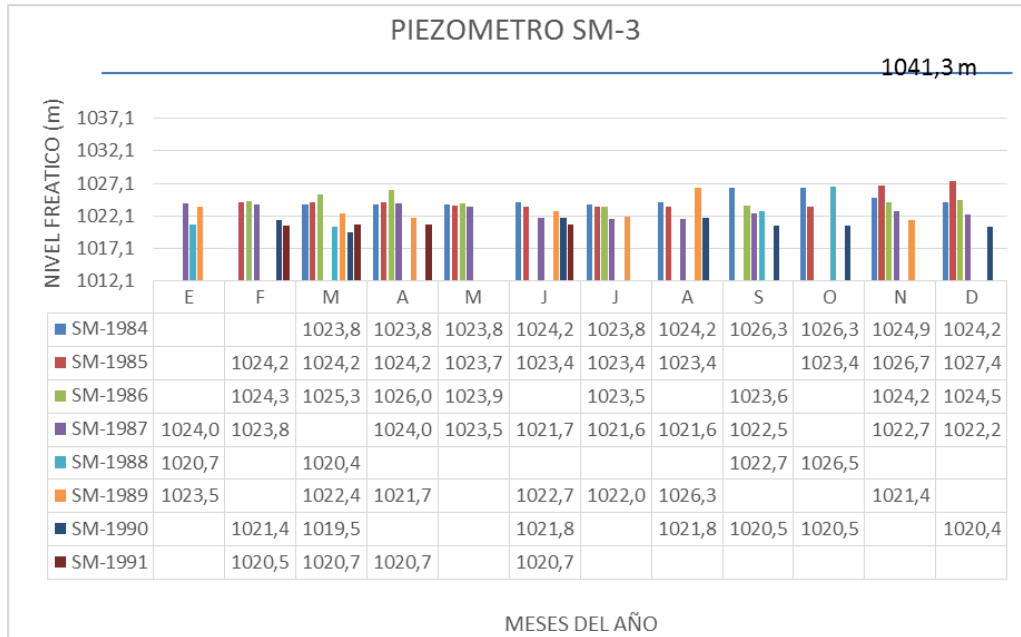
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 65. Piezómetro SM-1.



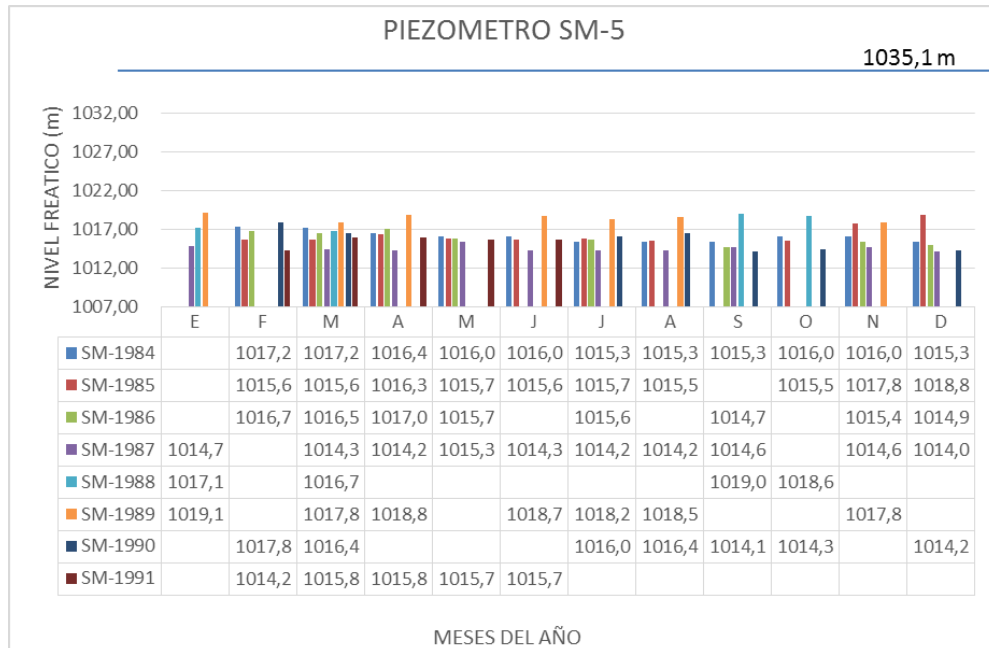
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 66. Piezómetro SM-3.



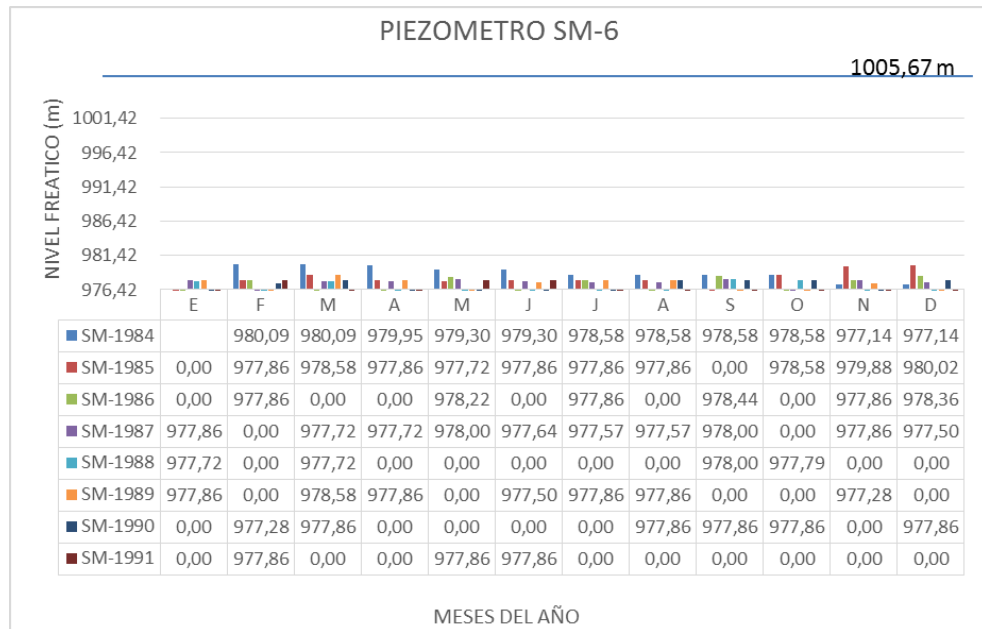
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 67. Piezómetro SM-5.



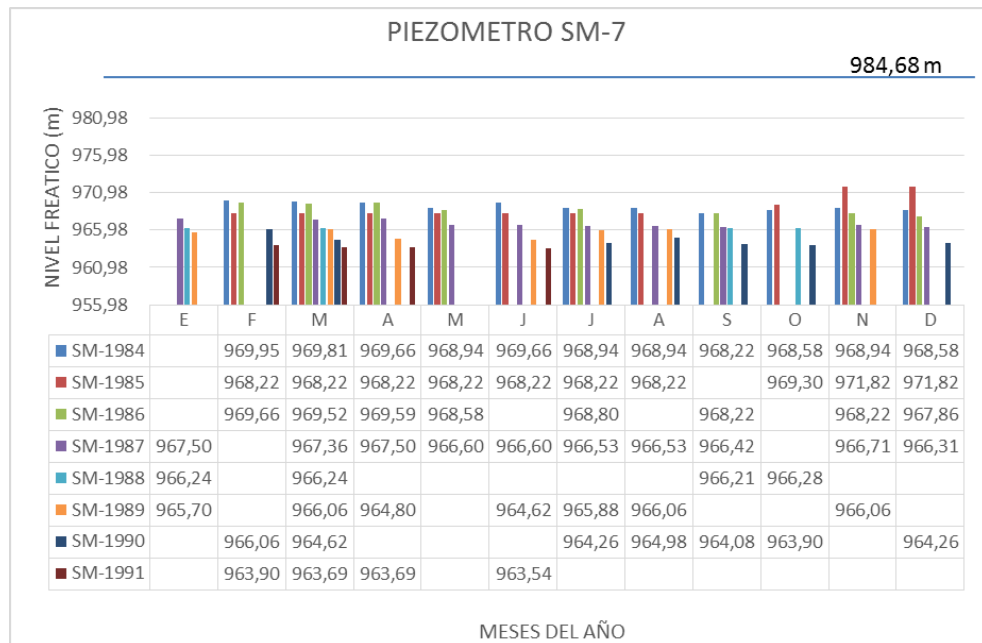
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 68. Piezómetro SM-6.



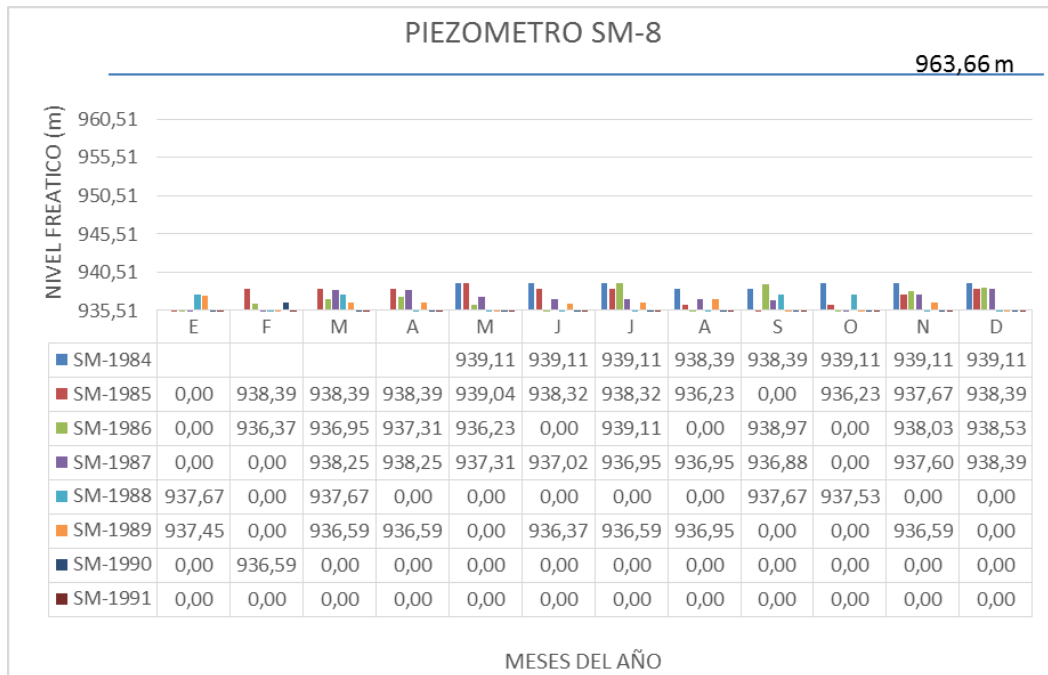
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 69. Piezómetro SM-7.



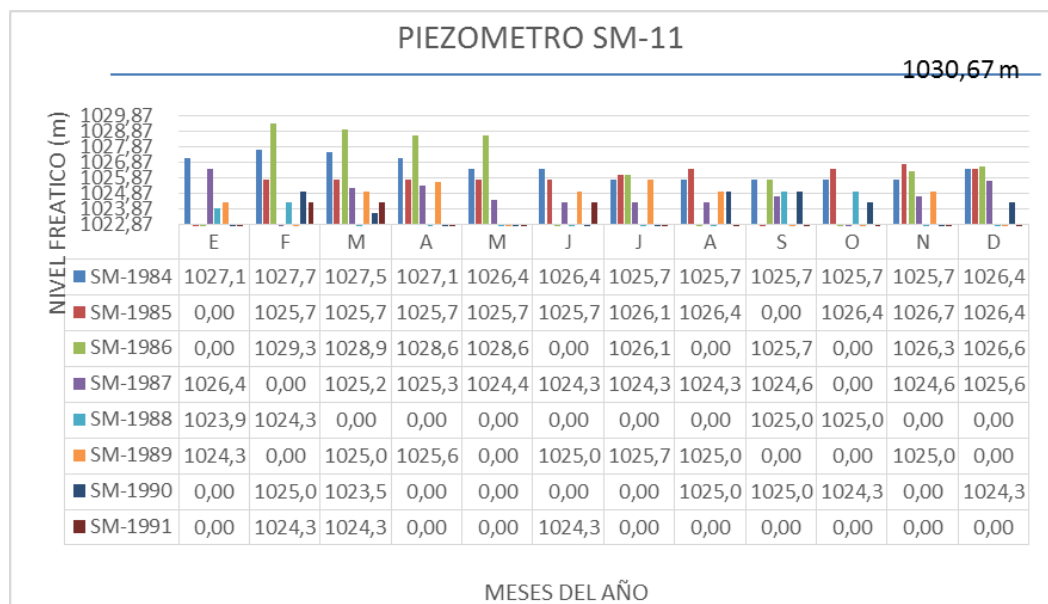
Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 70. Piezómetro SM-8.



Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Figura 71. Piezómetro SM-11.



Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Los datos tomados durante 1984 a 1991 corresponden a años en los cuales se registraron precipitación normales con excepción del año de 1988 donde se registran los picos altos, panoramas que se muestra en el histórico de precipitación multianual analizado por Jaime Suarez (2004), para el periodo comprendido entre el inicio de toma de datos de cada estación hasta el año 2004, sin tomar en cuenta los máximos de precipitación del año 2005 el cual es el mayor registrado en la zona, dichas variaciones y precipitaciones acumuladas, no corresponden a los periodos donde de acuerdo a los datos recolectados de los instrumentos se presentan los máximos de cota piezométrica, los cuales corresponden a los años de 1985, 1986, 1987 y 1989, por lo cual las variaciones predominantes en el nivel del acuífero no depende de las lluvias registradas dentro de la meseta, depende de las precipitaciones originadas en el macizo de Santander y más exactamente en el páramo de Santurban y Berlin. (CDBM y Gómez, 1989)

### **3.9.5 Relación entre lluvias y niveles freáticos**

De acuerdo al estudio “Relaciones entre Niveles freáticos, precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes”, durante el análisis el cual se realiza mediante la medición de precipitaciones y el nivel freático en diferentes sectores del área metropolitana de Bucaramanga, se observa el incremento de los niveles piezómetros debido a eventos de lluvia, este incremento del nivel freático sucede dos meses después de ocurrida la precipitación para la zona occidental de la meseta y de manera inmediata para la zona oriental, esto se atribuye al espesor de la capa de la formación Bucaramanga, la cual es amplia al occidente y además por la presencia de la falla Bucaramanga que se encuentra al oriente y que genera mayor fracturamiento de las formaciones. (CDBM y Gómez, 1989).

Para el sector Bosque Norte, Independencia y Nueva Colombia, no se detectó nivel freático a 40 m de profundidad (Tomando como referencia la perforación más profunda) alcanzada por la perforación en la parte alta del talud y de 15 m en la parte baja del mismo, el cual estará presente después de dicha profundidad, por lo cual las fluctuaciones del nivel freático por precipitaciones dadas para periodos de retorno de 50 años para una duración de 18 minutos e intensidades de 255.96 mm/H, que tendrá un frente húmedo de 0.36 m, que no superan el aumento en 2.00 m y que de acuerdo al análisis de infiltración es de 1.2 m, esta variaciones se corroboran de acuerdo al estudio referenciado anterior mente (CDMB - Gómez Sully 1989), el cual se presenta en la zona plana del sector, en la zona de la meseta (parte alta del lugar de estudio), es posible tener mayor aumento, tal como se muestra en los piezómetros el cual puede ser por el orden de los 4 m, mientras que la zona de mayor pendiente al encontrarse cambio en el gradiente hidráulico ya que este aumenta, las variaciones pueden ser en el orden de los 10 m, en la parte baja es factible encontrar variaciones de 2 m. (CDMB y Gómez, 1989).

### **3.9.6 Análisis de deslizamientos**

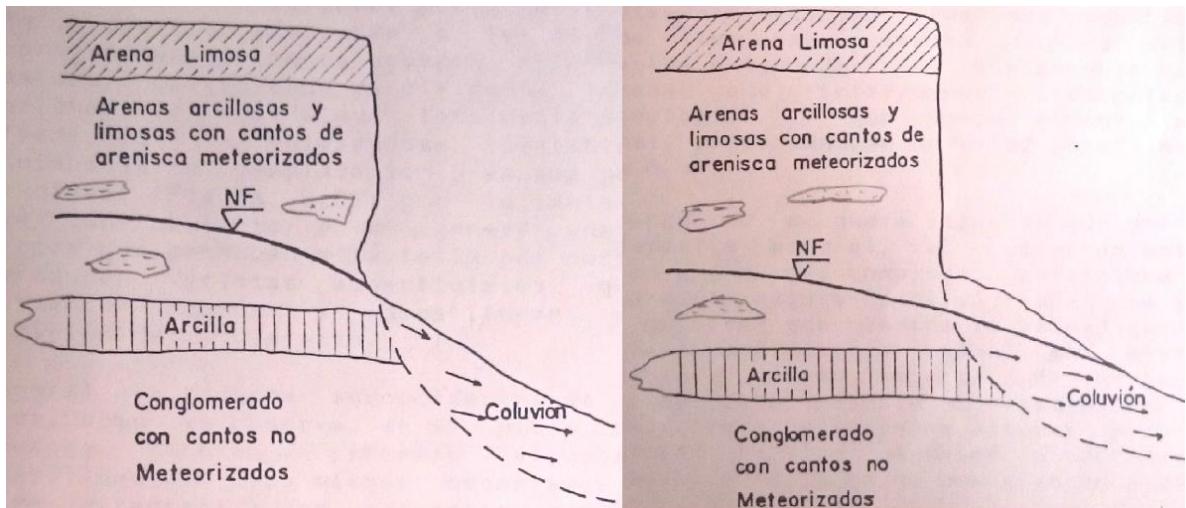
De acuerdo a los modelos hidrogeológicos, el agua infiltrada corre de oriente a occidente y para la zona norte de Bucaramanga con un gradiente hidráulico bajo y paralelo al terreno, cuando se acerca a la zona de escarpa o a la ladera, el gradiente aumenta y se presentan afloramientos.

Los afloramientos se presentan de dos tipos, el primero ocurre por encima o en el pie del talud, por lo cual allí se presentan mayores velocidades de flujo y fuerzas de filtración, generándose una zona crítica por la cual se debilita la superficie de contacto produciendo caídos de suelo.

El segundo tiene que ver con la obstrucción de la salida del afloramiento por depósitos de deslizamientos recientes (Coluviones). El agua fluye saturando dichas

masas, produciendo así un movimiento paulatino, generando pérdida de soporte del talud que soportaba el coluvión y generando fallas de corte que desembocan en un fracturamiento del terreno que favorecen en un caso dado el proceso de infiltración agilizando el deslizamiento.

Figura 72. Mecanismos de falla



Fuente: CDMB y Gómez, 1989

Para la zona de estudio en la parte baja de Bosque Norte y Nueva Colombia se evidencia la presencia de masa de coluvión, aunque su espesor no supera los 6 m, así mismo se evidencia la existencia de afloramientos en barrio cercanos a la zona de estudio, los cuales se generan por el cambio geomorfológico existente ya que pasa de una pendiente considerable a una pendiente plana, lo anterior es causado por el cambio de matriz de arena limosa a arcillosa con arena en el estrato del miembro de la formación órganos (Sft3), por lo que se pueden generar desprendimientos de material y movimientos en masa, evidencia de ello es la existencia de Coluviones en el sector.

### **3.9.7 Relación de Lluvias – Deslizamientos**

De acuerdo al estudio de la CDMB –Gómez Sully de 1989, se evidencia en el análisis de frecuencia de las lluvias en el área metropolitana de Bucaramanga y la frecuencia de los deslizamientos, se concluyó que el deslizamiento ocurre en épocas de verano y no en las épocas de lluvia, se presenta cuando han transcurrido 2 o 3 meses de la lluvia más representativa del periodo de precipitación, y en su mayoría se asocian a lluvia presentadas en periodos secos.

Para la zona de Bucaramanga (el sector de la meseta) y donde existen depósitos aluviales (Girón, Floridablanca y Piedecuesta) los deslizamiento se presenta en periodos entre abril a junio o en agosto a noviembre, son productos del aumento de acuífero que en algunas ocasiones provoca un debilitamiento de la superficie generando fallas de tensión, y en muchas ocasiones al someterse a una precipitación no considerada, genera el deslizamiento al ocurrir mayor infiltración y saturación de las grietas, provocando desprendimientos de suelos.

Para el sector de El Bosque, La Independencia y Nueva Colombia, la ocurrencia de deslizamientos se puede presentar por los afloramientos de agua sobre la vía (Calle 3), en los cuales al saturarse el pie de esta ladera, es posible la ocurrencia de falla, mientras que en el sector de bosque norte y nueva Colombia se puede presentar por la saturación de los coluviones un movimiento de los mismos

### **3.9.8 Afectación de la zona por problemas de agua**

Durante el recorrido por los taludes descubiertos de la zona de estudio, no se evidencio problemas severos de inestabilidad por afloramientos de agua, pero si se evidencia antiguos deslizamiento ocurridos por concentración de humedad, como el observado sobre la calle 3, en el cruce con la calle 2, barrio Independencia, por lo cual es probable la existencia de niveles de saturación colgados o saturación de suelos, asociados a la existencia de pequeños lentes de material fino poco

permeable que son característicos de la formación Bucaramanga (miembro gravoso - Sft2) y a posibles fallas de la red de servicio de acueducto y alcantarillado asociado a fugas, lo cual en la actualidad se descarta ya que no existe humedades o brotes de agua aferentes en las zonas urbanizadas, enfatizando que la vista se realizó en tiempo de verano, por lo cual cualquier infiltración es fácilmente apreciable.

La posible ocurrencia de fallas con respecto a la influencia de los niveles de agua se presentaría entonces por falla en el pie de la ladera donde es posible el afloramiento del agua como una forma de respuesta al alivio de presión de poros que puede ser generado por un evento de lluvia intenso y crítico, mas no por problemas de infiltración puntal del sector.

Es necesario revisar la entrega de escorrentía del sector la cual en su mayoría es captada por las zonas peatonales y que pueden generar concentraciones de flujo que al final generen saturaciones momentáneas en la parte baja de los taludes, principalmente la zona de Boque Norte Parte alta e Independencia, y lo que desencadena desprendimientos de suelo siguiendo el modelo presentado por (CDMB y Gómez, 1989).

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 ANÁLISIS GEOLÓGICO**

#### **4.1.1 Unidades geológicas superficiales (UGS)**

En el presente estudio se caracterizaron y se cartografiaron las unidades geológicas superficiales a escala detallada, de acuerdo a las características físico-mecánicas de los diferentes suelos y materiales rocosos presentes en el área de estudio.

Las Unidades Geomorfológicas Superficiales corresponden a un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros (Hermelin, 1987). Estas formaciones superficiales incluyen rocas con diferente grado de meteorización, suelos y depósitos inconsolidados según su origen, son correlacionables con procesos morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre. La caracterización geológica de estas unidades permite evaluar el comportamiento mecánico de un terreno, siendo esta evaluación el insumo principal para el desarrollo de obras civiles. A partir de esta información se elabora el mapa de Unidades Geológicas Superficiales, el cual proporciona de manera visual las condiciones físicas de estas unidades en superficie.

##### **4.1.1.1 Unidades de Suelo**

Para la clasificación de las Unidades de Suelo, se tuvo en cuenta la nomenclatura utilizada por INGEOMINAS (2007), la cual subdivide los suelos en transportados, antrópicos y residuales, de acuerdo al origen de los materiales. En el área estudiada se reconocieron suelos transportados y antrópicos. En el área se reconocieron 5 unidades geológicas superficiales principalmente suelos del Miembro Órganos, suelos gravosos del Miembro Gravoso, suelos del miembro Limos Rojos, suelos

Coluviales y finalmente suelos de relleno antrópico (Botaderos), estos últimos no cartografiables debido a su pequeña extensión. A continuación se describirán las características de cada una de estas unidades.

Figura 73. Principales Formaciones geológicas presentes en la zona



Fuente: Autor

#### 4.1.1.2 Suelo Gravoso del Miembro Órganos (Sft3)

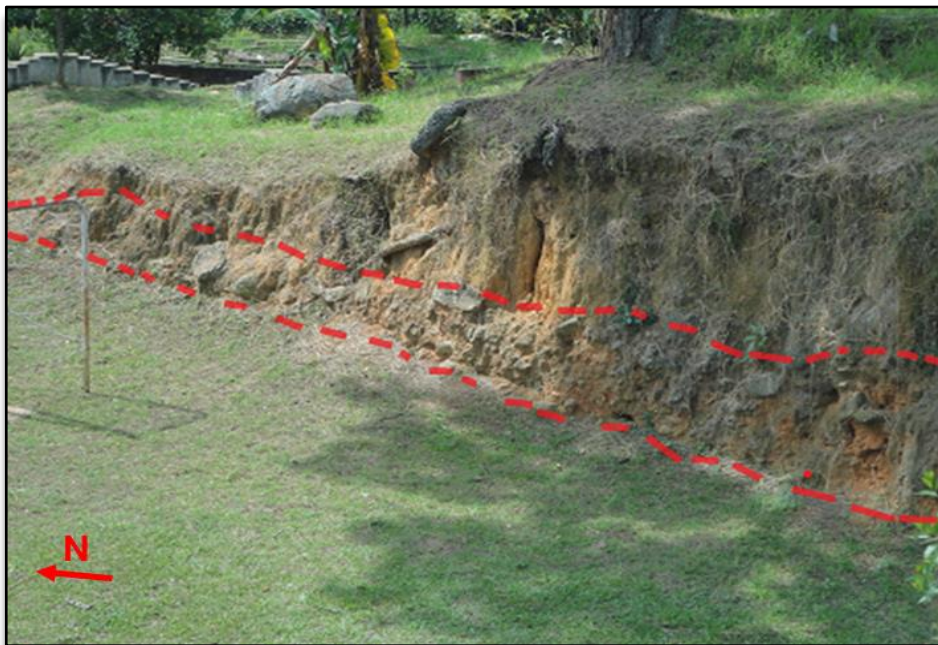
Corresponde a un depósito matriz soportado, cuya matriz es limo-arcillosa, de color gris claro, con tintes marrones y rojizos por alteración, altamente erodable. Presenta bloques y cantos redondeados de arenisca cuarzosa micácea de grano fino. También se aprecian limolitas rojas alteradas, bloques de esquistos, cantos de cuarzo, conglomerados y cuarcitas frescas. Esta unidad presenta lentes de arcillas limo-arenosas con variación lateral areno gravosa, presencia de líticos, micas y restos de materia orgánica y presenta un comportamiento consistente en estado

seco, pero al absorber agua pierde totalmente la consistencia y la matriz se desintegra.

Tiene alta permeabilidad y es fácilmente erodable lo cual permite la caída de bloques en épocas de lluvias, originando surcos, cárcavas y tierras malas. Estos procesos contribuyen a la formación de estoraques los cuales alcanzan hasta 10 m de altura (INGEOMINAS, 2007). Esta unidad se observa en la zona de estudio hacia el sur de la carrera 0 en donde se observa un suelo matriz-soportado con una relación de clastos y matriz de 80%-20%.

La matriz es areno-limosa-arcillosa, de color parduzca, la cual envuelve cantos de hasta 50 cm de diámetro, sub-redondeados a sub-angulares y sub-alargados a sub-esféricos, principalmente de litología sedimentarias composición cuarzosa, con algo de micas, se observan algunos cantos gnéisicos.

Figura 74. Suelos del Miembro Órganos



Fuente: Autor

#### 4.1.1.3 Suelos Miembro Gravoso (Formación Bucaramanga) Sft2

Se caracteriza por un suelo matriz soportado con una matriz areno-limosa de color amarillento-Naranja, compuesto de granos de tamaño arena media y limos (80% y 20 % respectivamente), de consolidación intermedia y con presencia de cantos y bloques compuestos de rocas sedimentarias con posible proveniencia de las formaciones Girón y Jordán, también se observa la presencia de clastos de neises y rocas ígneas, (INGEOMINAS, 2007). En la zona de estudio se observa un suelo areno-arcilloso de color amarillo-parduzco, con cantos de hasta 30 cm de diámetro, redondeados y esfericidad media, de diferentes litologías como granitos de color blanco (compuesto principalmente de QTZ; PLG Y MSC (5%) y algunos FKS) también se observa la presencia de algunos cantos de Cuarzo-arenitas de grano medio, bien cementada como QTZ en más de 95%. Se observan características del Miembro Gravoso. Esta unidad aflora sobre la margen derecha de la vía que comunica desde el CAI de la Virgen hacia el barrio la Independencia.

Figura 75. Suelos del Miembro Gravoso



Fuente: Autor

#### 4.1.1.4 Sfl2 Suelos del Miembro Limos Rojos (Formación Bucaramanga)

Esta unidad está compuesta por arcillas y limos de color rojo con fragmentos de cuarzo. También presenta cantos redondeados con diámetros de 2-8 cm principalmente de arenisca y algunos de neis. Se encuentra suprayaciendo al Suelo del Miembro Gravoso, mostrando un contacto gradacional. Presenta variaciones laterales y verticales de arcillas limosas, gris verdosas con tintes rojizos de oxidación. Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, donde la parte más superficial presenta un grado alto de meteorización con formación de niveles de oxidación.

En el área de estudio se observa un suelo arcillo-arenoso de color rojizo, con bastante presencia de oxidación, se observan algunos clastos de tamaño guijas y guijarros angulares y sin esfericidad compuesto de QTZ en su totalidad y algunos guijarros son fragmentos de rocas sedimentarias (Cuarzo-Arenita).

Figura 76. Suelos Limos Rojos, observados en la construcción del conjunto residencial cercano al sector conocido como “La Virgen”

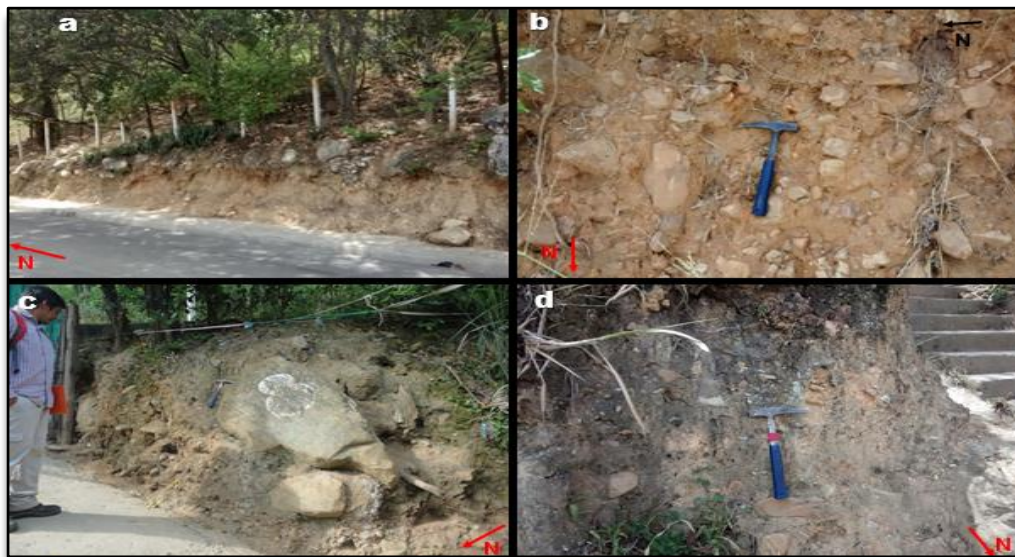


Fuente: Autor

#### 4.1.1.5 Suelos Coluviales (Sco1)

Los coluviones son masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca angulares a subangulares, depositados por la gravedad, lavado de la lluvia o movimientos en masa. Se caracterizan por ser materiales clasto-soportados o matrizsoportados según el origen de los sedimentos, su tamaño de grano varía desde grava hasta bloques de 1,5 m de diámetro, con consistencia muy baja a baja en coluviones recientes y media a alta en coluviones antiguos y meteorización intermedia a alta sobre los cuales se encuentran construidas un gran porcentaje las viviendas de los barrios Nueva Colombia y Bosque Norte. (INGEOMINAS, 2007), se observan en la zona de estudio un material incoherente, que consta de un suelo parduzco-amarillento y con clastos de diferentes tamaños y litología, esfericidades y angulosidades.

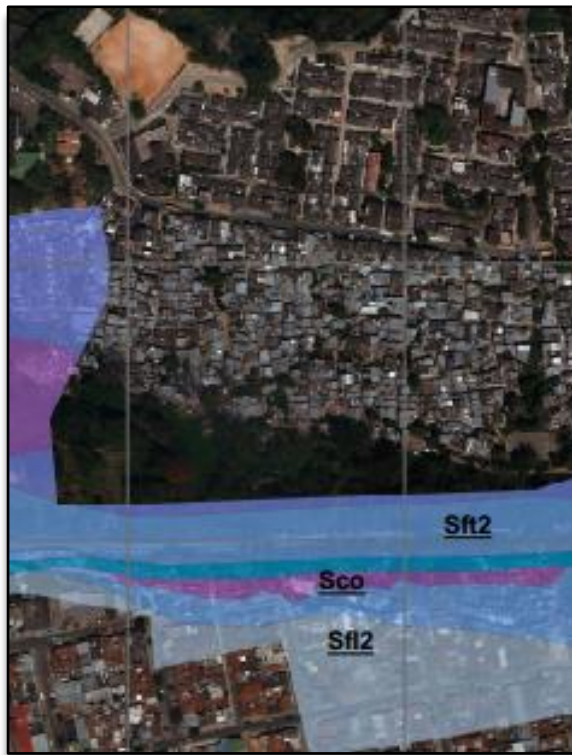
Figura 77. Suelos Coluviales Presentes en la zona. a) Barrio la Independencia. b) Detalle de los depósitos observados en la Figura (a). c) Barrio Nueva Colombia. d) Barrio Bosque Norte.









Fuente: Autor

El resultado de la correcta identificación, caracterización y levantamiento de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio se plasma en el mapa geológico del área de estudio:

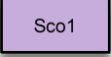
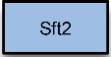
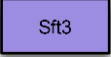
Figura 78. Unidades geológicas superficiales y Unidades geológicas superficiales en el área de estudio.



Leyenda	
	Sco Suelos Coluviales
	Sft1 Suelos del Miembro Finos (Fm. Bucaramanga)
	Sft2 Suelos del Miembro Limos Rojos (Fm. Bucaramanga)
	Sft2 Suelos del Miembro Gravoso (Fm. Bucaramanga)
	Sft3 Suelos gravoso del Miembro Organos (Fm. Bucaramanga)
	Sla Suelos de llenos antrópicos

Fuente: Modificado de INGEOMINAS; 2009.

Figura 79. Leyenda geológica del área de estudio

.Origen		Nombre de la Unidad Geológica		Descripción
<b>SUELOS</b>	<b>Transportados</b>	<b>Suelos Coluviales Antiguos</b>		Masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca angulares a subangulares, depositados por la gravedad, lavados de la lluvia o movimientos en masa. Materiales clastosoportados o matriz-soportados según el origen de los sedimentos. Tamaño de grano desde arena, limo a bloques de 1,5 m de diámetro, subredondeados a subangulares. Espesores desde 0.5cm a 3 m. Consistencia muy baja a baja en los recientes y media a alta en los antiguos. Meteorización intermedia a alta.
		<b>Suelos miembro gravoso (Formación Bucaramanga)</b>		Materiales de consolidación intermedia, color amarillo naranja, con variaciones desde matrizsoportados hasta clastosoportados relación (70-30%) de matriz arenolimoso a (30-80%) de clastos que se redistribuyen en gravas (60% a 20%) y bloques (10% a 20%) respectivamente, los clastos son rocas principalmente sedimentarias de las formaciones Girón y Jordán, con diámetros de 1 hasta 1.5 m, subredondeados, redondeados y esporádicamente subangulares. El grado de meteorización es variable, fluctuando entre materiales inalterados a completamente meteorizados.
		<b>Suelo gravoso del miembro órganos (Formación Bucaramanga)</b>		Depósito matriz soportado conformado matriz limo arcilloso de color gris claro, con tintes marrones y rojizos por alteración, altamente erodable, bloques y cantos redondeados de arenisca cuarzosa de grano fino, micáceo. Se observan fragmentos de limolitas rojas alteradas, bloques de esquistos, gránulos de cuarzo, conglomerados y cuarcitas frescas. Lentes de arcillas limo-arenosas que varían lateralmente a arenas gravosas, con líficos de plagioclasa, micas esporádicas y restos de materia orgánica; consistencia dura, espesor variable entre 1 y 3 m.

		<b>Suelo Miembros limos rojos (Formación Bucaramanga)</b>	<b>Sf12</b>	Depósito compuesto por arcillas y limos de color rojo con fragmentos angulares de cuarzo, cantos redondeados de arenisca cuarzosa, con diámetros entre 2 y 8 centímetros, se pueden encontrar bloques de diferente tamaño principalmente de areniscas y neis. Presenta variaciones laterales y verticales de arcillas limosas, gris verdosas con tintes rojizos de oxidación. La parte más superficial de este miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión.
	<b>Antrópicos</b>	<b>Suelos de llenos antrópicos</b>	<b>Sla</b>	Corresponden a materiales heterogéneos dispuestos por el hombre, generalmente caóticamente y sin ningún tratamiento o adecuación, con el objeto de cumplir los requerimientos de los diseños de obras de ingeniería o con la intención de aprovechar áreas de cauce de drenajes. Compuestos principalmente por materiales tamaño arena, arcilla, grava que son producto de residuos de construcción, excavaciones para minería o para adecuación de terrenos. Incluye los rellenos de basura (Ejemplo: El Carrasco). Baja compactación.

Fuente: Autor

## 4.1.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

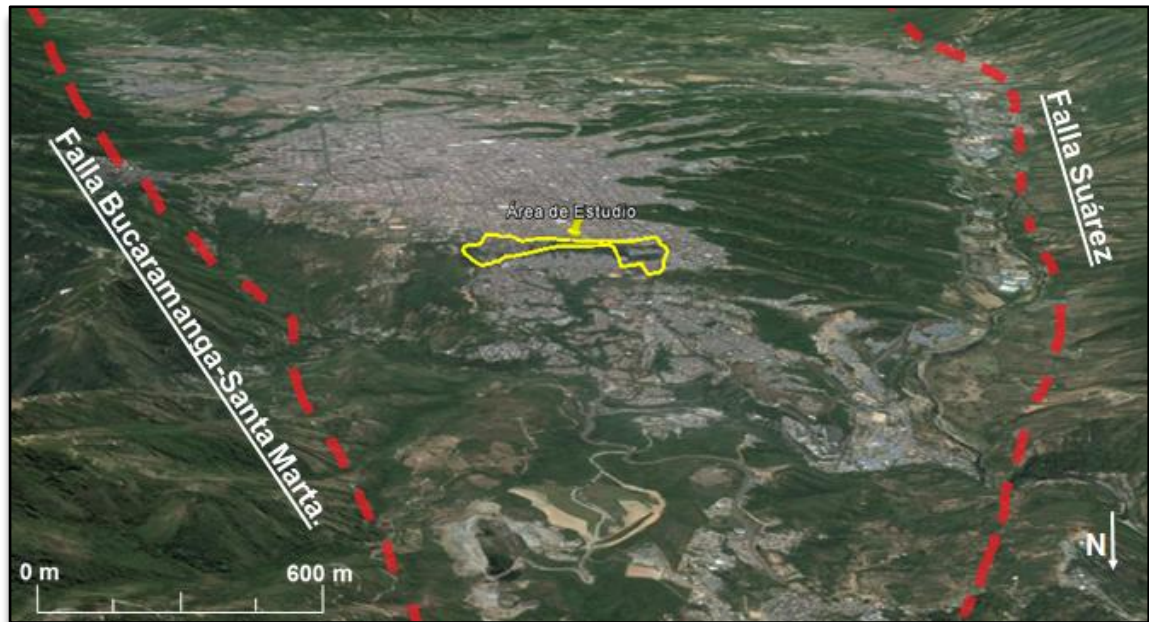
### 4.1.2.1 Nido sísmico de Bucaramanga

Corresponde a una zona sísmica de intermedia profundidad, aproximadamente 160 kilómetros de profundidad, ubicada en el Departamento de Santander a 6.8° N y 73.1°W. Este sector tiene una alta tasa de actividad sísmica con relación a su volumen y a la relativa tranquilidad sísmica del área circundante.

Esta generación de sismos en el Departamento de Santander se ha tratado de explicar con diversas teorías sin embargo ninguna ha sido capaz de explicar totalmente la naturaleza de dicho nido, por lo que en términos generales se ha explicado por la compleja interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramérica (Cortes et al., 2005; Taboada et al., 2000; Zafiri et al., 2007).

Los fallamientos principales son la Falla del Suárez y la Falla de Bucaramanga-Santa Marta. El área de estudio se encuentra ubicada muy cerca de la zona en la cual se interceptan las Fallas principales, lo que hace que el norte de la ciudad de Bucaramanga sea una zona de alta vulnerabilidad sísmica. Estos fallamientos y lineamientos han sido participes de la formación y estructuración del sitio a través del tiempo geológico, y actualmente se encuentran activos pero sin una caracterización adecuada por parte de los entes encargados (Servicio geológico Colombiano), por lo que para obtener un mejor registro a detalle de la afectación de la actividad sísmica en la zona se recomienda realizar un estudio de la tectónica cuaternaria.

Figura 80. Ubicación de la zona de estudio en el área de afectación de la Falla del Suárez y Falla de Bucaramanga-Santa Marta.



Fuente: Tomado de Diederix et al., 2008.

### **4.1.3 GEOMORFOLOGÍA**

Para la realización de este trabajo se utilizó la metodología y nomenclatura que el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) ha utilizado en trabajos anteriores (INGEOMINAS, 2007, esto se hace con el objetivo de evitar confusión con el manejo de nuevos términos durante el desarrollo del trabajo. Estas se encuentran basadas en los principales orígenes geomorfológicos según el Sistema ITC de Holanda (Verstappen & Van Zuidam, 1975; Verstappen, 1983; Van Zuidam, 1986).

En esta se destaca que a partir de la relación de la morfometría, la morfogenética y la morfodinámica se realiza la cartografía geomorfológica, la cual presenta unas unidades las cuales son jerarquizadas según Carvajal, 2011, como elementos geomorfológicos, en donde estas son las geoformas más pequeños del terreno (INGEOMINAS; 2007).

Las geoformas que se observaron en el área de desarrollo de este trabajo, serán descritas minuciosamente a continuación.

#### **4.1.3.1 Geoformas de origen fluvial.**

Estas geoformas son creadas por acción directa de los cauces de ríos o corrientes de agua que han o están actuando sobre un suelo. En este caso se reconocen 2 geoformas asociadas a un origen fluvial.

- Superficie Abanico de Bucaramanga (F7)

Corresponde a una geoforma con pendiente muy suave levemente inclinada hacia el occidente, la cual está asociada al nivel más joven (superficial) del Abanico de Bucaramanga. Este se encuentra limitado por escarpes fuertemente erosionados.

La mayor parte de la ciudad de Bucaramanga se encuentra construida sobre esta geoforma, y en la zona de estudio se observa hacia las zonas más altas del barrio.

Figura 81. Superficie del abanico de Bucaramanga



Fuente: Autor

#### 4.1.3.2 Geoformas de origen Denudacional.

Son Geoformas las cuales se encuentran asociadas Directamente con factores externos como el Agua y el viento, lo que conlleva a un proceso erosivo y de posterior depositación por medio de agua de lluvia, escorrentía y ríos. En la zona de estudio se reconoció una geoforma asociada estos procesos.

-Lomos Ancho (D4): Divisorias de aguas aplanadas a semiredondeadas, algunas de las cuales son aprovechadas para la construcción de caminos de herradura. En la zona de estudio las laderas que se encuentran bordeando los Lomos encontrados tienen inclinaciones de hasta  $40^\circ$  formando Laderas muy inclinadas. Se observa esta geoforma hacia la parte Oriental del área estudiada, hacia la parte trasera del campus principal de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

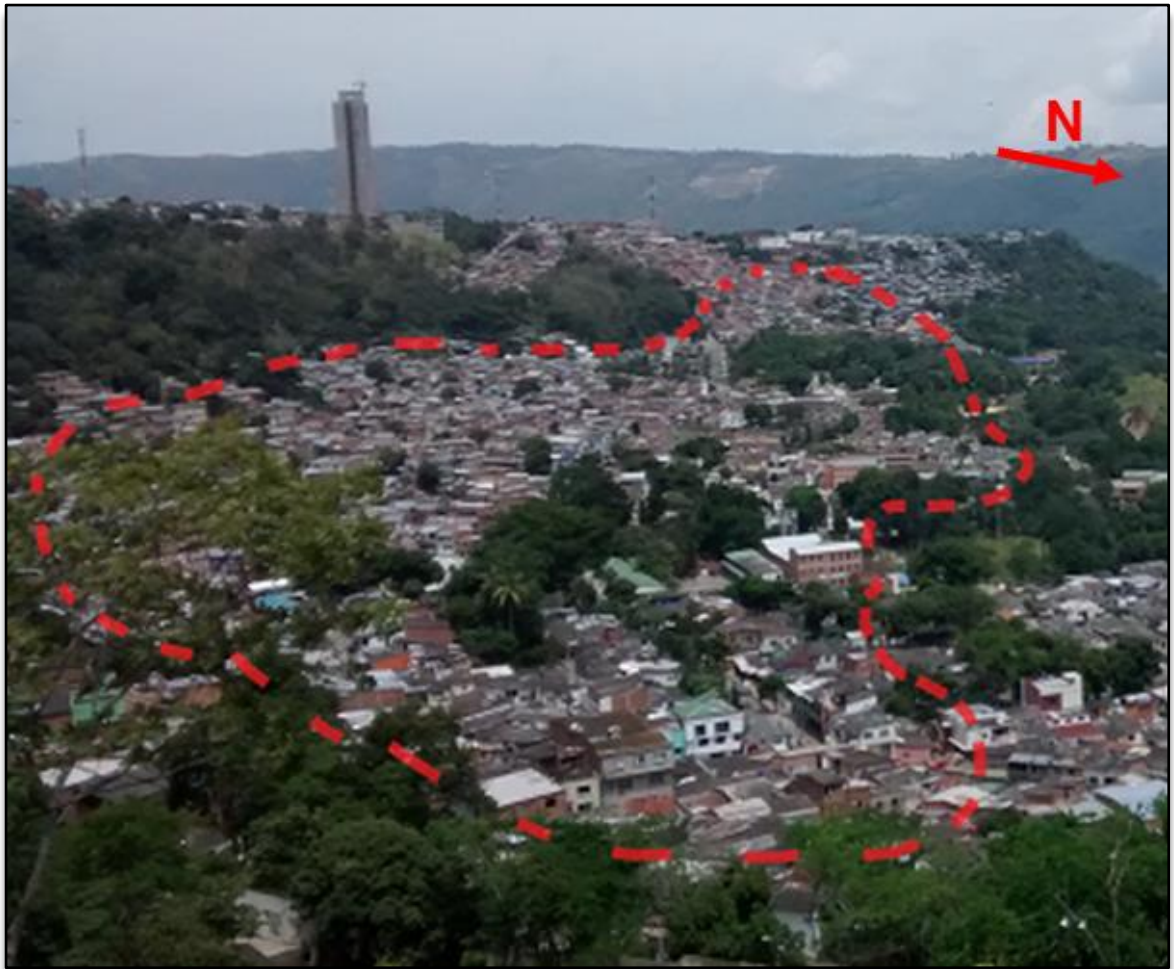
Figura 82. Geoforma de Lomo Ancho



Fuente: Autor

-Laderas Subhorizontales (D6): Superficie natural suavemente inclinada del terreno con pendientes menores a  $10^\circ$ , ligeramente disectada, donde normalmente se desarrollan suelos residuales. (INGEOMINAS, 2007). En el área de estudio se presentan hacia el Norte en las partes bajas del Barrio Bosque Norte.

Figura 83. Geoforma de Laderas Subhorizontales.



Fuente: Autor

-Escarpes denudacionales (D7): Corresponden a laderas cortas verticales o semi-verticales las cuales tienen una inclinación mayor a  $70^\circ$  se forman principalmente debido a procesos denudativos (INGEOMINAS, 2007). Se presentan sobre la vía que conduce desde Bucaramanga hacia el municipio de Matanza sobre la margen derecha. En estos sectores se presenta erosión laminar.

Figura 84. Geoforma de Escarpe denudacional.



Fuente: Autor

-Laderas muy inclinadas (D10): Son superficies naturales del terreno con laderas muy empinadas, producto de procesos denudacionales principalmente, donde dichas laderas presentan inclinaciones entre 40-70°. La vegetación sobre esta geoforma es en algunos casos escasa, esta geoforma es una de las más comunes en el área de estudio y se observa sobre el talud Sur del área estudiada.

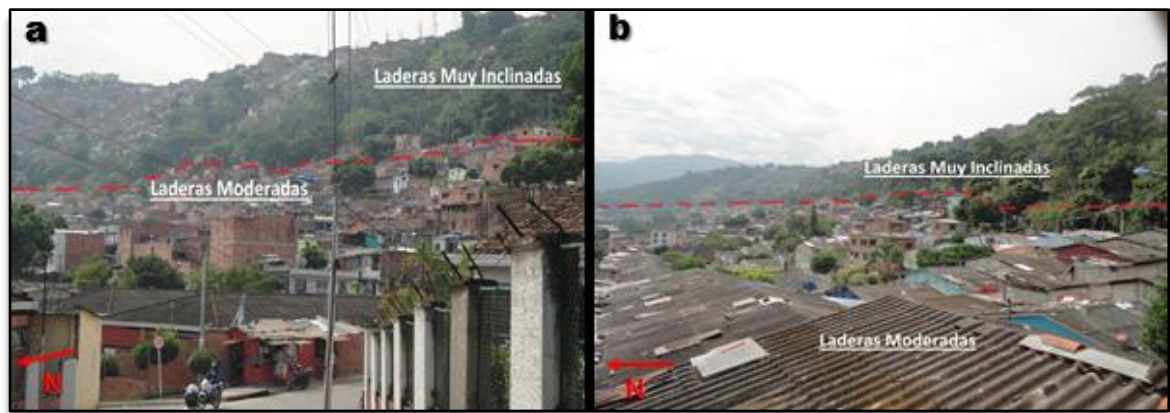
Figura 85. Laderas muy inclinadas.



Fuente: Autor

-Laderas moderadas (D11): Esta geoforma corresponde a una superficie natural del terreno producida por procesos denudacionales, se caracteriza por presentarse en forma de laderas onduladas con inclinaciones entre 10-40°, estas zonas por lo general presentan buena cobertura vegetal. Se presenta en el área de estudio sobre el Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga, hacia las zonas altas del barrio.

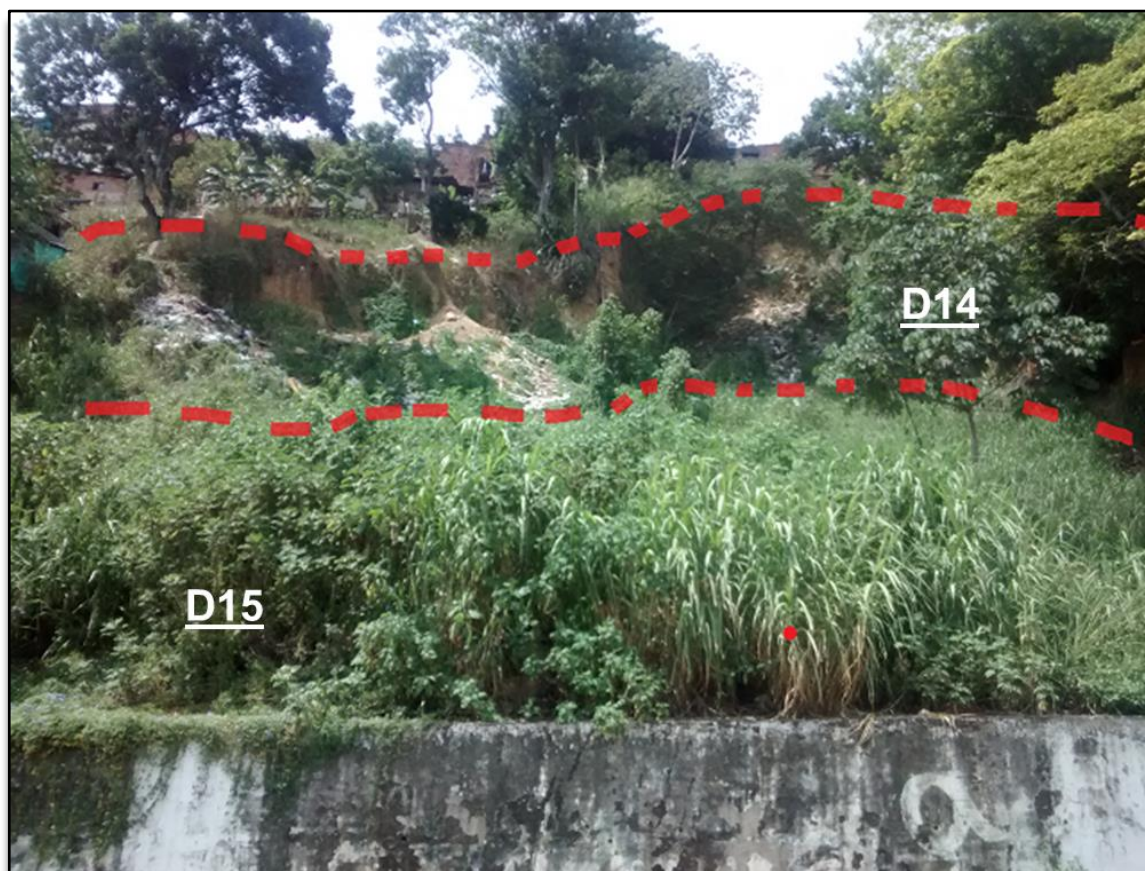
Figura 86. Laderas Moderadas.



Fuente: Autor

-Escarpe de corona principal de Movimiento en Masa (D14): Superficie casi vertical que se desarrolla en la periferia de un deslizamiento, causada por el desplazamiento de material hacia afuera y abajo de la ladera. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semi-paralelas conocidas como grietas de tensión o de tracción. (INGEOMINAS, 2007), esta geoforma se presenta sobre el margen derecho de la vía que va desde el CAI de la Virgen hacia el barrio de la Independencia, cerca de la entrada hacia el barrio Transición, en donde se observa un gran deslizamiento complejo y de enjambre que se encuentra activo.

Figura 87. Escarpe de corona principal de Movimiento en Masa.



Fuente: Autor

-Cuerpo o depósito de movimiento en masa (D15): Es la masa de suelo o roca, o mezcla de ambas resultante del movimiento ladera abajo, es decir es el lugar donde se han depositado el material transportado. Por lo general se presenta en pendientes moderadas a bajas, en el área de estudio se presentan en diferentes sectores, especialmente hacia el margen derecho de la vía que va desde el CAI de la Virgen hacia el barrio de la Independencia.

Figura 88. Cuerpos o depósitos de movimiento en masa detectados en el área de estudio.

a) Barrio La Independencia. b, c, d) Barrio Nueva Colombia.



Fuente: Autor

#### 4.1.3.3 GEOFORMAS DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

Formas del relieve producidas por modificaciones causadas por la intervención del hombre.

- Obras de Ingeniería (A7). Para el presente estudio se tomó esta geoforma como las carreteras incluyendo todas las obras de arte que son necesarias durante la construcción de estas.

Figura 89. Vías presentes en el área de estudio las cuales se tomaron como parte de la Geoforma de Obras de ingeniería.



Fuente: Autor

- Laderas Explanadas (A9): Esta Geoforma se caracteriza por ser cortes en las laderas para disminuir su pendiente y posteriormente ser aprovechadas para la construcción de viviendas o de obras de infraestructura, en el área de trabajo se observa en todas las viviendas este tipo de intervención.

Figura 90. Corte en la ladera media del miembro Gravoso, con fines de construcción de viviendas.



Fuente: Autor









El resultado de la correcta identificación, caracterización y levantamiento de las unidades geomorfológicas superficiales en el área de estudio se plasma en el mapa geomorfológico del área de estudio (Figura 91) como también el porcentaje de ocupación dentro del área de estudio de cada unidad. Así mismo la nomenclatura utilizada en este trabajo se relaciona a continuación en la Tabla 28



Figura 91. Plano Geomorfológico



Fuente: Autor

Tabla 28. Leyenda de unidades geomorfológicas

Origen	Características	Nombre del elemento	Nomenclatura	Descripción
Fluvial	Son geoformas derivadas de la Actividad agradacional y degradacional de las corrientes. Incluyen cauces actuales de las corrientes y niveles de terrazas dejadas por sedimentación de cauces, incisión y eventos fluvio – torrenciales.	<b>Superficie Abanico de Bucaramanga</b>	 F7	Geoforma levemente inclinada hacia el Occidente, asociada al nivel más superficial del abanico de Bucaramanga, limitada por escarpes fuertemente erosionados. Sobre esta superficie se encuentra construida la mayor parte de la ciudad de Bucaramanga.
DENUDACIONAL	Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales normales que se presentan en zonas de clima tropical; caracterizadas por erosión, depositación y movimientos en masa. Se pueden clasificar de acuerdo con la pendiente en subhorizontales e inclinadas. Estas geoformas se originan por la influencia de la actividad tectónica sobre rocas y suelos, generando expresiones en el terreno que se combinan con los procesos denudacionales.	<b>Lomos Anchos</b>	 D4	Divisorias de aguas aplanadas a semiredondeadas, algunas de las cuales son aprovechadas para la construcción de caminos de herradura.
		<b>Laderas Subhorizontales</b>	 D6	Superficie natural suavemente inclinada del terreno con pendientes menores a 10°, ligeramente disectada, donde se desarrollan suelos residuales.
		<b>Escarpes denudacionales</b>	 D7	Laderas cortas y muy empinadas, mayores a 70° de inclinación, erosionadas, asociadas a depósitos fluvio-torrenciales y macizos rocosos.
		<b>Laderas muy inclinadas</b>	 D10	Superficie natural del terreno, cuyas laderas son muy empinadas con inclinaciones entre 40° y 70°, alargadas y rectilíneas, parcialmente cubiertas por depósitos de ladera.
		<b>Laderas moderadas</b>	 D11	Laderas onduladas con pendientes inclinadas entre 10° y 40°. Por lo general presentan buena cobertura vegetal.
		<b>Escarpe de corona principal de Movimiento en Masa</b>	 D14	Superficie casi vertical que se desarrolla en la periferia de un deslizamiento, causada por el desplazamiento de material hacia afuera y abajo de la ladera. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semi-paralelas conocidas como grietas de tensión o de tracción.
		<b>Cuerpo o depósito de MM</b>	 D15	Masa de suelo o roca, o mezcla de ambos, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o por desgarre de una zona de poco espesor.

<b>ANTRÓPICO</b>	Estas geoformas son originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno; en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar obras de ingeniería o explotación de recursos.	<b>Obras de ingeniería</b>	 A7	Corresponden a obras de ingeniería civil para mitigar y prevenir movimientos en masa.
		<b>Laderas explanadas</b>	 A9	Cortes en laderas para disminuir su pendiente, con el fin de adecuar el terreno para la construcción de vivienda u obras de infraestructura.

Fuente: Autor

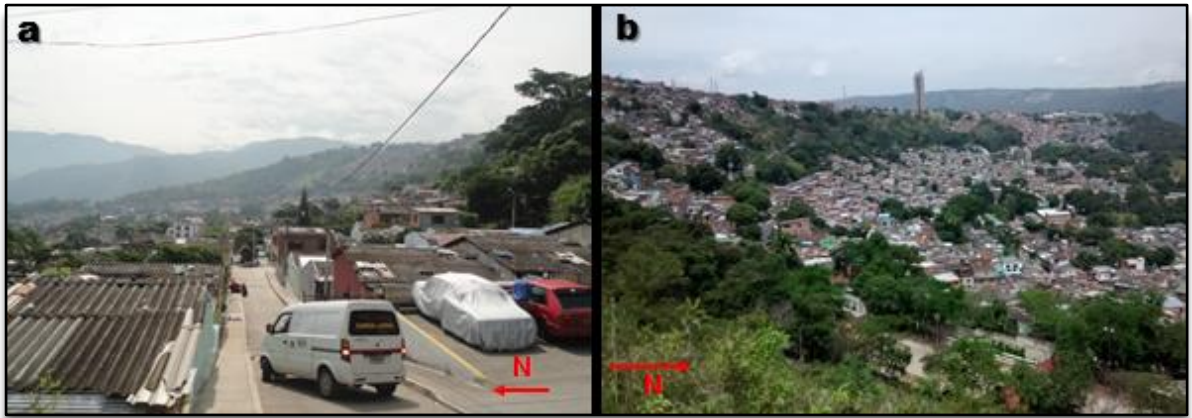
## 4.2 COBERTURA DEL SUELO

El análisis de coberturas del suelo es indispensable para el estudio puntual de los procesos de afectación por remoción en masa. Este se basa en la implicación de la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano, es decir, las funciones económicas o actividades humanas dentro de una porción específica de la tierra (Janssen, 2000 en SIAC; 2014).

Dentro del área de estudio se obtuvieron una totalidad de 6 unidades en el área, dentro de las cuales se encuentran unidades puntuales, consociaciones (Unidades conformadas por una o más clases, donde la clase dominante ocupa el 70% o más del área considerada, separadas por un “/”) y asociaciones (Unidades con 2 o más clases, donde ninguna ocupa o alcanza el 70% del área delimitada, separadas por un “-“). Para estos dos últimos tipos se especifica que el primer nombre posee un mayor valor y área con respecto al segundo. Estas se especifican a continuación:

-Construcciones Urbanas (Cu): Construcciones edificadas por el hombre para su servicio, ubicadas en el perímetro urbano, dentro de las cuales se encuentran las clases: residencial, educativa, salud, deportiva, institucional, vial, de transporte, entre otras. En la zona de estudio este es el uso de suelo predominante.

Figura 92. Construcciones Urbanas.



Fuente: Autor

-Construcciones Rurales (Cr): son aquellas construcciones que pocas veces compartes sus servicios con las demás viviendas, en este trabajo se incluyen las viviendas de invasión construidas con materiales como madera y plásticos.

Figura 93. Casas de Invasión, las cuales se toman en este trabajo como Construcciones Urbanas.



Fuente: Autor

-Pastos y árboles (Pa): Pastos naturales con el componente de árboles, este es el uso del suelo más común junto con las construcciones urbanas.

Figura 94. Uso de Pastos y Árboles



Fuente: Autor

-Pastos naturales (Pn): Cobertura de pastos manejados por el hombre los cuales se pueden encontrar junto con pequeños cultivos y algunos árboles frutales o no, presentan una importancia media por su protección al suelo contra la erosión y constituyen un nicho de hábitat para la alimentación de la fauna (INGEOMINAS 2009).

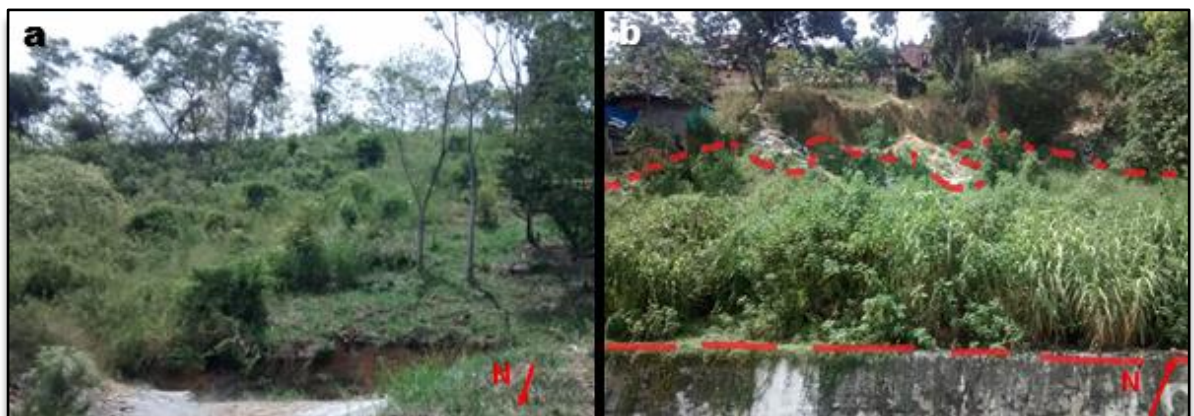
Figura 95. Uso de Pastos Naturales.



Fuente: Autor

-Rastrojos bajos (Rb): Área cubierta donde aparecen especies herbáceas y arbustivas con alturas entre 1 y 3 metros. En el área estos se presentan predominantemente como asociaciones y consociaciones.

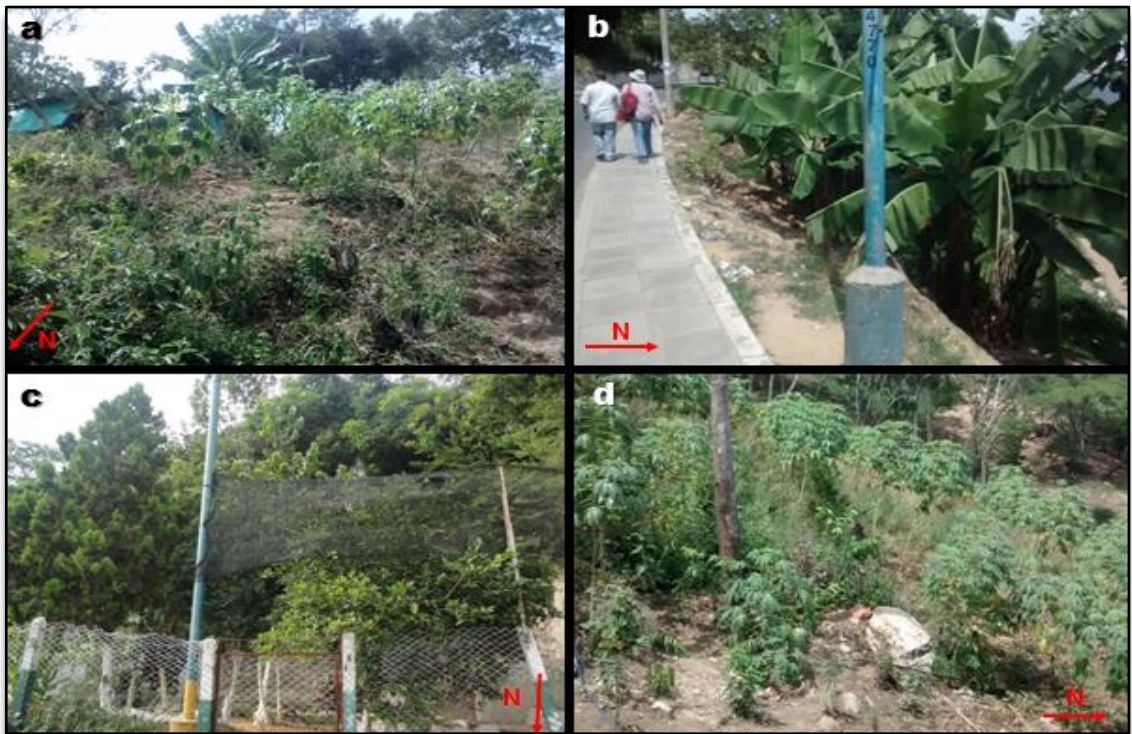
Figura 96. Uso del suelo de Rastrojos Bajos a) Asociación con Pa. b) usos cerca de cultivos y viviendas rurales.



Fuente: Autor

- Cultivos (Ct): Pequeñas porciones de tierra dedicadas a promover el ciclo vegetativo de algunas especies y la obtención de frutos alimenticios tales como la yuca o el plátano. En la zona de estudio se pueden encontrar algunos cultivos en algunos sectores de las laderas y en pequeñas áreas cercanas a algunas viviendas.

Figura 97. Cultivos presentes en la zona, ubicados en pequeñas áreas.



Fuente: Autor

- Suelos desnudos (Sd): Áreas sin cobertura vegetal las cuales han sufrido procesos de erosión por causas naturales o antrópicas o que el hombre ha intervenido en forma de terraplenes, canteras, manejo de material para construcciones que otros elementos naturales continúan moldeando (viento, ríos), en otros casos se debe a la práctica de la quema de la capa vegetal; también se incluye afloramientos

rocosos en la zona estudiada se observan en las laderas que se encuentran en asociación con Pastos y Árboles, cultivos y Construcciones Urbanas, también se dan debido a los cortes verticales de laderas que se hacen con el fin de explanar algún sector para posteriormente ser aprovechado en la construcción de viviendas.

Figura 98. Usos del Suelo de Suelos desnudos.



Fuente: Autor

- Parques de recreación (P): Área definida para lugares que además de poseer infraestructura para el descanso o la recreación, también poseen vegetación de gramas, arboles ornamentales o frutales. Estos se presentan en cercanías al barrio Bosques Norte y Nueva Colombia.
















Figura 99. Cobertura del suelo.



Fuente: Autor

Figura 100. Mapa de cobertura del suelo para el área de estudio a escala 1:2000



<b>Leyenda</b>				
	Bs	Bosques secundarios	 Pa/Sd	Consociación Pa/Sd
	Cu	Construcciones urbanas	 Pa/Sd/Rb	Consociación Pa/Sd/Rb
	P	Parques recreativos	 Pn	Consociación Pn
	Pa	Pastos y arboles	 Pn/Pa	Consociación Pn/Pa
	Pa-Ct-Cu-Cr	Asociación Pa-Ct-Cu-Cr	 Rb/Pa	Consociación Rb/Pa
	Pa-Rb	Asociación Pa-Rb	 Rb/Pa/Sd	Consociación Rb/Pa/Sd
	Pa/Bu	Consociación Pa/Bu	 Sd	Suelo desnudo
	Pa/Rb	Consociación Pa/Rb		

Fuente: Autor

### 4.3 ANÁLISIS GEOTÉCNICO

#### 4.3.1 Exploración geotécnica

A continuación se muestra la exploración de campo realizada para el sondeo 1, los demás registros se encuentran en los anexos.

Figura 101. Exploración de campo registro sondeo 1.

LOCALIZACION:	E: 1104410 N: 1281640	SONDEO N°	1
PROFUNDIDAD DE NIVEL FREATICO...mts...	NO	PROFUNDIDAD TOTAL DEL SONDEO ...mts...	15,00
METODO DE PERFORACION:	MECANICO PESA .lbs.... 140	CAIDA LIBRE ...cms....	70
FECHA DE INICIACION:	03 de junio de 2015	FECHA DE TERMINACION:	03 de junio de 2015
JEFE DE PERFORAZION:	JHON ALEXANDER AGUILAR SANTOS	LABORATORISTA:	EDSON ALEXANDER PORTILLA ARDILA

PROFUNDIDAD (mts)	PERFIL DEL SUELO	No. GOLPES			N	CLASIFICACION Y HUMEDAD		DESCRIPCION DE LOS SUELOS Y OBSERVACIONES
		6"	12"	18"		USCS	%Wn	
0,0	0,5	1,0	2,0	5,0	7,0	CL	15,8	Material de desecho, escombros.
0,5	1,0	12,0	8,0	13,0	21,0			coluvion, arcilla, arena y fragmentos de roca.
1,0	1,5	16,0	34,0	37,0	71,0			Material lavado.
1,5	2,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
2,0	2,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Material lavado.
2,5	3,0	26,0	28,0	30,0	58,0			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
3,0	3,5	30,0	32,0	35,0	67,0			Material lavado.
3,5	4,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
4,0	4,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Material lavado.
4,5	5,0	13,0	16,0	20,0	36,0			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
5,0	5,5	22,0	26,0	28,0	54,0	SP	17,5	Material lavado.
5,5	6,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
6,0	6,5	38	40	48	88,0			Material lavado.
6,5	7,0	39	42	47	89,0			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
7,0	7,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Material lavado.
7,5	8,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
8,0	8,5	39	41	46	87,0			Material lavado.
8,5	9,0	40	46	49	95,0			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
9,0	9,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Material lavado.
9,5	10,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
10,0	10,5	19	26	34	60,0	SC-SM	16,8	Arcilla limosa con gravas redondeadas de color blanco.
10,5	11,0	28	36	41	77,0			Material lavado.
11,0	11,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
11,5	12,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Material lavado.
12,0	12,5	37	39	43	82,0			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
12,5	13,0	40	43	49	92,0			Material lavado.
13,0	13,5	Tricono	Tricono	Tricono	TR			Limo arcilloso con gravas de color amarillo.
13,5	14,0	Tricono	Tricono	Tricono	TR			
14,0	14,5	13	18	23	41,0			
14,5	15,0	20	28	34	62,0			

Fuente: Autor

### 4.3.2 Ensayos de laboratorio

De las muestras obtenidas se seleccionaron las más representativas para enviar al laboratorio solicitando realizar los ensayos mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 29. Ensayos de Laboratorio Realizados a las Muestras Obtenidas en Campo

ENSAYO	NORMA
Granulometría.	NTC 77 ASTM D421 -58
Contenido de Humedad.	NTC 1495 ASTM D 2216
Límite Plástico e Índice de Plasticidad.	NTC 1493 ASTM D 4318
Límite Líquido.	NTC 1494 ASTM D 4318
Clasificación.	NTC 1504 ASTM D 2487
Compresión Incofinada	ASTM 2166 - 66
Corte Directo	INV. 154 ASTM D3080
Peso unitario	INV-E 217-12
Gravedad específica	NTC 237
Apiques	
Percolacion	

Fuente: Autor

Tabla 30. Ensayos de Laboratorio Sondeo 1.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)		%Wn	%wLL	%wLP	%LC	%IP	%IL	%G	%S	%F	USCS	PU (g/cm <sup>3</sup> )	Gs	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	Φ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	Y (g/cm <sup>3</sup> )		
1	0,0	0,5																			
	0,5	1,0																			
	1	1,5																			
	1,5	2,0																			
	2	2,5																			
	2,5	3,0																			
	3	3,5																			
	3,5	4,0																			
	4	4,5																			
	4,5	5,0	15,82	26,47	18,57	7,49	7,9	-0,35	13,16	27,06	59,78	CL	1,92	2,61	2,1	85,13					
	5	5,5																			
	5,5	6,0																31	0,325	1,97	
	6	6,5																			
	6,5	7,0																			
	7	7,5																			
	7,5	8,0																			
	8	8,5																			
	8,5	9,0																			
	9	9,5																			
	9,5	10,0	17,46	29,27	20,39	8,25	8,88	-0,33	35,59	62,11	2,3	SP	1,91	2,58	2,6	27,05					
10	10,5																				
10,5	11,0																				
11	11,5																				
11,5	12,0																				
12	12,5																				
12,5	13,0																				
13	13,5																				
13,5	14,0																				
14	14,5																				
14,5	15,0	16,83	27,32	21,26	9,13	6,06	-0,73	17,46	48,91	33,63	SC-SM	1,9	2,41								

Fuente: Autor

Tabla 31. Ensayo de Percolación

PERCOLACION	E (m)	N (m)	Barrio	PROF. (m)	Velocidad de infiltración (K) cm/seg.	Grado
1	1,104,521	1,281,797	Bosque Norte	1,00	0,017	Media
2	1,104,366	1,281,829	Nueva Colombia	1,00	0,054	Media
3	1,105,546	1,281,737	Independencia	1,00	0,096	Media
4	1,105,464	1,281,931	Independencia	1,00	0,014	Media
5	1,105,482	1,282,047	Independencia	1,00	0,005	Baja
6	1,105,092	1,281,543	Independencia	1,00	0,032	Media

Fuente: Autor

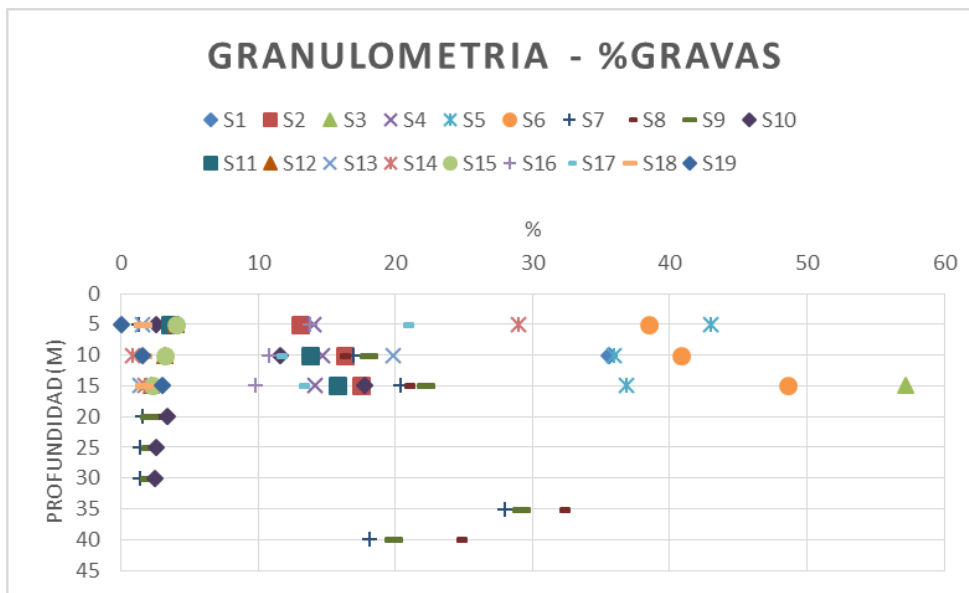
Tabla 32. Ensayos de corte directo para los apiques

APIQUE	PROFUNDIDAD (m)		$\Phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	APIQUE	PROFUNDIDAD (m)		$\Phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )																																																																																																																																																								
1	0,0	0,5	29	0,4	2,09	1,93	11	0	0,5	37,6	0,44	2,05	1,84																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					2	0	0,5	28,4	0,585	2,09	1,89	12	0	0,5	37	0,335	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	3	0	0,5	34,1	0,41	2,23	2,01	13	0	0,5	37,4	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	4	0	0,5	34,9	0,355	2,38	2,13	14	0	0,5	36,7	0,65	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	5	0	0,5	32,2	0,383	2,05	1,87	15	0	0,5	38,8	0,545	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20
2	0	0,5	28,4	0,585	2,09	1,89	12	0	0,5	37	0,335	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					3	0	0,5	34,1	0,41	2,23	2,01	13	0	0,5	37,4	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	4	0	0,5	34,9	0,355	2,38	2,13	14	0	0,5	36,7	0,65	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	5	0	0,5	32,2	0,383	2,05	1,87	15	0	0,5	38,8	0,545	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0								
3	0	0,5	34,1	0,41	2,23	2,01	13	0	0,5	37,4	0,475	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					4	0	0,5	34,9	0,355	2,38	2,13	14	0	0,5	36,7	0,65	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	5	0	0,5	32,2	0,383	2,05	1,87	15	0	0,5	38,8	0,545	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																										
4	0	0,5	34,9	0,355	2,38	2,13	14	0	0,5	36,7	0,65	2,05	1,82																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					5	0	0,5	32,2	0,383	2,05	1,87	15	0	0,5	38,8	0,545	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																												
5	0	0,5	32,2	0,383	2,05	1,87	15	0	0,5	38,8	0,545	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82	0,5	1,0	0,5	1,0	7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																																														
6	0	0,5	33,9	0,405	2,14	1,87	16	0	0,5	38,2	0,435	2,05	1,82																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																																																																
7	0	0,5	33	0,35	2,3	2,12	17	0	0,5	39,1	0,34	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84	0,5	1,0	0,5	1,0	9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																																																																																		
8	0	0,5	34,6	0,4	2,17	2,03	18	0	0,5	35,5	0,725	2,05	1,84																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0	10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																																																																																																				
9	0	0,5	38,2	0,51	2,05	1,84	19	0	0,5	37,2	0,475	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0					10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83	0,5	1,0	0,5	1,0																																																																																																																																						
10	0	0,5	37,2	0,6	2,05	1,84	20	0	0,5	37,8	0,415	2,05	1,83																																																																																																																																																								
	0,5	1,0						0,5	1,0																																																																																																																																																												

Fuente: Autor

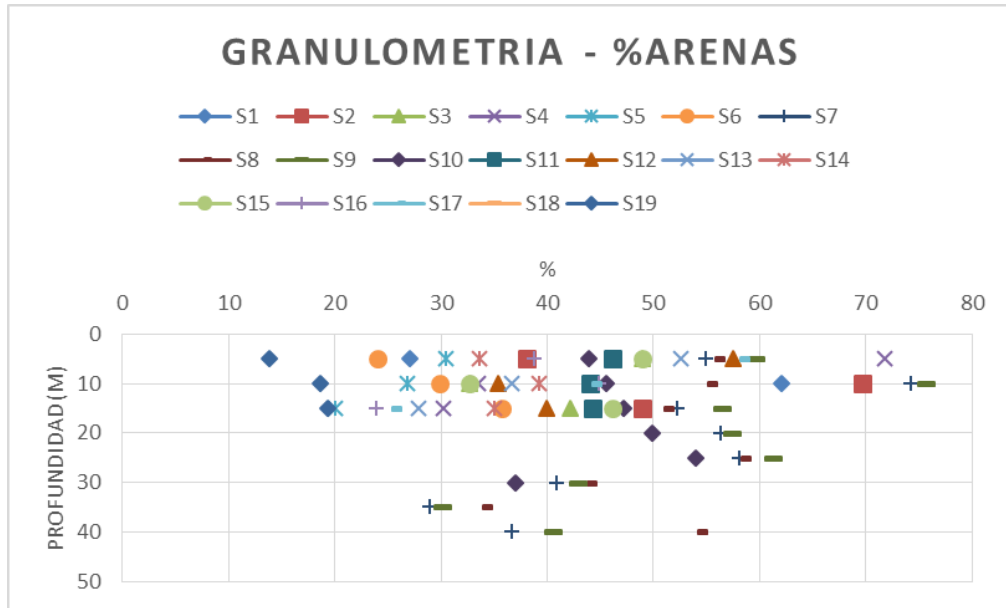
#### 4.3.2.1 Análisis de ensayos de laboratorio

Figura 102. Resultados de granulometría (fracción Gruesa- Gravas).



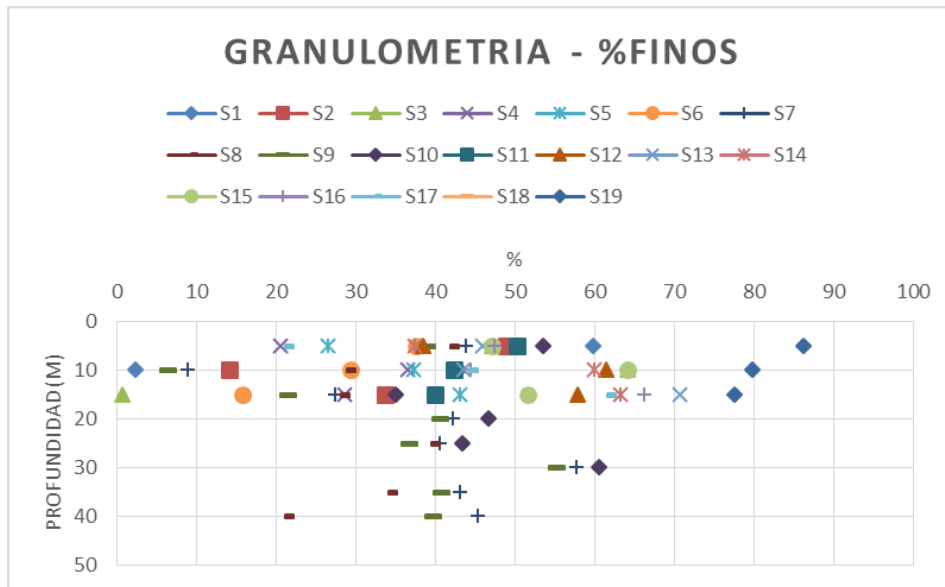
Fuente: Autor

Figura 103. Resultados de granulometría (fracción Gruesa - Arenas).



Fuente: Autor

Figura 104. Resultados de granulometría (fracción Fina – limos y arcillas).



Fuente: Autor

Los suelos en estudio, se encuentran matriz – soportados consolidados, en los cuales se hallan cantos redondeados de 10 cm a bloques que en algunos casos sus dimensiones pueden ser superiores al metro (1.0 m), la matriz se caracteriza por presentar contenidos de grava inferiores a 20% en la mayoría de los ensayos registrados.

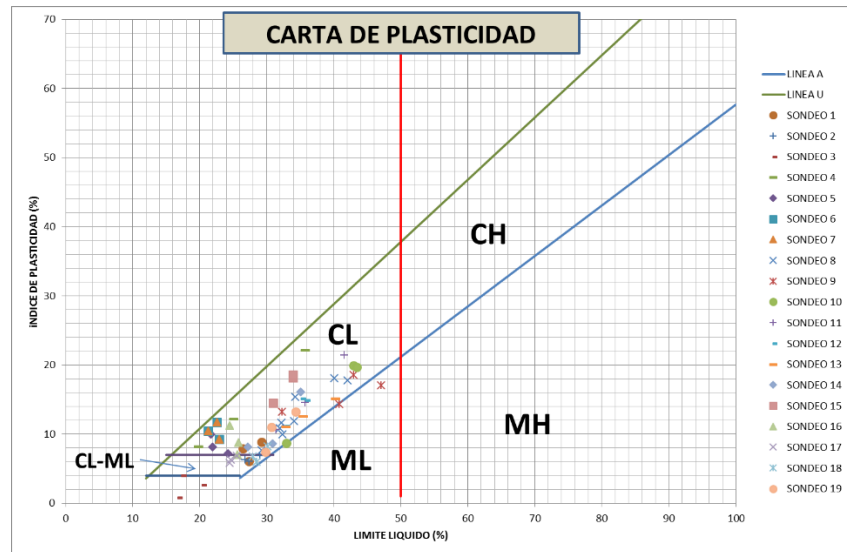
El material gravoso (gravas) corresponde a fragmentos de roca, la cual se hace considerable después de los 2.0 m de profundidad, donde se encontraran cantos y bloques transportados de roca de origen sedimentario y algunas de origen metamórfico, que en ocasiones presentaran un alto grado de meteorización, predominando areniscas con alguno tintes rojizos de oxidación.

Para el material arenosos y fino las variaciones de su composición muestran un rango entre 20% a 60% para arenas y 25% a 70% para finos, sin embargo las mayores concentraciones son similares en ambos tipos de material y se ubica entre el 40 al 50%, diferenciándose solo en la zona semi-plana donde se asienta parte del barrio Bosque Norte y todo el barrio Nueva Colombia, predominando los finos (valores cercanos al 60% y 70%).

El material fino presentara un comportamiento más arcilloso, se observa una concentración entre un índice de plasticidad de 10% a 20% y un límite líquido entre el 20 al 30%, descartándose de esta manera cambio por variación volumétrica ya que no se evidencia plasticidades altas, por lo cual predominaran arenas arcillosas (SC) y arcillas arenosas (CL).

Con lo anterior se evidencia que la matriz del sector la cual predomina en todos los estratos, tiene un comportamiento cohesivo y se encuentra consolidada, ya que el contenido de material fino en ninguno de los casos es inferior al 30%, aunque presenta índices plásticos inferiores a 10% y Límites Líquidos inferiores a 30% y su coloración presentara tintes marrones y grises que se oxidan por el contenido de humedad, así mismo estas características cohesivas hacen que en el sector no se presenten evidencia de erosión.

Figura 105. Carta de plasticidad, barrios Bosque Norte, Independencia y Nueva Colombia



Fuente: Autor

En cuanto a la humedad, esta se encuentra entre el 9% al 23%, ubicándose principalmente entre 15% al 20%, si mismo se observa que la humedad se encuentra por debajo del límite plástico, por lo cual en la actualidad el suelo en estudio se encuentra en un estado semisólido, que se presenta por la temporada seca que afecta a la zona.

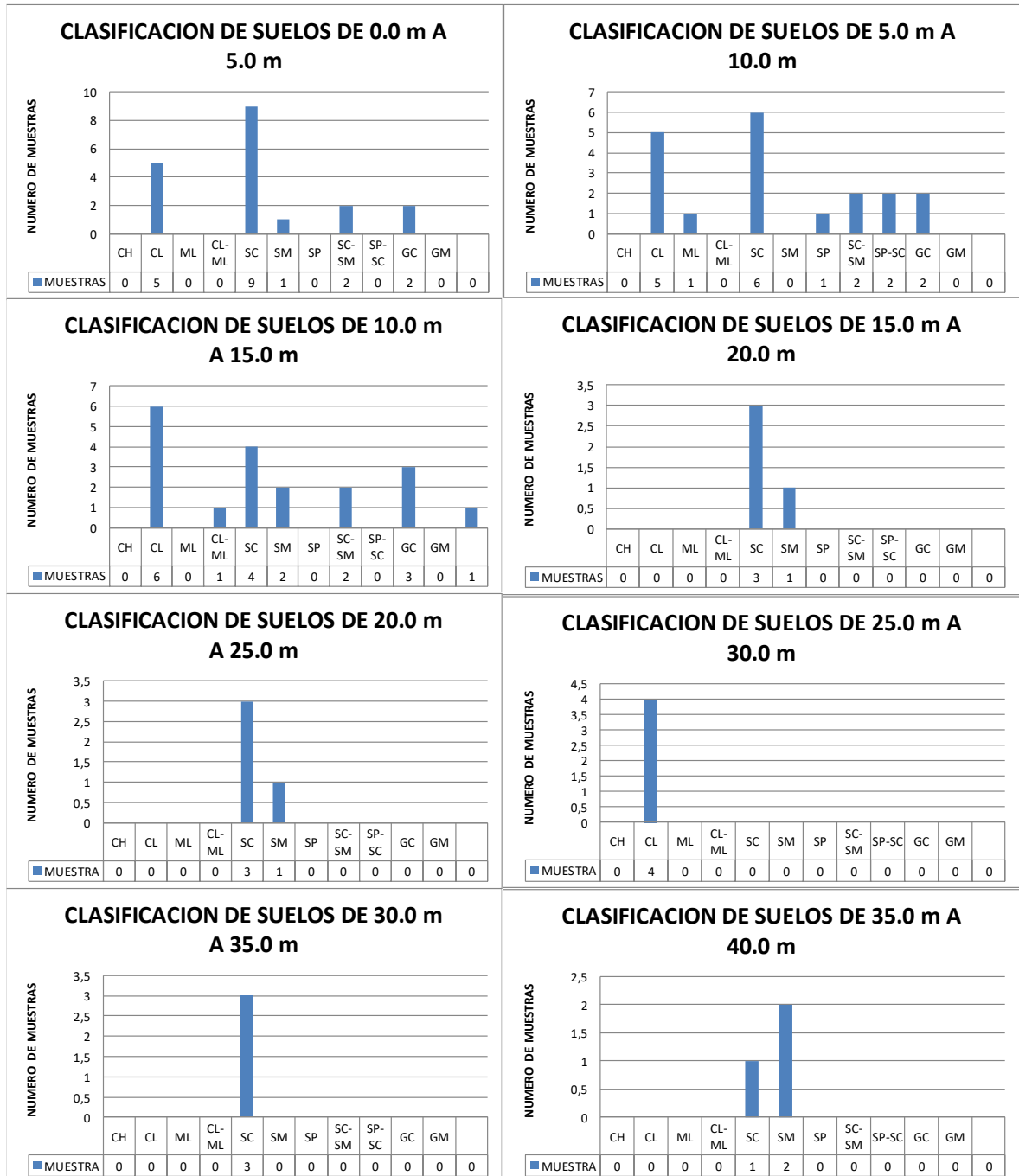
Las variaciones de estado de suelo pueden fluctuar entre el estado actual (semisólido) a el estado plástico, esto se debe a la cercanía del rango de valores de humedad natural al valor de límite de plasticidad, así mismo no se considera probable la ocurrencia de un estado líquido salvo cuando se presente posibles afloramientos de agua, lo cuyo cambia se daría de manera muy particular y puntual.

### **4.3.3 Ensayos de clasificación**

El muestreo obtenido en los sondeos ejecutados durante la exploración de campo, se realizó de acuerdo a intervalos de profundidad, basados en las características estratigráficas del sector. Dichos intervalos se dividieron en profundidades de 5.0 m cada uno, en los cuales se obtuvieron diferentes muestras; durante el análisis de clasificación y tomando como base los ensayos de granulometría y límites, se encontraron suelos en su mayoría Areno-Arcillosos (39 %), Arcillosos de baja plasticidad (27%), Areno-limosos (10%), Gravo arcillosos (9%) y Arena arcillo-limosa (8%), el 7% restante varía entre los demás materiales.

La variación granulométrica va aumentando conforme se alcanza profundidad pero siempre con la presencia de material gravoso aunque en mínimas cantidades, así mismo es de notar que en todos los estratos existe la presencia de los suelos con características areno-arcillosas. De acuerdo a la clasificación se encontraron suelos de material fino, arenosos y gravosos, los cuales se describen más adelante.

Figura 106. Resultado de los ensayos de clasificación para 75 muestras de suelos recolectadas



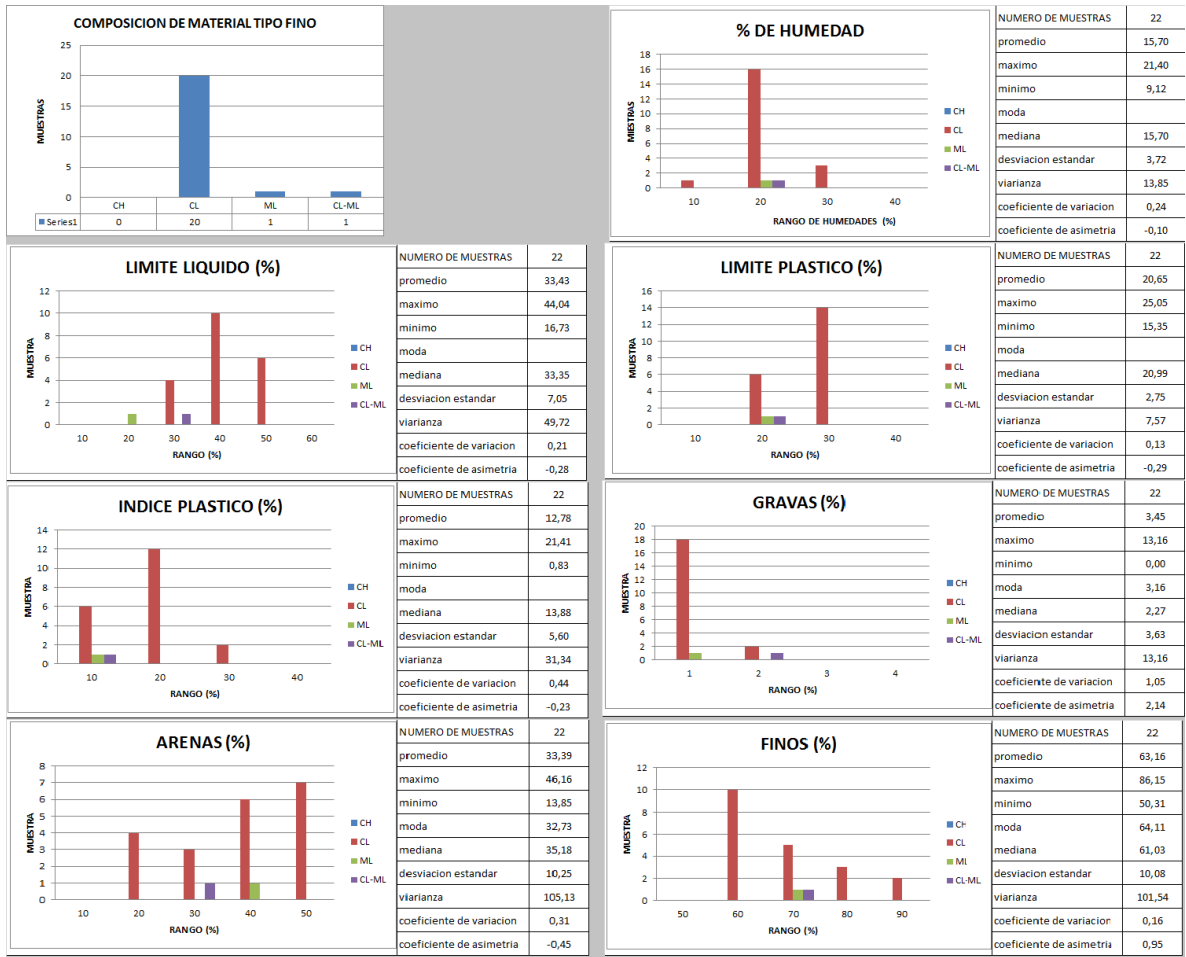
Fuente: Autor

#### **4.3.3.1 Material Fino.**

En las exploraciones se encontraron suelos de composición fina que se clasificaron como Arcilla de baja plasticidad CL, Limo arenoso ML y Arcilla limosa (CL-ML), los cuales se encierran a lo largo (profundidad) de las exploraciones de campo, debido a la naturaleza y origen de los depósitos de acuerdo a la investigación geológica realizada, estos suelos componen el 28% de los suelos encontrados.

Para el análisis se tomaron 22 muestras, las cuales corresponden a 20 Clasificados como CL, 1 clasificadas como ML y 1 clasificada como CL-ML. La humedad encontrada varía entre 9.0% a 22.0%, aunque la mayoría de humedades se encuentra entre 15% a 25%, su promedio es de 15.70%. el límite líquido varia de 16% a 45%, situándose en promedio en 33.43%, el límite plástico varía entre 15% a 26% con un promedio de 20.65%, por lo cual los suelos finos tienen una consistencia semirrígida con un índice plástico promedio de 12.78%, para la granulometría, el porcentaje de gravas se sitúa en su mayoría por debajo de 3%, con arenas con un promedio de 33.39%, el porcentaje de finos supera en todos los casos el 50%.

Figura 113. Resultado de los ensayos de clasificación, límites de consistencia, humedad y granulometría para 22 muestras recolectadas hasta una profundidad de exploración de 40 m, donde se analizan los suelos finos encontrados.



Fuente: Autor

#### 4.3.3.2 Material Arenoso

En las exploraciones se encontraron suelos de composición arenosa que se clasificaron como Arena Arcillosa SC, Arena Limosa SM, Arena Arcillo-Limosa SC-SM y Arena arcillosa pobremente graduada SP-SC, los cuales se encuentran a lo largo (profundidad) de las exploraciones de campo, debido la naturaleza y origen

de los depósitos de acuerdo a la investigación geológica realizada, estos suelos componen el 61% de los suelos encontrados.

Para el análisis se tomaron 45 muestras, las cuales corresponden a 29 Clasificaron como SC, 7 clasificadas como SM, 6 clasificadas como SC-SM, 2 clasificadas como SP-SC y 1 clasificada como SP. La humedad encontrada varía entre 9.0% a 23.0%, aunque la mayoría de humedades se encuentra entre 15% a 25%, su promedio es de 17.24%. el límite liquido varia de 19% a 48%, situándose en promedio en 32.64%, el límite plástico varía entre 11% a 30.05% con un promedio de 20.35%, por lo cual los suelos Arenosos tienen una consistencia semirrígida con un índice plástico promedio de 12.29%, para la granulometría, el porcentaje de gravas se sitúa en su mayoría por debajo de 40% con un promedio de 13.47%, arenas con promedio de 50.65%, el porcentaje de finos en promedio es de 35.88%.

#### **4.3.3.3 Material Gravoso.**

En las exploraciones se encontraron suelos de composición gravosa que se clasificaron como Grava limosa GM, Grava Arcillosa GC y Grava pobremente graduada GP, los cuales se encierran a lo largo (profundidad) de las exploraciones de campo, debido a la naturaleza y origen de los depósitos de acuerdo a la investigación geológica realizada, estos suelos componen el 7.0% de los suelos encontrados.

Para el análisis se tomaron 8 muestras, las cuales corresponden a 7 Clasificadas como GC, 1 clasificadas como GP. La humedad encontrada tiene un promedio de 14.62%. el límite liquido varia de 17% a 36%, situándose en promedio en 23.46%, el límite plástico varía entre 10% a 18% con un promedio de 13.08%, por lo cual los suelos gravosos tienen una consistencia plástica con un índice plástico promedio de 10.38%, para la granulometría, el porcentaje de gravas se sitúa en su mayoría

por encima de 30% con un promedio de 42.74%, arenas con promedio de 29.93%, el porcentaje de finos en promedio es de 27.33%.

Figura 114. Resultado de los ensayos de clasificación, límites de consistencia, humedad y granulometría para 261 muestras recolectadas hasta una profundidad de exploración de 25 m, donde se analizan los suelos arenosos encontrados.



Fuente: Autor

Figura 115. Resultado de los ensayos de clasificación, límites de consistencia, humedad y granulometría para 24 muestras recolectadas hasta una profundidad de exploración de 25 m, donde se analizan los suelos gravosos encontrados.



Fuente: Autor

#### **4.3.4 Ensayos de resistencia (corte directo):**

Para determinar los parámetros geo mecánicos de los suelos encontrados en el lugar de estudio, se desarrollaron ensayos consolidados drenados (CD) a 57 muestras recolectadas en las 19 exploraciones de campo realizadas y 20 apiques, con este ensayo se determinaron las propiedades de Cohesión (C), ángulo de fricción ( $\phi$ ) y el peso unitario ( $\gamma$ ), para el perfil analizado se toman las propiedades de los cortes ubicados dentro de la zona de estudio. A estos resultados de resistencia se les hace un análisis estadístico descriptivo, con el fin de determinar los diversos parámetros mecánicos, para ello se toma como base las unidades geológicas superficiales, las características geomorfológicas, morfometría y el tipo de material encontrado en los sondeos, se zonificaron los sondeos en las diferentes unidades a saber cómo son miembro Limos Rojos (Sfl2), miembro gravoso (Sft2), miembro órganos en sus estratos arenosos y arcilloso (Sft3), Coluviones (Sco) y Rellenos antrópicos (Sla).

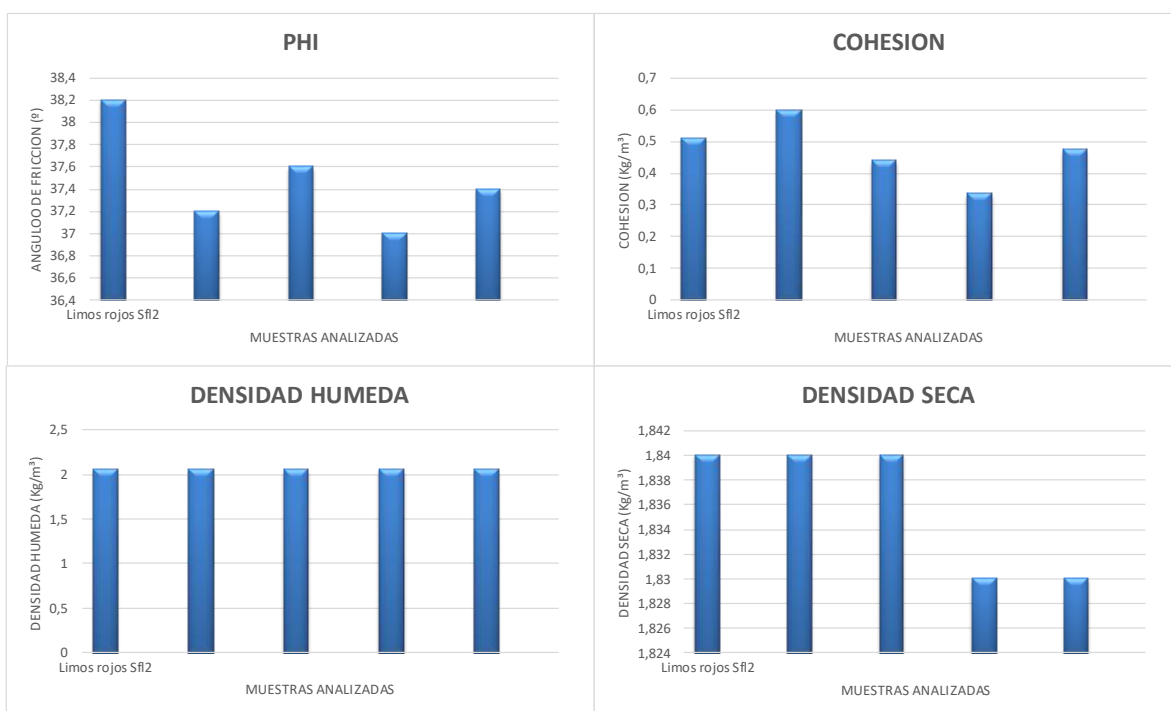
Para determinar el espesor de los estratos y por ende las muestras que se localizan allí, se hace un análisis de observación a los diferentes formatos de exploración de campo y los resultados arrojados por las tomografías, así como su posición de acuerdo a la zonificación geológica.

De acuerdo al análisis y a las observaciones, para limos rojos (Sfl2) se encontraron 5 muestras, para el miembro gravoso (Sft2) 26 muestras, para miembro órganos (Sft3) más arenoso 7 muestras, para miembro órganos (Sft3) más arcilloso 10 muestras, material de relleno 4 muestras y coluvión 6 muestras.

A continuación se muestra la caracterización de cada estrato encontrado de acuerdo a la estadística descriptiva aplicada, con base a estos resultados se establece las propiedades geotécnicas utilizadas para la definición del modelo geológico geotécnico el cual se detallara más adelante.

Figura 107. Análisis estadístico descriptivo para 5 muestras perteneciente al estrato de Limos Rojos (Sf12).

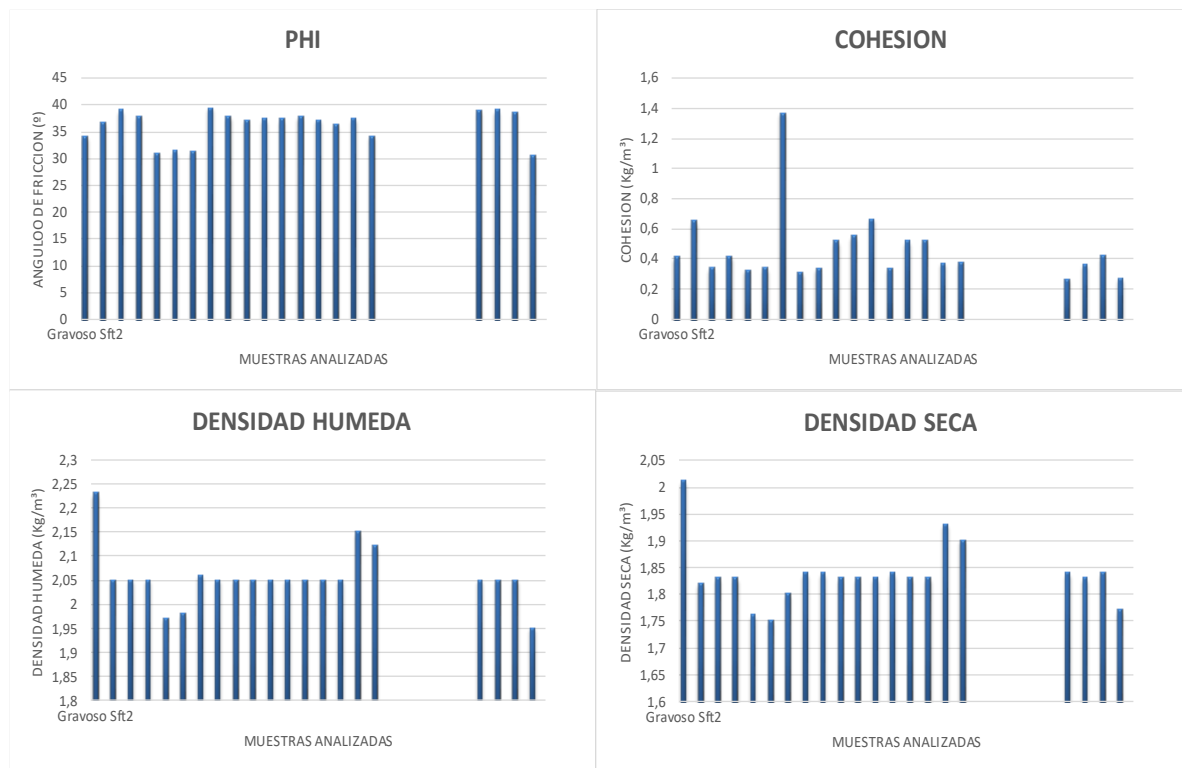
		$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$
Limos rojos Sf12	NUMERO DE MUESTRAS	5			
	promedio	37,48	0,47	2,05	1,84
	maximo	38,20	0,60	2,05	1,84
	minimo	37,00	0,34	2,05	1,83
	moda				
	mediana	37,40	0,48	2,05	1,84
	desviacion estandar	0,46	0,10	0,00	0,01
	viarianza	0,21	0,01	0,00	0,00
	coeficiente de variacion	0,01	0,21	0,00	0,00
	coeficiente de asimetria	1,03	-0,21		-0,61



Fuente: Autor

Figura 108. Análisis estadístico descriptivo para 26 muestras perteneciente al estrato de Miembro Gravoso de la formación Bucaramanga (Sft2)

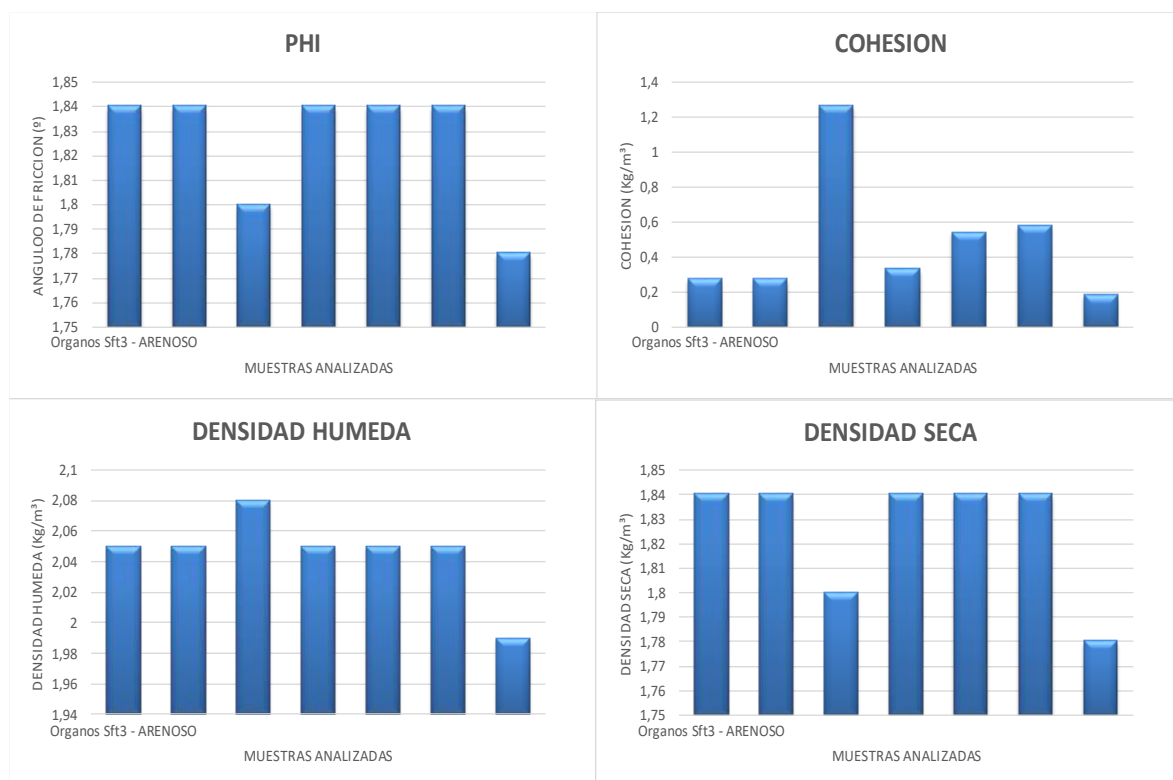
		$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$
Gravoso Sft2	NUMERO DE MUESTRAS	26			
	promedio	36,22	0,46	2,06	1,84
	maximo	39,40	1,37	2,23	2,01
	minimo	30,50	0,27	1,95	1,75
	moda	37,80	0,34	2,05	1,83
	mediana	37,30	0,38	2,05	1,83
	desviacion estandar	2,91	0,24	0,06	0,06
	viarianza	8,46	0,06	0,00	0,00
	coeficiente de variacion	0,08	0,52	0,03	0,03
	coeficiente de asimetria	-1,01	3,05	1,18	1,49



Fuente: Autor

Figura 109. Análisis estadístico descriptivo para 7 muestras perteneciente al estrato de Miembro Órganos Arenoso de la formación Bucaramanga (Sft3)

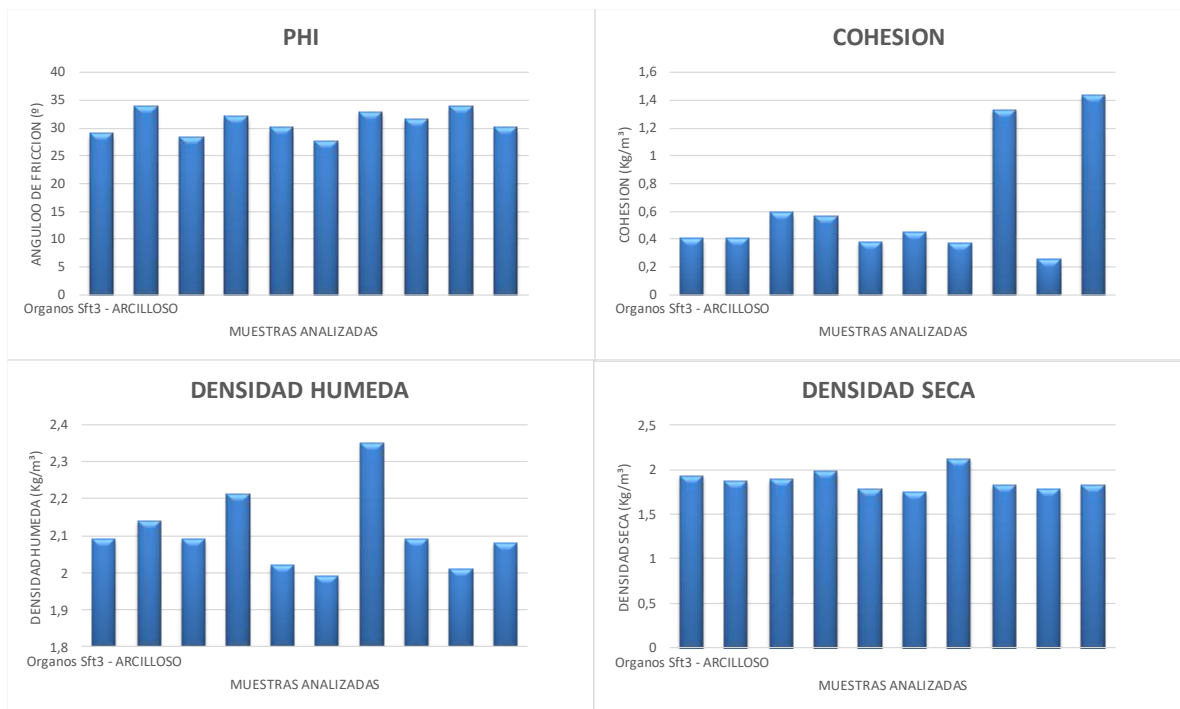
		$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$
NUMERO DE MUESTRAS		7			
Organos Sft3 - ARENOSO	promedio	36,07	0,49	2,05	1,83
	maximo	40,50	1,26	2,08	1,84
	minimo	28,50	0,18	1,99	1,78
	moda		0,28	2,05	1,84
	mediana	37,90	0,33	2,05	1,84
	desviacion estandar	4,83	0,37	0,03	0,03
	viarianza	23,33	0,14	0,00	0,00
	coeficiente de variacion	0,13	0,75	0,01	0,01
coeficiente de asimetria	-1,05	1,86	-1,57	-1,45	



Fuente: Autor

Figura 110. Análisis estadístico descriptivo para 10 muestras perteneciente al estrato de Miembro Órganos Arcilloso de la formación Bucaramanga (Sft3)

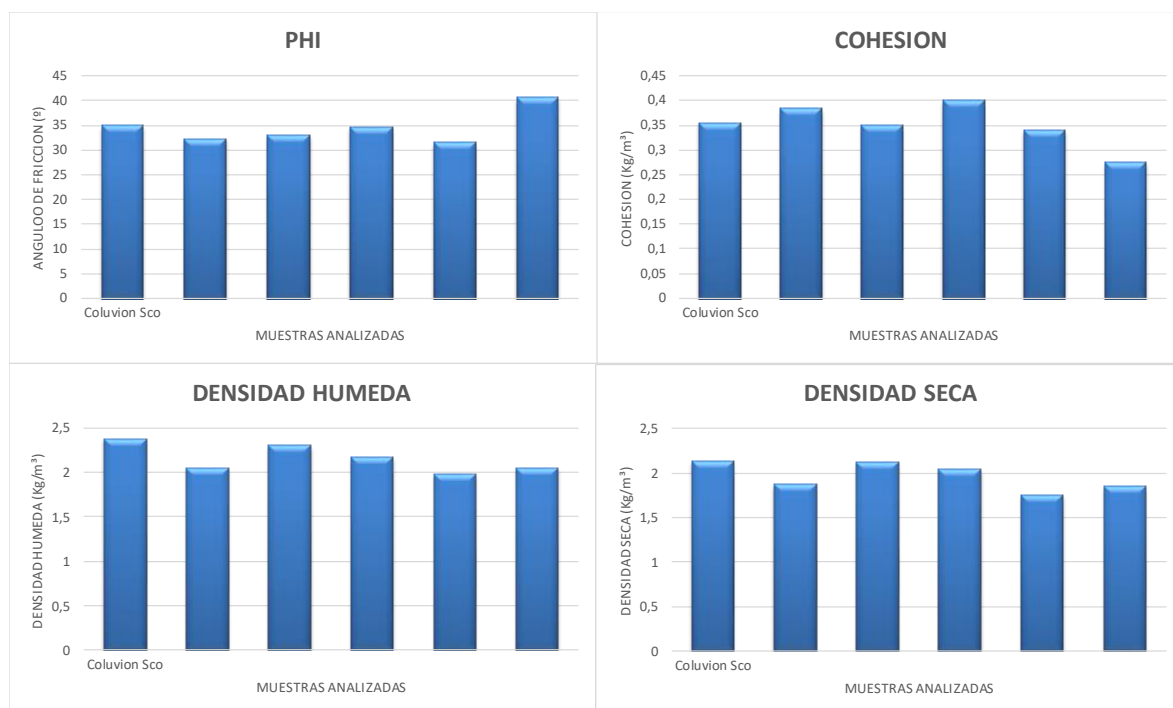
		$\varphi(^{\circ})$	C(kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
Organos Sft3 - ARCILLOSO	NUMERO DE MUESTRAS	10			
	promedio	30,93	0,62	2,11	1,87
	maximo	33,90	1,44	2,35	2,12
	minimo	27,60	0,26	1,99	1,75
	moda	30,10		2,09	1,78
	mediana	30,80	0,43	2,09	1,85
	desviacion estandar	2,23	0,41	0,11	0,11
	viarianza	4,98	0,17	0,01	0,01
	coeficiente de variacion	0,07	0,67	0,05	0,06
coeficiente de asimetria	-0,04	1,57	1,39	1,21	



Fuente: Autor

Figura 111. Análisis estadístico descriptivo para 6 muestras perteneciente al estrato de Coluviones (Sco)

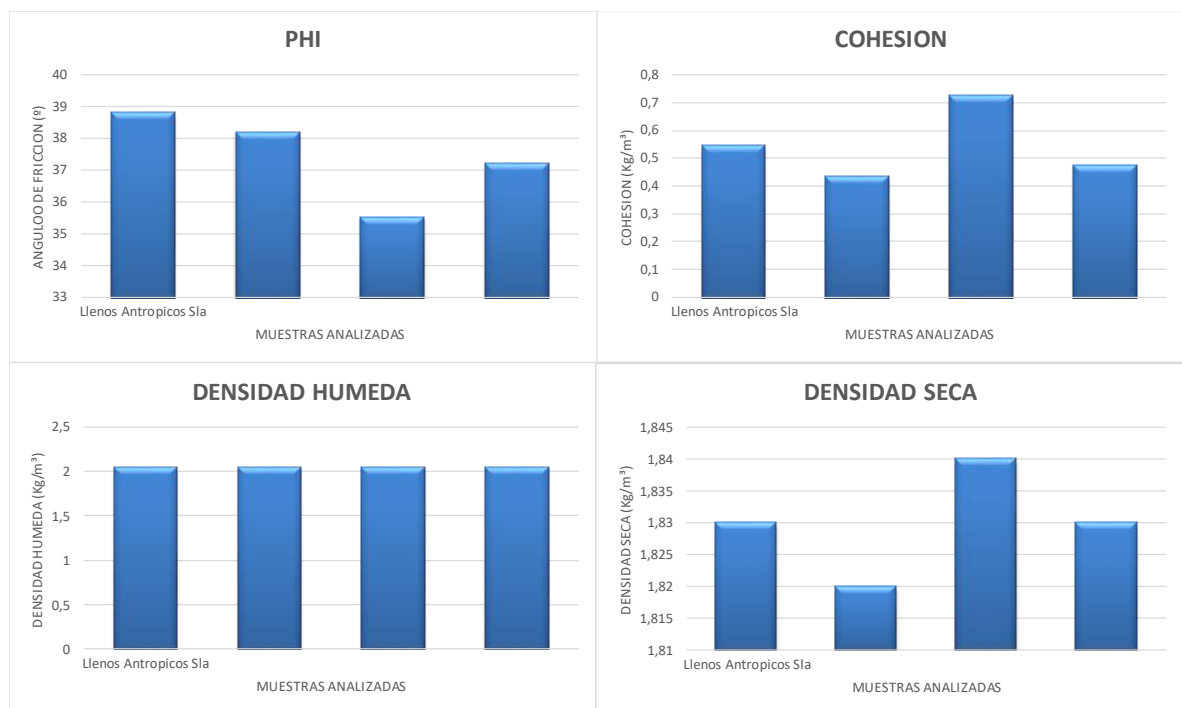
		$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$
<b>Coluvion Sco</b>	<b>NUMERO DE MUESTRAS</b>	<b>6</b>			
	promedio	24,56	0,23	2,16	1,96
	maximo	29,66	0,27	2,38	2,13
	minimo	22,14	0,18	1,98	1,75
	moda			2,05	
	mediana	24,05	0,24	2,11	1,95
	desviacion estandar	3,26	0,04	0,16	0,16
	viarianza	10,66	0,00	0,02	0,03
	coeficiente de variacion	0,13	0,18	0,07	0,08
coeficiente de asimetria	1,56	-1,03	0,52	-0,08	



Fuente: Autor

Figura 112. Análisis estadístico descriptivo para 4 muestras perteneciente al estrato de Llenos Antrópicos (Sla)

		$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$
Llenos Antrópicos Sla	NUMERO DE MUESTRAS	4			
	promedio	27,03	0,36	2,05	1,83
	maximo	28,19	0,48	2,05	1,84
	minimo	25,43	0,29	2,05	1,82
	moda			2,05	1,83
	mediana	27,26	0,34	2,05	1,83
	desviacion estandar	1,44	0,13	0,00	0,01
	viarianza	2,08	0,02	0,00	0,00
	coeficiente de variacion	0,05	0,35	0,00	0,00
coeficiente de asimetria	-0,91	1,31		0,00	



Fuente: Autor

## 4.4 ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO

### 4.4.1 Caudales aferentes

Tomando como referencia las áreas aferentes determinadas con base en la topografía del estudio, se calculan una serie de caudales aportantes por sectores para diferentes periodos de retorno, utilizando el método racional.

Se inicia por estimar los tiempos de concentración por las ecuaciones de Giandotti y Kirpich, para escoger el menor de ambos, con el objetivo de obtener la mayor intensidad de precipitación posible de las curvas IDF. Debido a que las áreas aferentes son tan pequeñas, los tiempos de concentración obtenidos para todas las áreas son los mínimos, por lo cual se utilizan en los cálculos de caudal, las máximas intensidades para cada uno de los periodos de retorno.

Tabla 33. Tiempos de concentración para cada área aferente

Drenaje	Longitud (Mtrs)	Área (Ha.)	Cota Inicio	Cota Final	Tc Giandotti		Tc Kirpich	
					Horas	Min	Horas	Min
A1	189.95	1.44	869	838	0.17	10.30	0.04	2.21
A2	178.02	1.51	904	861	0.14	8.67	0.03	1.81
A3	186.33	1.07	912	881	0.16	9.34	0.04	2.17
A4	148.42	0.91	864	840	0.15	9.24	0.03	1.84
A5	124.17	0.42	874	840	0.10	5.74	0.02	1.31

Fuente: Autor

Tabla 34. Caudales para diferentes periodos de retorno

Drenaje	Área Km2	Tc min	Intensidad mm						C	Caudales m3/s					
			2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
A1	0.0144	2.21	196.95	225.96	255.99	301.89	342.01	387.46	0.75	0.59	0.68	0.77	0.90	1.02	1.16
A2	0.0151	1.81	196.95	225.96	255.99	301.89	342.01	387.46	0.30	0.25	0.28	0.32	0.38	0.43	0.49
A3	0.0107	2.17	196.95	225.96	255.99	301.89	342.01	387.46	0.75	0.44	0.50	0.57	0.67	0.76	0.86
A4	0.0091	1.84	196.95	225.96	255.99	301.89	342.01	387.46	0.75	0.37	0.43	0.48	0.57	0.65	0.73
A5	0.0042	1.31	196.95	225.96	255.99	301.89	342.01	387.46	0.60	0.14	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27

Fuente: Autor

#### **4.4.2 Análisis hidrogeológico del flujo.**

Debido a que la ladera, no presenta una saturación completa, por sus materiales permeables y la gran altura de esta, que no permite una saturación total. Es de esperar que los niveles freáticos, producto de la infiltración del agua y del macizo de Santander, se encuentren en el contacto del Miembro Órganos Arenoso-Arcilloso. Sin embargo sobre sector oriental del perfil analizado, se observa un área de drenaje y sobre el escarpe se evidencia rastros de erosión hídrica, además la cobertura vegetal, muestra una zona húmeda, sobre esta área se definió un nivel freático por medio de un análisis de sensibilidad, así mismo y teniendo como base las fuentes piezométricas de la zona de estudio y su variabilidad (Tomadas del estudio de CDMB-Sully 1989), se realizara un análisis de variabilidad de flujo para el perfiles característico, para ello se utilizara el programa Slide de la firma Rocscience.

Para el análisis del flujo de infiltración, se realizó un modelo hidrogeológico, como se indicó anteriormente, en el cual se toman como condiciones de frontera las variaciones de nivel freático mostradas en la información piezométrica y del análisis de infiltración. A continuación se describe el procedimiento para la obtención de resultados del análisis, para este caso se muestra la evaluación sobre el perfil analizado.

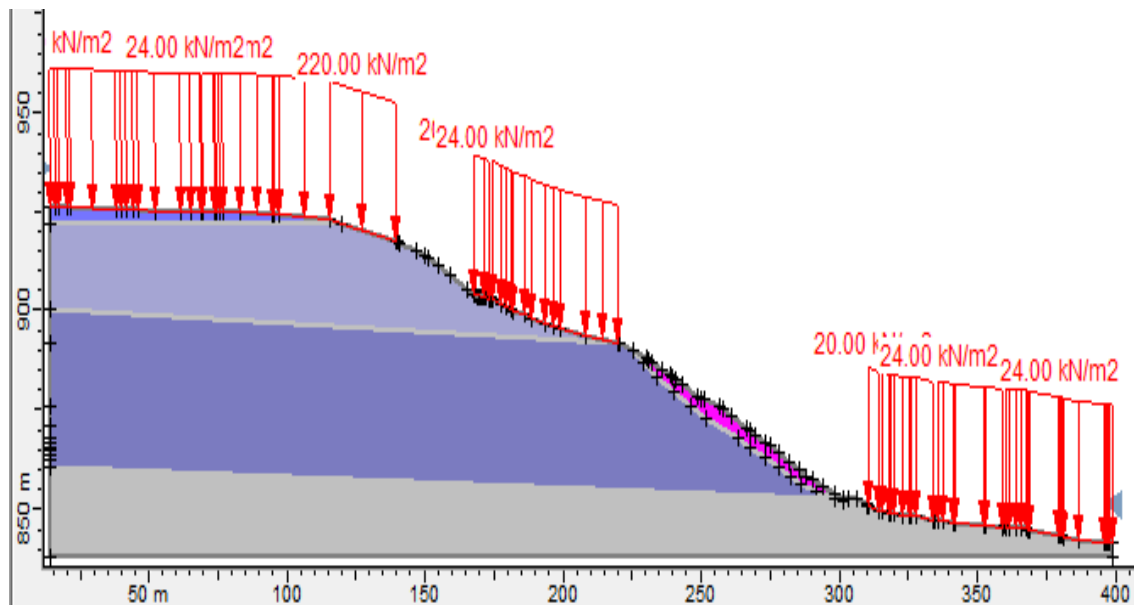
Para el perfil analizado se relacionan las tres unidades del miembro implicadas en el modelo geológico geotécnico (Sfl2, Sft2 y Sft3 en sus estratos arenosos y arcilloso). Como parámetros se incluyeron los coeficientes de velocidad de infiltración K, para cada miembro y unidad determinada de acuerdo a ensayos de percolación realizados en el sector.

Con el fin de determinar el comportamiento subterráneo del nivel freático sobre el perfil geológico geotécnico caracterizado, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo hidrogeológico, según las propiedades geotécnicas caracterizadas y las propiedades hidráulicas determinadas por medio del K de infiltración.

Como condición de frontera para el modelo hidrogeológico, se cuenta con el nivel arcillo arenoso, del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, donde se presenta un cambio considerable de permeabilidad, pasando de un material areno limoso a un material arcilloso. Funcionando este contacto como un nivel donde el nivel de agua discurre, debido a la baja infiltración sobre el suelo Arcilloso, así mismo de acuerdo a la información piezométrica se tomara al inicio del perfil (parte alta) una entrada de nivel freático de acuerdo a la medición de cota registrada por los piezómetros SM-8, SM-7, SM-6 y SM-5, los cuales son los más cercanos al lugar de estudio y se ubican en la zona de la meseta, y en la parte baja se tomara la información registrada en los piezómetros SI-8 y SI-9.

A continuación se presenta el análisis de sensibilidad del nivel freático, mediante el uso de software de elementos finitos, determinando el comportamiento del flujo y la tendencia de este, con el fin de determinar este nivel freático y su comportamiento general, para el modelo de estabilidad geotécnica y de amenaza para los escenarios actuales y críticos.

Figura 113. Perfil geológico geotécnico para modelo hidrogeológico



■ M LIMOS ROJOS	
■ M GRAVOSO	
■ M ORGANOS ARENOSO	■ COLUVION
■ M ORGNAOS ARCILLOS	■ LLENOS ANTROPICOS

Fuente: Autor

Tabla 35. Resultados de los ensayos de percolación

MATERIAL	k(m/s)
M. LIMOS ROJOS	5.4 E - 4
M. GRAVOSO	1.7 E -4
M. ÓRGANOS ARENOSO	1.4 E -4
M. ÓRGANOS ARCILLOSO	5.6 E -6
COLUVIÓN	9.6 E -4
LLENO ANTRÓPICO	

Fuente: Autor

Para el análisis de sensibilidad del nivel freático, se partió de la condición de frontera, que pertenece al cambio de material de arenoso a arcilloso del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, cota inicial (cabeza del talud) del nivel freático a 27 m por debajo de la cota del terreno, y en el pie del talud una cota inicial entre 5m a 7m por debajo de la cota del terreno. Esta información se confirma de acuerdo a los resultados geofísicos de sondeos eléctricos verticales y tomografías eléctricas, donde se determinó altos niveles de humedad sobre la zona del contacto mencionado entre los estratos de miembro Órganos (Sft3), lamentablemente para la parte superior, los niveles de exploración no superan los 20 m de profundidad, por lo cual no se nota la presencia de humedades, ya que en el sector por cambio de pendiente las cabezas de presión sobrepasan los 40 m como se evidencia en los sondeos donde tampoco se encontró nivel de agua. Además mediante visitas de

campo, se determinó el afloramiento de niveles freáticos sobre la parte baja de la ladera ubicada al occidente del área analizada (calle 2, barrio y asentamiento La Transición), al el sur del barrio nueva Colombia, donde se evidencia el contacto de las unidades del miembro Órganos arenoso y arcilloso, encontrando en campo el cambio del material del suelo identificado, además por sus características geomorfológicas, se observa un cambio drástico en su geo forma, pasando de laderas muy inclinadas a laderas sub horizontales y se complementa con la captación de agua por drenes de penetración en la zona baja del barrio La Independencia sobre la calle 3, los cuales permanentemente estas conduciendo aguas subterráneas al alcantarillado, con el fin de abatir presiones.

Para el análisis de sensibilidad del nivel freático, se realizaron modelos hidrogeológicos, variando la condición de frontera, asumiendo como condición la cabeza total hidráulica, realizando tres modelos, el primero con tres fronteras, la primera cabeza de nivel freático inicial con 28.53 m de profundidad, la segunda condición de frontera en el cambio de pendiente con 9.7 m de profundidad y la condición tres en la zona plana con profundidad 9.7 m, estas profundidades se basaron en los piezómetros localizados en la zona tomando los valores promedio de los mismo, de acuerdo los valores mínimos o profundidad máxima.

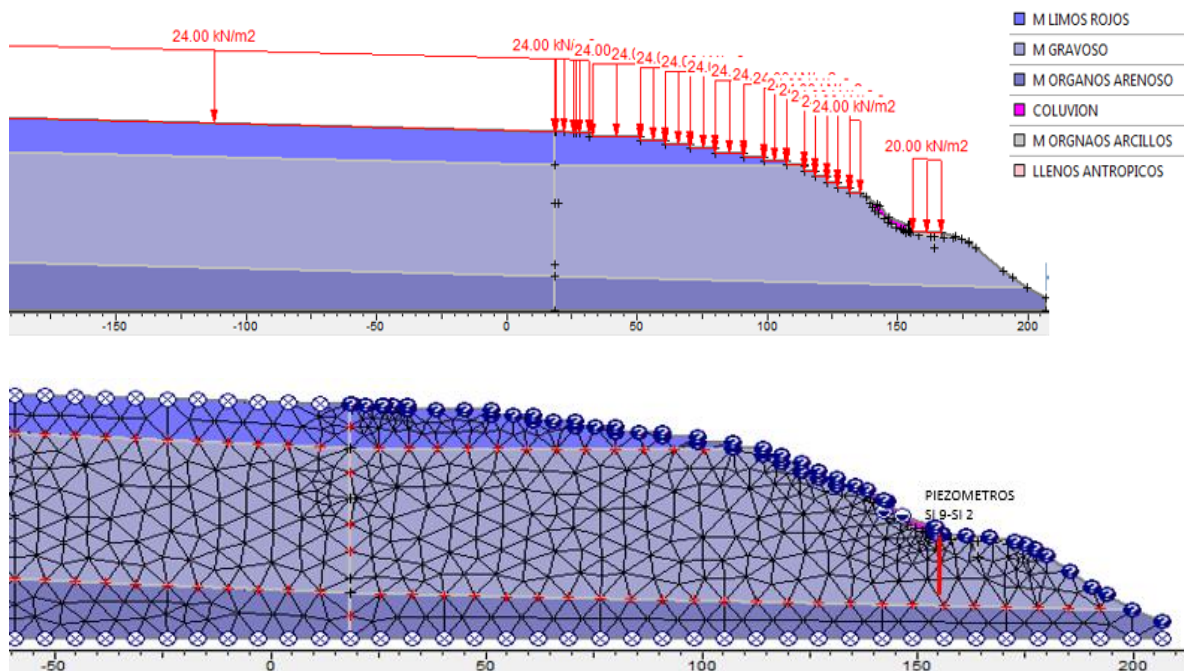
Con el fin de determinar el comportamiento subterráneo del nivel freático sobre el perfil geológico geotécnico caracterizado, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo hidrogeológico, según las propiedades geotécnicas caracterizadas y las propiedades hidráulicas determinadas por medio del K de infiltración.

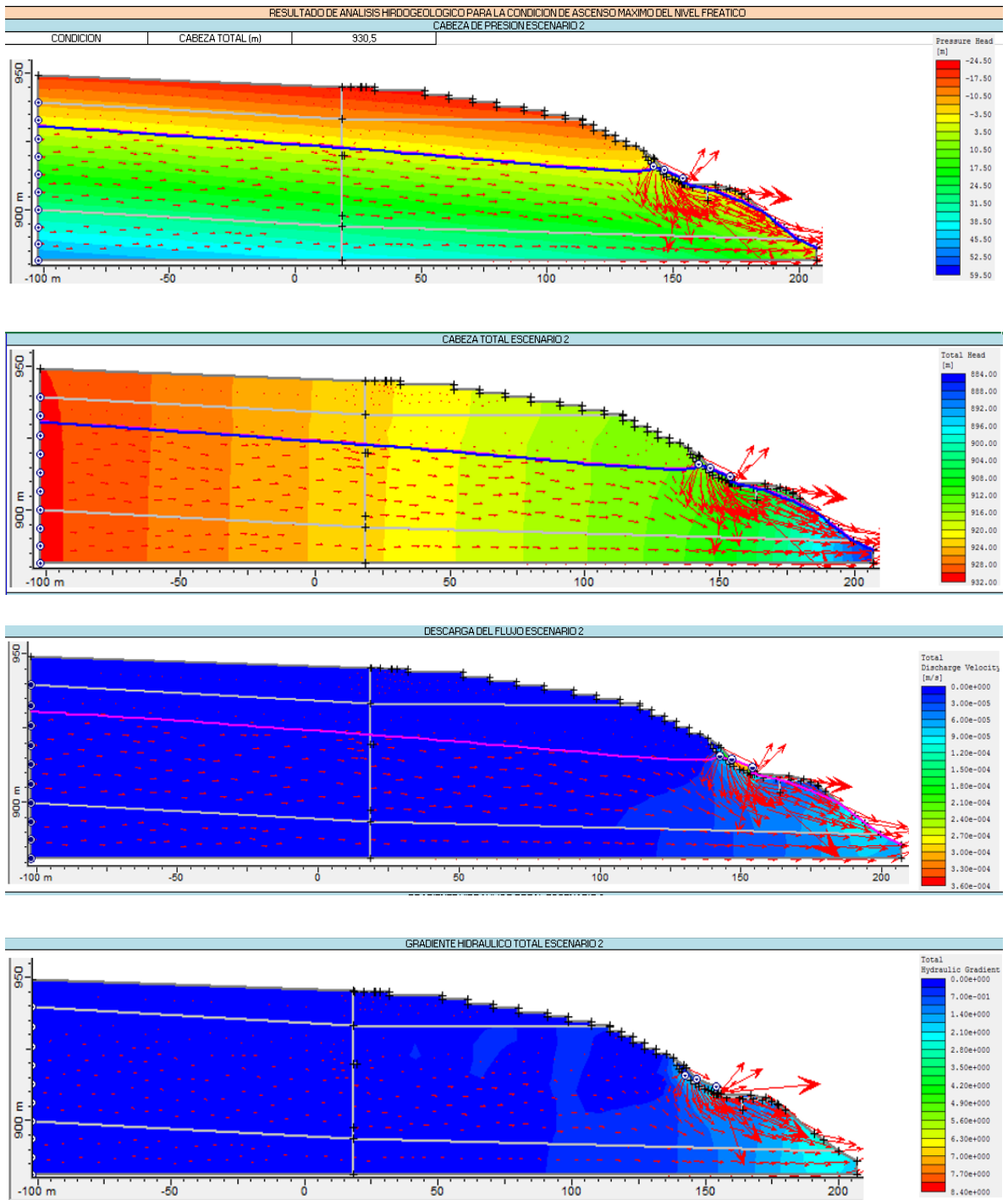
Como condición de frontera para el modelo hidrogeológico, se caracterizó de la exploración geofísica de sondeos eléctricos verticales y tomografías, también se consultó la información correspondiente a piezómetros instalados sobre la meseta de Bucaramanga y sobre las laderas analizadas, encontrados en el estudio "Relaciones entre niveles freáticos precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes.

A continuación se presenta el análisis de sensibilidad del nivel freático, mediante el uso de software de elementos finitos, determinando el comportamiento del flujo y la tendencia de este, con el fin de determinar este nivel freático y su comportamiento general, para el modelo de estabilidad geotécnica y de amenaza.

A continuación se presenta un ejemplo del análisis hidrogeológico para el escenario 2, el cual corresponde al más crítico, donde se contemplan los flujos máximos probables. La totalidad de los modelos se presentan en los anexos de hidrogeología.

Figura 114. Modelamiento inicial, condiciones de frontera de acuerdo a los niveles descritos en los piezómetros máximas cotas piezometricas probables.





Fuente. Slide Autor

Con el fin de determinar el comportamiento subterráneo del nivel freático sobre el perfil geológico geotécnico caracterizado, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo hidrogeológico, según las propiedades geotécnicas caracterizadas y las propiedades hidráulicas determinadas por medio del K de infiltración.

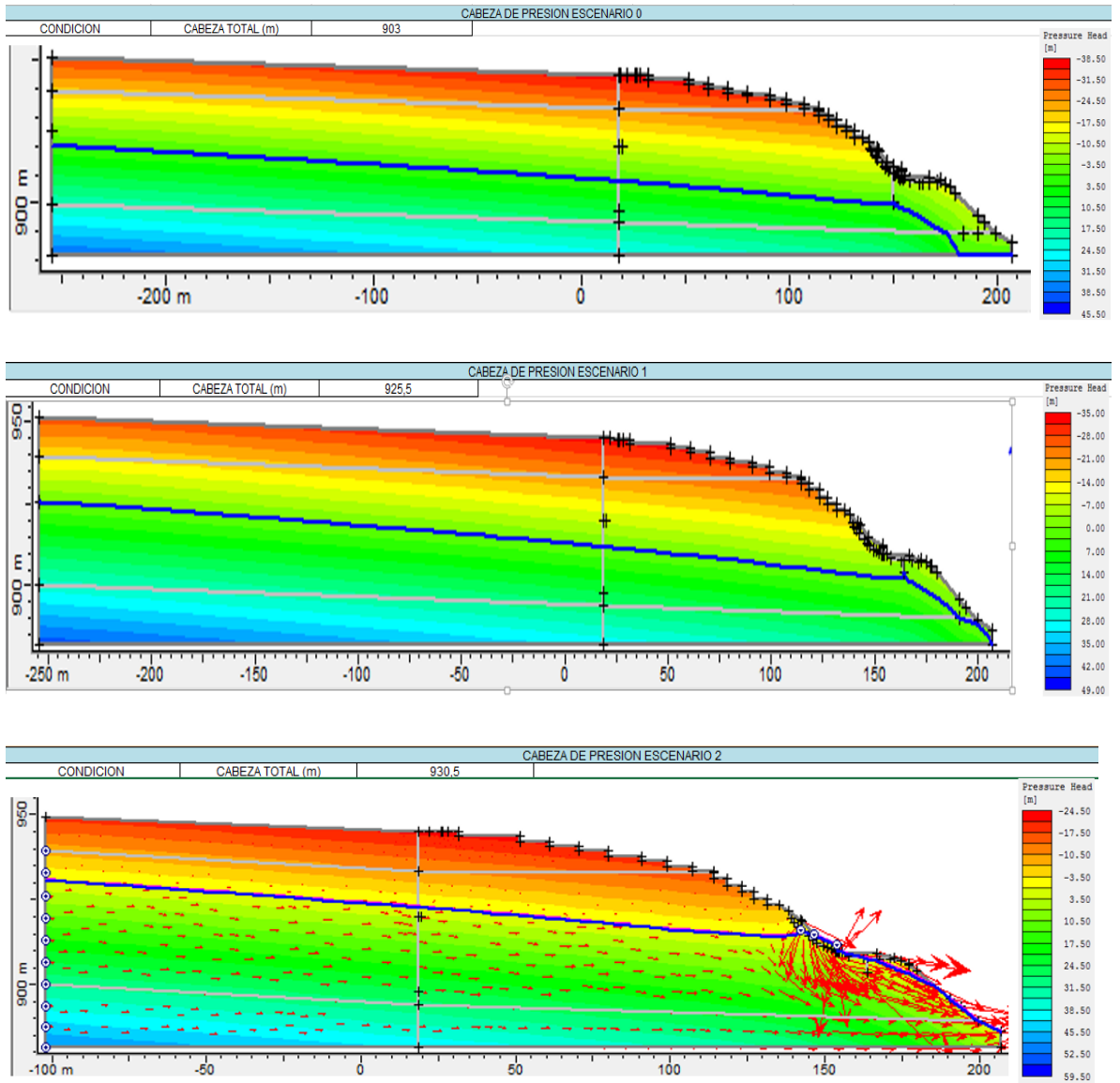
Como condición de frontera para el modelo hidrogeológico, se caracterizó de la exploración geofísica de sondeos eléctricos verticales y tomografías, también se consultó la información correspondiente a piezómetros instalados sobre la meseta de Bucaramanga y sobre las laderas analizadas, encontrados en el estudio "Relaciones entre niveles freáticos precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes".

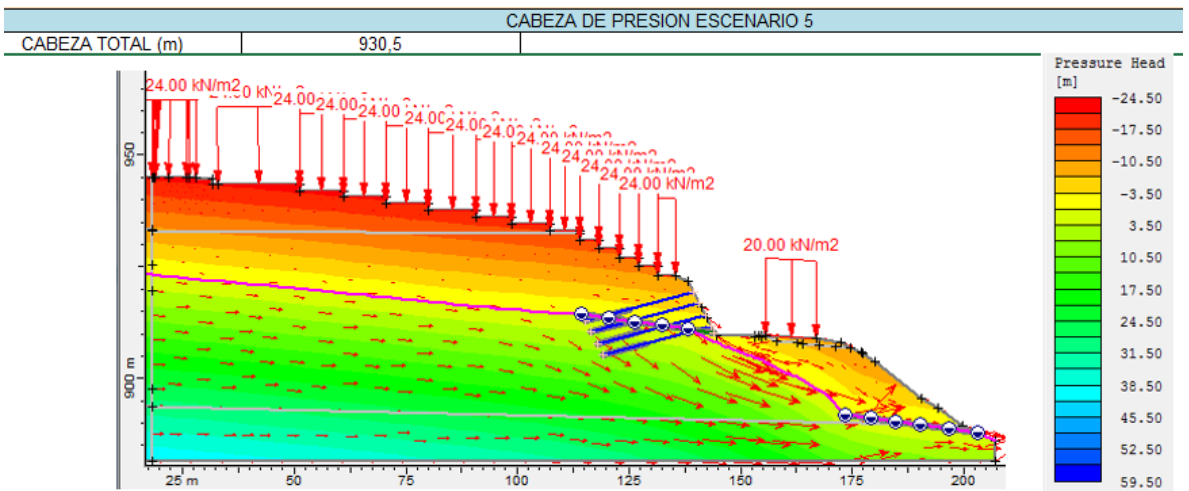
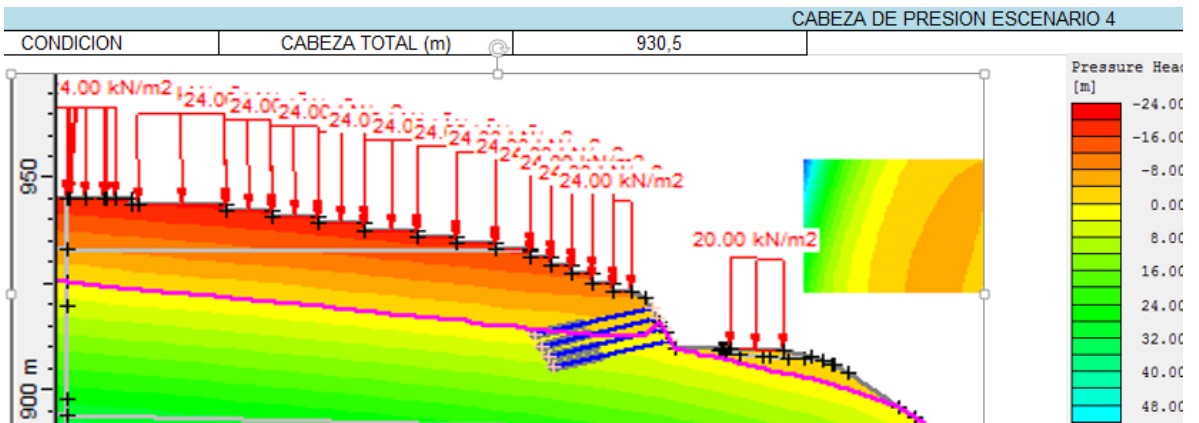
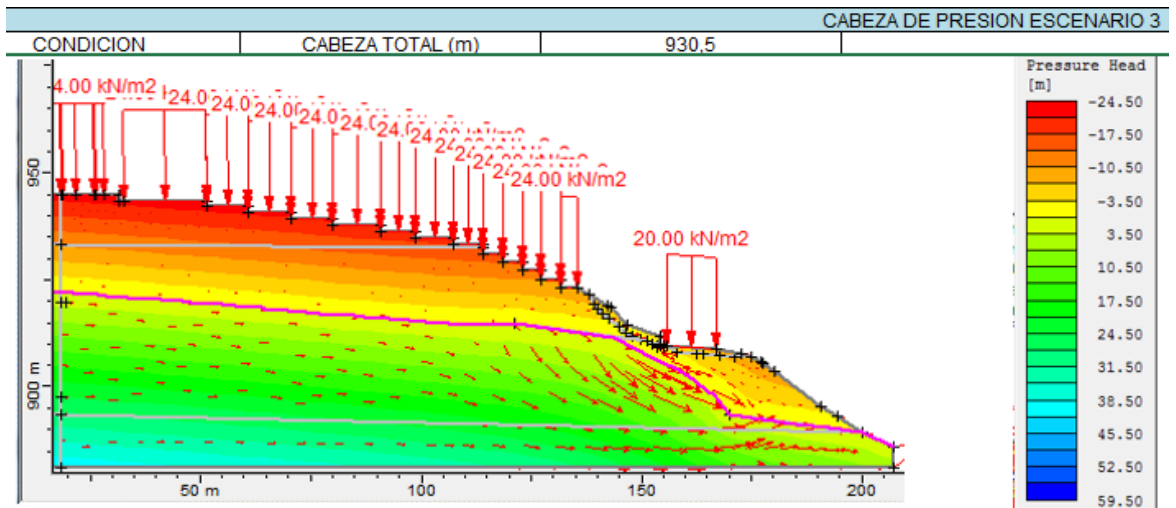
A continuación se presenta el análisis de sensibilidad del nivel freático, mediante el uso de software de elementos finitos, analizando el comportamiento del flujo y la tendencia de este, con el fin de determinar la ubicación del nivel freático y su comportamiento general, para el modelo de estabilidad geotécnica. Para este escenario 2, se asumen los niveles máximos probables, asumiendo un ascenso máximo del nivel freático de 5 metros sobre la meseta, encontrado la saturación de la ladera alta.

De acuerdo al comportamiento hidrogeológico analizado, mediante el uso de los parámetros hidráulicos de infiltración, utilizando los coeficientes de infiltración K para cada capa de suelo, y las condiciones iniciales, tomadas de los piezómetros existente, tomando los máximos ascensos multitemporales de los piezómetros, se analizó el comportamiento de los niveles freáticos, de acuerdo a análisis de elementos finitos, determinando la ubicación de estos niveles freáticos.

A continuación se presenta un resumen con los resultados del nivel freático en todos los escenarios evaluados esc 0, es1, esc 2, esc 3, esc 4 y esc 5 respectivamente

Figura 115. Resumen análisis hidrogeológico para determinación del nivel freático





Fuente. Slide Autor

Del Análisis de sensibilidad del modelo geológico geotécnico en función del nivel freático en condición estática para cada escenario se encontró que:

- En el escenario 0, se toma en cuenta el nivel promedio de los piezómetros; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando los valores promedio de los registros de los piezómetros. Se determinó la ubicación del nivel freático, encontrándolo en el sector bajo en aproximadamente 13 a 15 metros bajo la vía. No se evidencia la saturación de la parte baja de la ladera, donde se encuentra la vía, que conduce al municipio de Matanza, Santander.
- En el escenario 1, nivel máximo de los niveles de los piezómetros; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando los valores máximos de los niveles de los registros piezométricos. De este modelo hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, en aproximadamente 8 metros sobre la parte baja de la ladera, saturando parcialmente la ladera baja. Se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos en el pie de ladera, requiriéndose la necesidad de controlar estos afloramientos de flujos subterráneos, con el fin de evitar fallas de laderas por saturación.
- En el escenario 2, flujos máximos probables; se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático. De este modelo hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, saturando la parte interna de la ladera, sobre el material Coluvial encontrando, y saturando la ladera baja, donde se encuentra la vía. Se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos en la parte interna de la ladera y el pie de esta, requiriéndose la

necesidad de controlar estos afloramientos de flujos subterráneos, con el fin de evitar fallas de laderas por saturación.

- En el escenario 3, flujos máximos probables con obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático, controlado mediante la mitigación de la infiltración del flujo al suelo, por medio de sistemas de revegetalización de las áreas erosionadas, por medio de Pasto Vetiver y suelo orgánico, el suelo orgánico cumple la función de generar una capa semi impermeable al suelo, con el fin que esta discurra hacia los canales colectores de aguas superficiales. Además las raíces profundas de hasta 5 metros del Pasto Vetiver, disminuyen los niveles freáticos debido a que requieren de agua para crecer, es posible la utilización de arbustos de baja altura y raíces profundas sobre la ladera. También se plantearon obras de prevención para la colección de los flujos superficiales mediante el uso de canaletas superficiales y canales disipadores de energía, con el fin de conducir las aguas superficiales a las áreas bajas de la ladera, donde no generen afectaciones a la estabilidad de la ladera. Finalmente, se proyecta la realización obras de mitigación por medio de drenes de penetración horizontal a 30 metros, ubicados en el pie de ladera y sobre la ladera alta adyacente a la vía, la función de estos drenes es extraer los niveles de flujos subterráneos o nivel freático, dando un control ambiental a la ladera, evitando inestabilidades por la saturación de esta y generando una cobertura vegetal acorde al terreno. Con las obras proyectadas, se evidencia el control de los niveles freáticos sobre la ladera y depositando los flujos a la parte baja de la ladera. El afloramiento de los niveles freáticos, se presentan bajo el nivel de los drenes de penetración horizontal.

- En el escenario 4, flujos máximos probables con obras de estabilización mediante la realización de una pantalla anclada flexible de 4 anclajes de 25 metros con 40% bulbo y 60% Longitud libre, tensionadas a 20 T, cada 2.5 metros en sentido vertical y 2 metros en sentido horizontal, sin obras de prevención ni mitigación, mediante la revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático. Del modelo hidrogeológico, se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos, sobre el pie de la ladera alta, y saturando por completo la ladera baja.
- En el escenario 5 flujos máximos probables con obras de estabilización mediante la realización de una pantalla anclada flexible de 4 anclajes de 25 metros con 40% bulbo y 60% Longitud libre, tensionadas a 20 T, cada 2.5 metros en sentido horizontal y 2.5 metros en sentido vertical, con obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático con obras de prevención, mitigación y estabilización realizando una pantalla anclada flexible de 4 anclajes de 25 metros con 40% bulbo y 60% Longitud libre, tensionadas a 20 T, cada 2.5 metros en sentido horizontal y 2.5 metros en sentido vertical. Controlado el nivel subterráneo mediante la mitigación de la infiltración del flujo al suelo, por medio de sistemas de revegetalización de las áreas erosionadas, por medio de Pasto Vetiver y suelo orgánico, el suelo orgánico cumple la función de generar una cama semi impermeable al suelo, con el fin que esta discurra hacia los canales colectores de aguas superficiales. Además las raíces profundas de hasta 5 metros del Pasto Vetiver, disminuyen los niveles freáticos debido a que requieren de agua para crecer, es posible la utilización de arbustos de baja altura y raíces profundas sobre la ladera. También se

plantearon obras de prevención para la colección de los flujos superficiales mediante el uso de canaletas superficiales y canales disipadores de energía, con el fin de conducir las aguas superficiales a las áreas bajas de la ladera, donde no generen afectaciones a la estabilidad de la ladera. Finalmente, se proyecta la realización obras de mitigación por medio de drenes de penetración horizontal a 30 metros, ubicados en el pie de ladera y sobre la ladera alta adyacente a la vía, la función de estos drenes es extraer los niveles de flujos subterráneos o nivel freático, dando un control ambiental a la ladera, evitando inestabilidades por la saturación de esta y generando una cobertura vegetal acorde al terreno. Del modelo hidrogeológico, se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos, sobre el pie de la ladera alta, y saturando por completo la ladera baja.

En los respectivos anexos de análisis de sensibilidad del nivel freático para cada escenario, se presentan los resultados hidrogeológicos, determinando la cabeza de presión, la cabeza total, la descarga del flujo, el gradiente hidráulico y finalmente se determinó la ubicación de este nivel freático en el perfil geológico geotécnico.

Con el fin de minimizar los detonantes ambientales que aportan factores negativos a las inestabilidades sobre la ladera estudiada, correspondiente a los flujos superficiales de escorrentía, flujos subterráneos y el control de erosión mediante el uso de revegetación. Se recomienda realizar el control de los niveles superficiales de escorrentía por medio de las canaletas superficiales ubicadas en áreas donde converja el flujo superficial, diseñadas en capítulos anteriores. Para minimizar la infiltración de las precipitaciones al sub suelo, se recomienda realizar un sistema de revegetación, usando pasto vetiver, evitando así también la erosión superficial del suelo superficial. Finalmente se proyecta un control de niveles subterráneos, mediante el uso de drenes de penetración horizontal, que cumple la función de extraer estos niveles freáticos, disminuyendo los factores detonantes de origen ambiental, en la estabilidad de la ladera.

#### **4.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**

En este subcapítulo se presentan los trabajos realizados para determinar la estabilidad de la ladera y la amenaza por fenómenos de movimientos en masa de esta, implementándose metodologías determinísticas para la obtención de los factores de seguridad, con los escenarios presentados que equivalen del escenario 0 al 5.

Las metodologías determinísticas, consisten en la modelación geológica geotécnica de la masa de suelo con parámetros puntuales obtenidos de los ensayos de laboratorio, para la determinación de los factores de seguridad por deslizamiento y la clasificación de la amenaza.

- Identificación de las laderas críticas.
- Levantamiento del perfil topográfico.
- Identificación de la geología local y el perfil de suelo.
- Identificación de las características geotécnicas de las unidades cartografiadas.
- Modelamiento geológico Geotécnico de las laderas identificadas, mediante el software Slide de la Firma Rocscience.
- Cálculo de factores de seguridad determinísticos.
- Clasificación de la estabilidad y amenaza para los escenarios presentados, de acuerdo a la categorización asumida.
- Identificación de la inestabilidad de las laderas para los diferentes escenarios planteados, de acuerdo a la categorización de la amenaza.

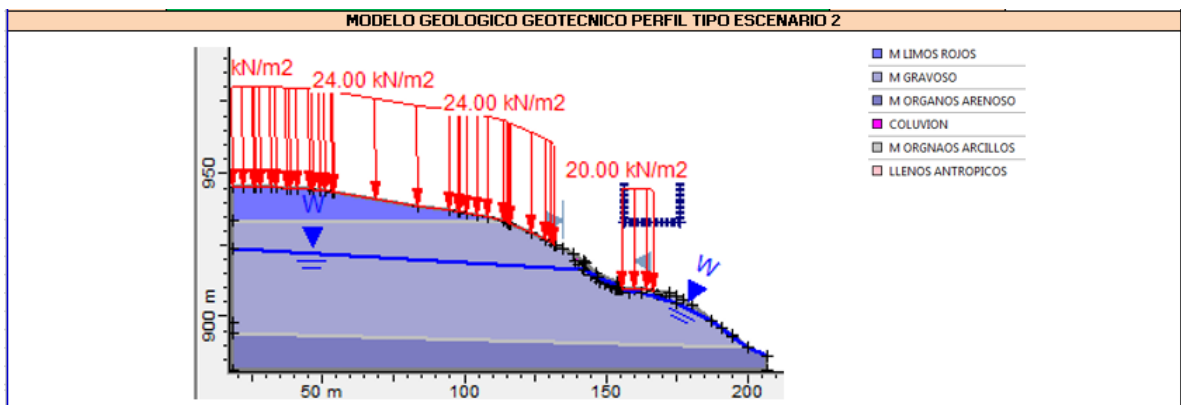
Una vez definidos los modelos geotécnicos, se procedió a identificar las superficies de falla y los niveles de estabilidad, como las áreas afectadas por los procesos de remoción en masa.

Por medio del análisis de estabilidad de los taludes, se realizó el modelamiento de estos en el software SLIDE de la firma ROCKSCIENCE, se analizó la estabilidad general por medio de la teoría de equilibrio límite, determinando los factores de seguridad de falla para los tres escenarios propuestos.

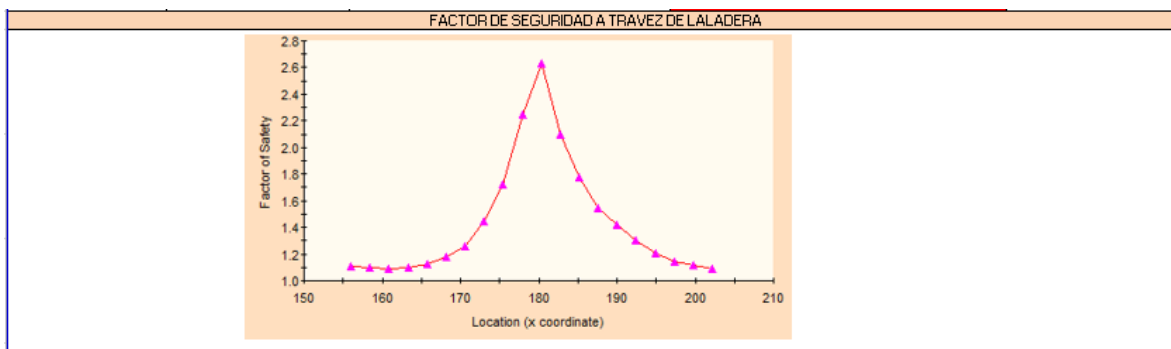
En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de los resultados de estabilidad por fenómenos de movimientos en masa para el escenario 2 propuesto, donde se evidencia el ascenso máximo del nivel freático y la inestabilidad general de la ladera. Los resultados de los modelamientos completos para los escenarios 0 a 5, se encuentran en el anexo resultados de estabilidad.

A continuación se presenta los resultados de un modelo geológico geotécnico, perteneciente al escenario 2, seguido de los resultados de factores de seguridad obtenido para este escenario, la totalidad de modelos geológicos geotécnicos, se presentan como anexo al documento técnico.

Figura 116. Modelo geológico geotécnico de estabilidad geotécnica escenario 2







Fuente. Autos Slide

Tabla 36. Resultados de factores de seguridad para el escenario 2

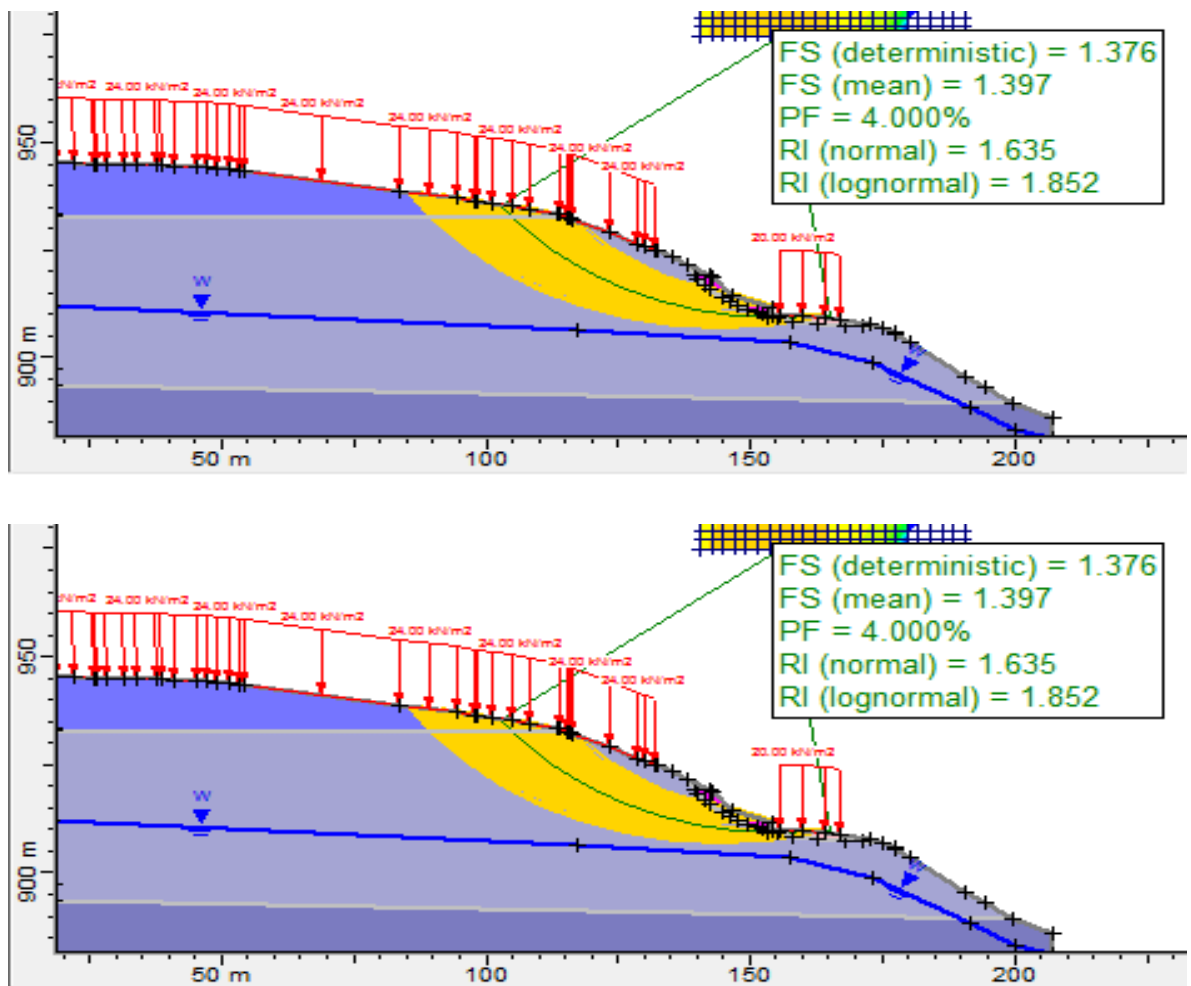
SUPERFICIES DE FALLA COLUVION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.021	ALTA
JAMBU	1.063	ALTA
SPENCER	1.130	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.170	ALTA
ORDINARY/FELLENIOUS	1.030	ALTA
SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.318	MEDIA
JAMBU	1.244	ALTA
SPENCER	1.322	MEDIA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.322	MEDIA
ORDINARY/FELLENIOUS	1.203	ALTA
SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.093	ALTA
JAMBU	1.000	ALTA
SPENCER	1.010	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.090	ALTA
ORDINARY/FELLENIOUS	0.998	ALTA

Fuente. Autor

Con el fin de visualizar las variaciones del factor de seguridad con el nivel freático, a continuación se presenta los resultados de estabilidad para todos los escenarios,

diferenciando los factores de seguridad de la ladera alta, el material coluvial y la ladera baja.

Figura 117. Resultados de estabilidad geotécnica ladera alta para los escenarios 0 al 5 respectivamente



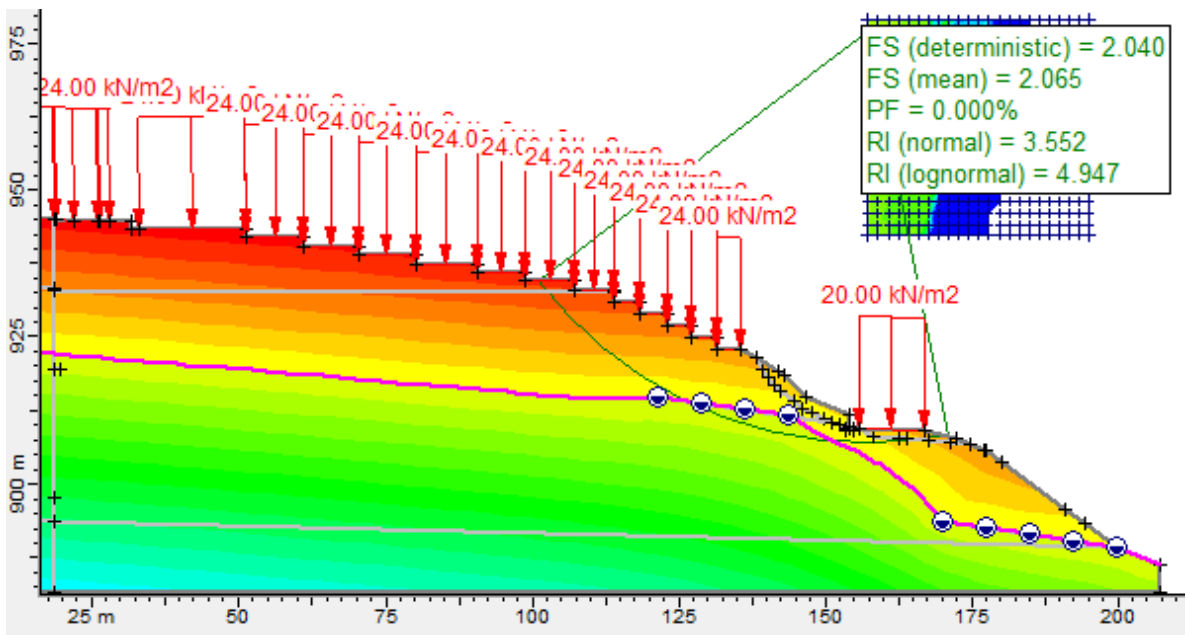
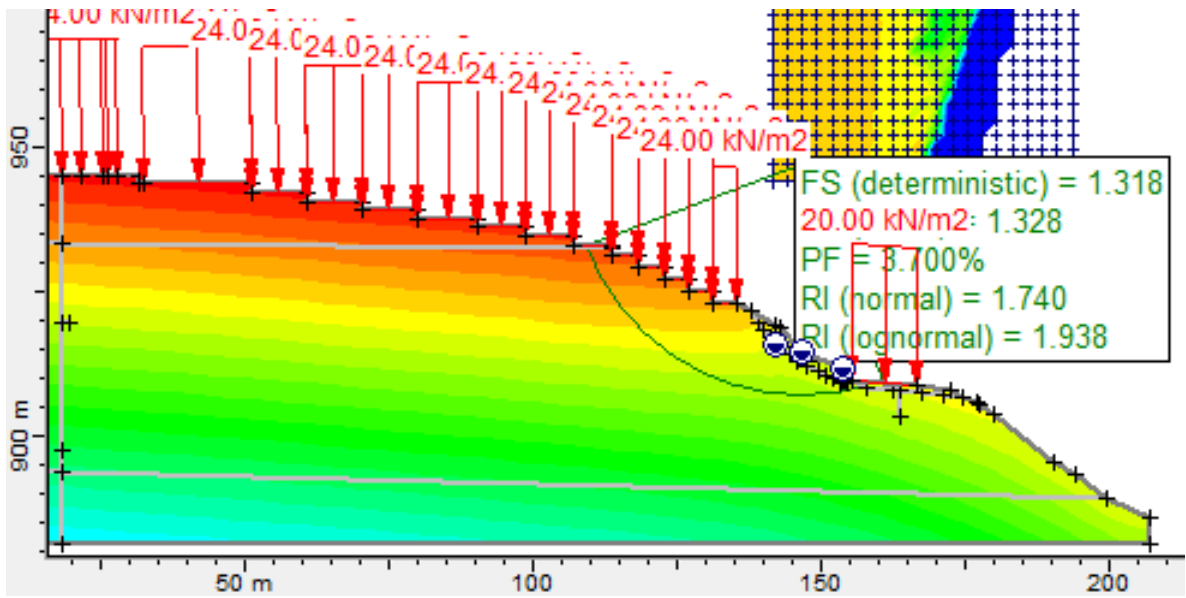




Figura 118. Resultados de estabilidad geotécnica del material coluvial para los escenarios 0 al 3 respectivamente

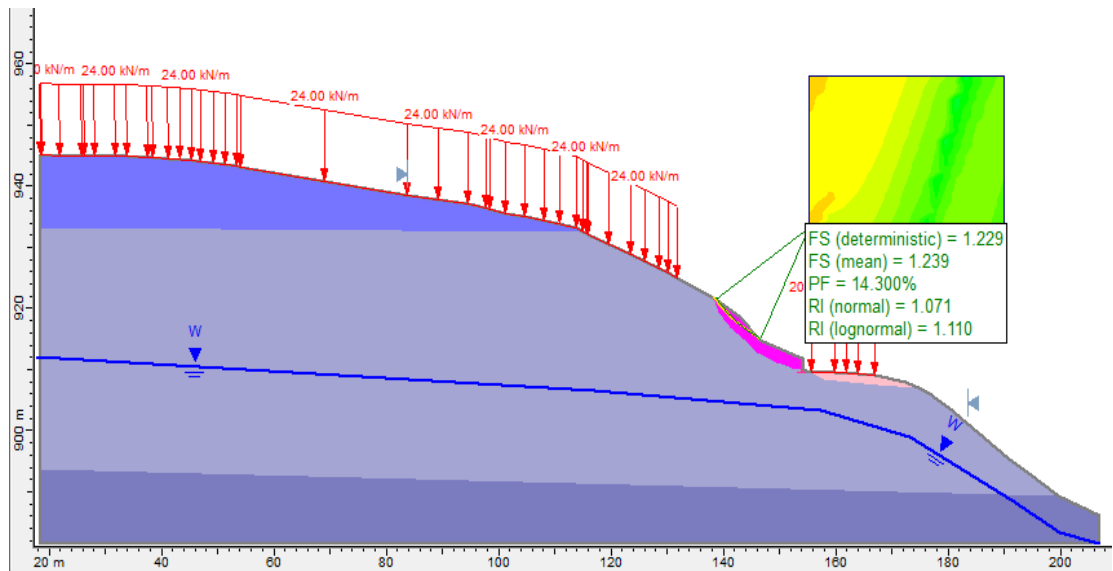
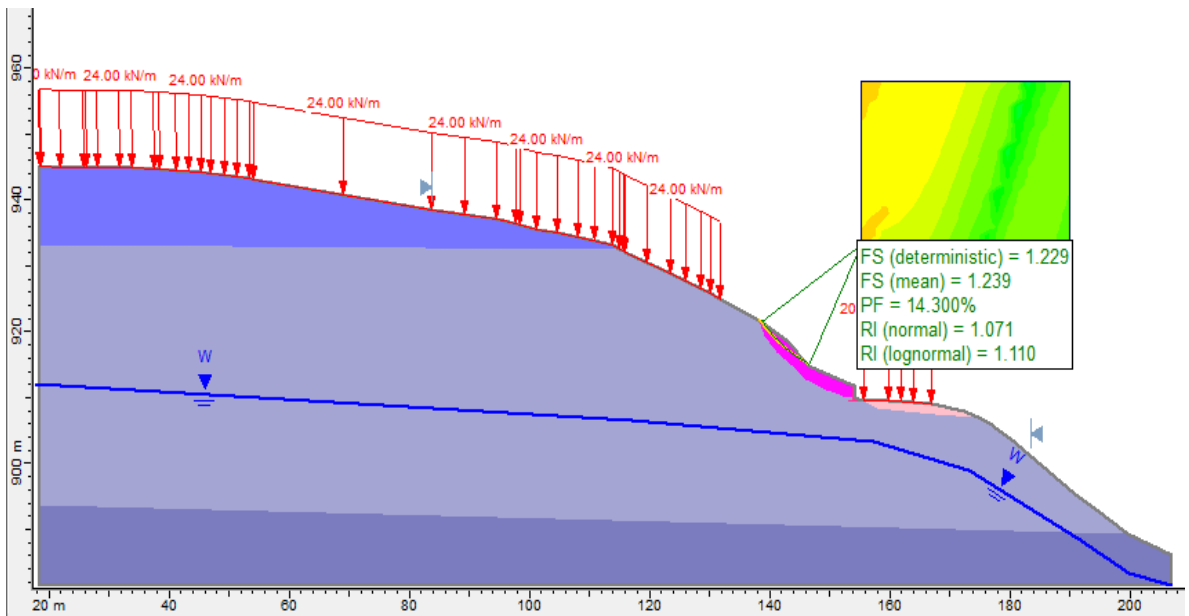
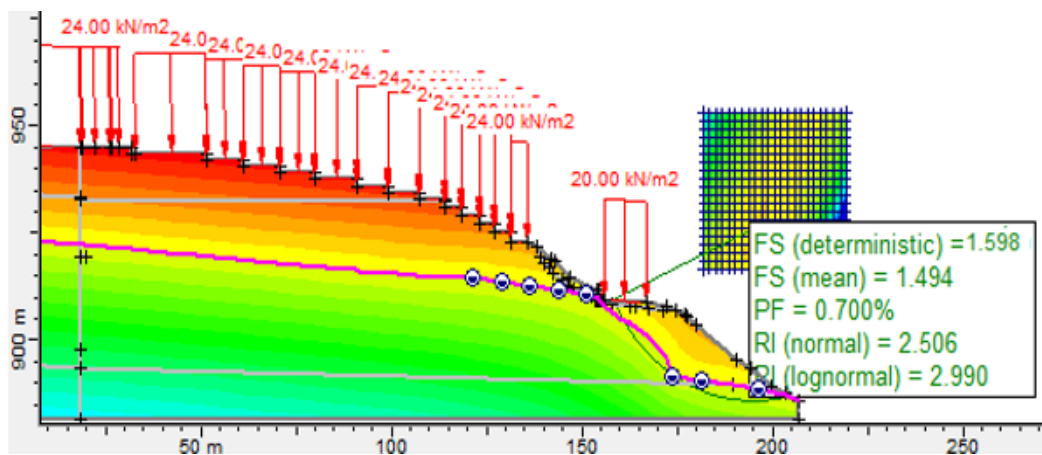
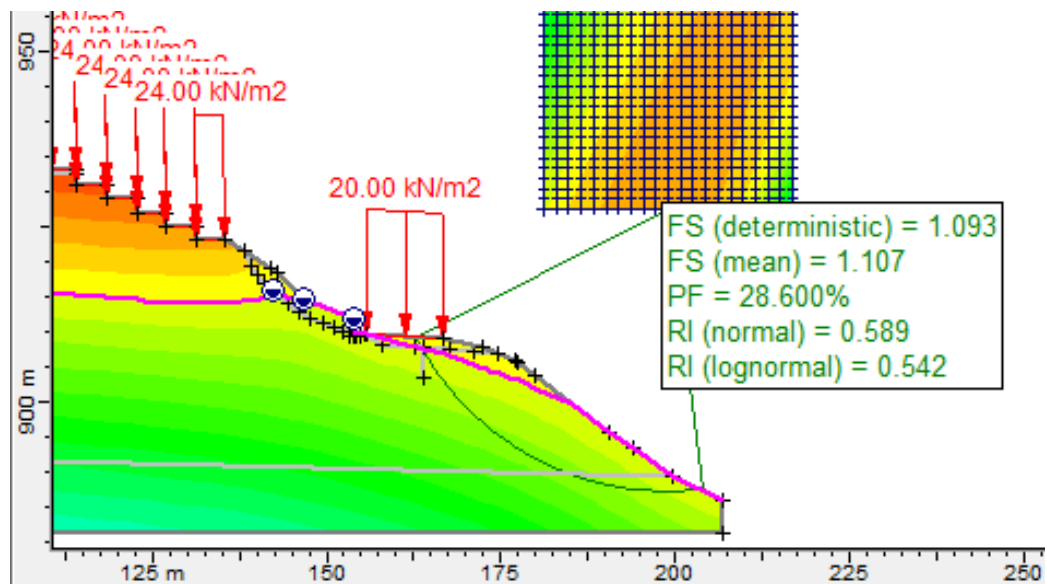
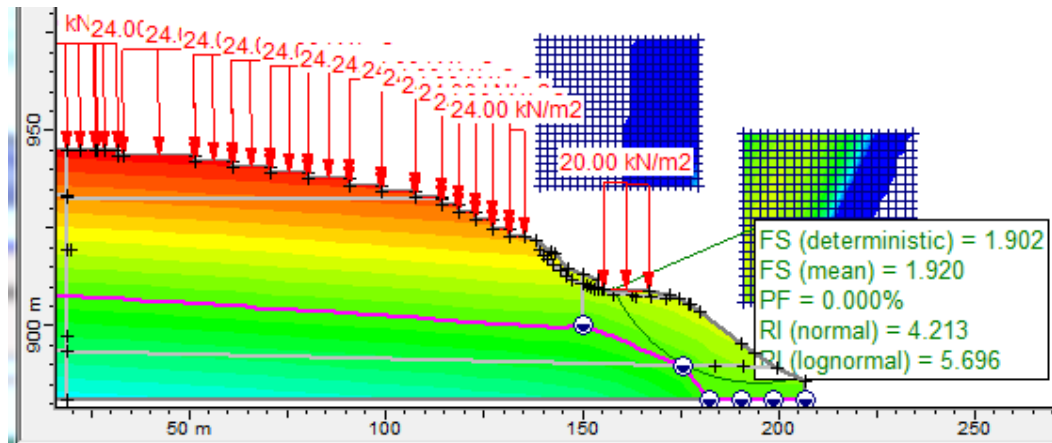
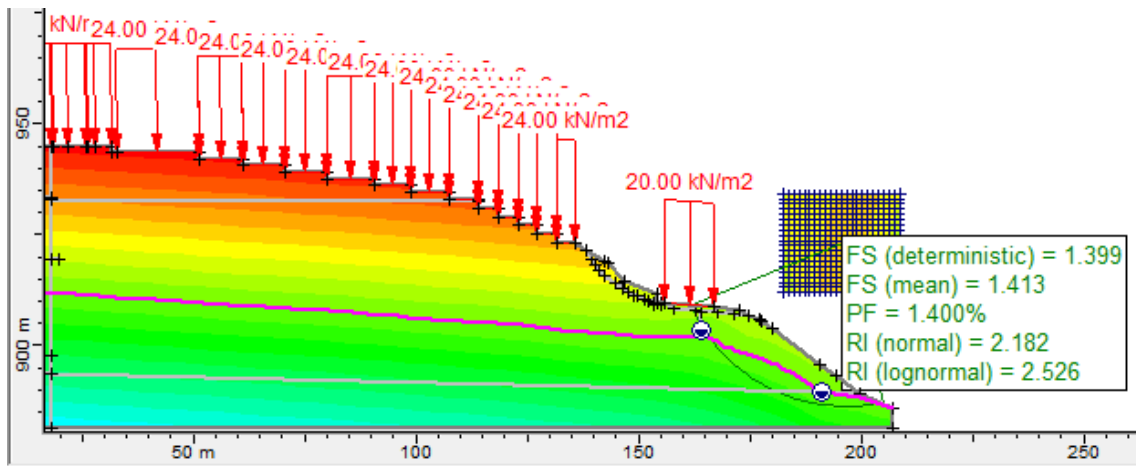
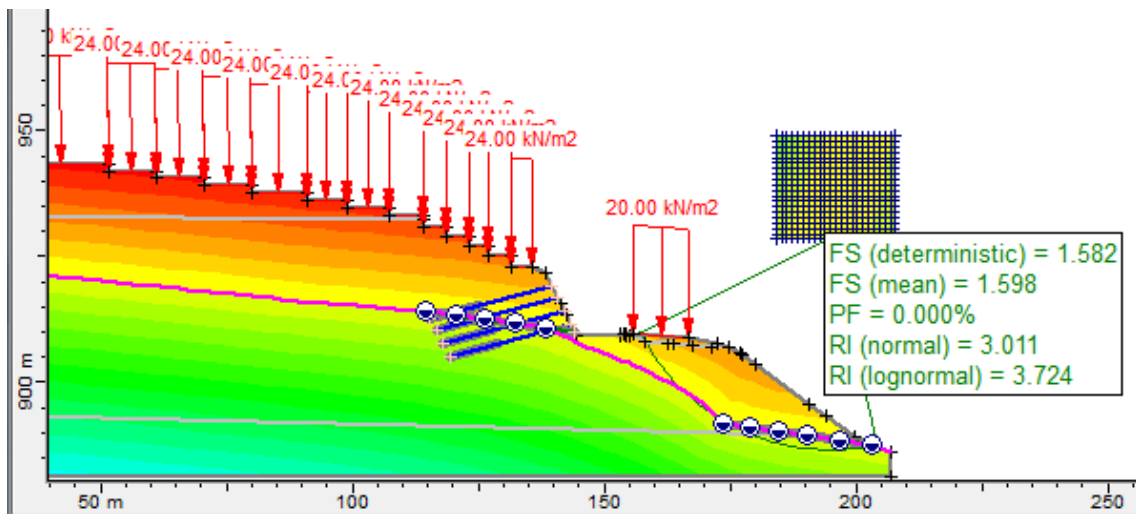
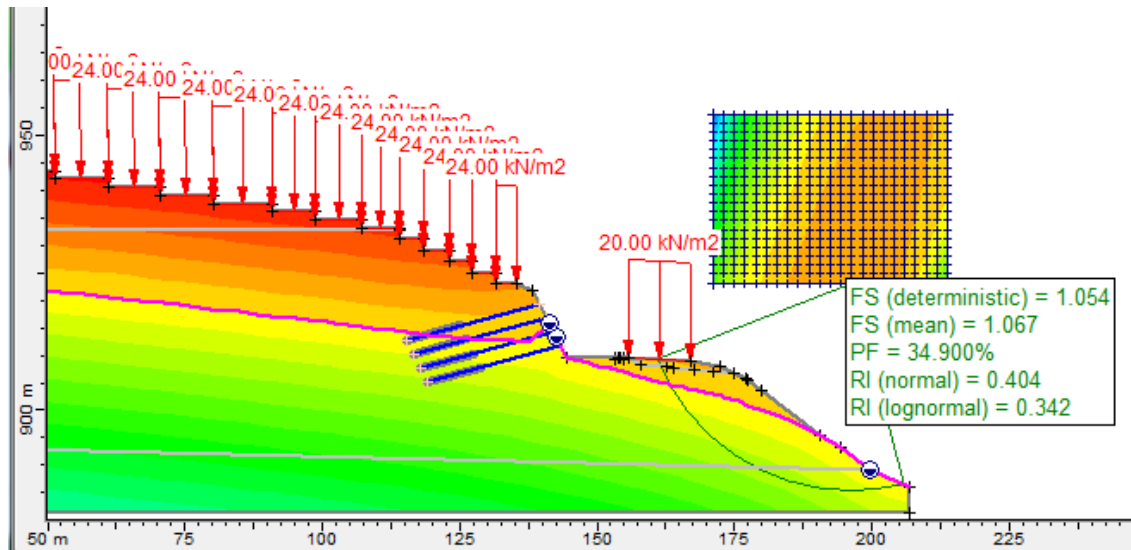




Figura 119. Resultados de estabilidad geotécnica de la ladra baja para los escenarios 0 al 5 respectivamente





Fuente. Autor Slide

Con el fin de observar la variación de los factores de seguridad para los escenarios planteados, a continuación se presenta el resumen de estos para todos los escenarios.

Tabla 37. Factores de seguridad obtenidos escenarios 0 al 5

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 0: TERRENO EN CONDICIÓN ACTUAL ESTÁTICO, CON NIVELES FREÁTICOS PROMEDIO			ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 1: TERRENO EN CONDICIÓN ACTUAL ESTÁTICO, CON NIVELES FREÁTICOS MÁXIMOS DE PIEZÓMETROS		
SUPERFICIES DE FALLA COLUION			SUPERFICIES DE FALLA COLUION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA	METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.229	ALTA	BISHOP	1.229	ALTA
JAMBU	1.231	ALTA	JAMBU	1.231	ALTA
SPENCER	1.229	ALTA	SPENCER	1.229	ALTA
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.231	ALTA	GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.231	ALTA
ORDINARY/FELLENIS	1.229	ALTA	ORDINARY/FELLENIS	1.229	ALTA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA			SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA	METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.376	MEDIA	BISHOP	1.376	MEDIA
JAMBU	1.360	MEDIA	JAMBU	1.360	MEDIA
SPENCER	1.410	MEDIA	SPENCER	1.410	MEDIA
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.410	MEDIA	GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.410	MEDIA
ORDINARY/FELLENIS	1.380	MEDIA	ORDINARY/FELLENIS	1.380	MEDIA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA			SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA	METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.902	BAJA	BISHOP	1.400	MEDIA
JAMBU	1.740	BAJA	JAMBU	1.280	MEDIA
SPENCER	1.890	BAJA	SPENCER	1.400	MEDIA
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.890	BAJA	GLE/MORGENSTER N AND PRICE	1.400	MEDIA
ORDINARY/FELLENIS	1.755	BAJA	ORDINARY/FELLENIS	1.265	MEDIA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 2: TERRENO EN CONDICIÓN ACTUAL ESTÁTICO, CON NIVELES ASCENSO MÁXIMO DEL NIVEL FREÁTICO		
SUPERFICIES DE FALLA COLUVION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.021	ALTA
JAMBU	1.063	ALTA
SPENCER	1.130	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.170	ALTA
ORDINARY/FELLENIUS	1.030	ALTA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.318	MEDIA
JAMBU	1.244	ALTA
SPENCER	1.322	MEDIA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.322	MEDIA
ORDINARY/FELLENIUS	1.203	ALTA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.093	ALTA
JAMBU	1.000	ALTA
SPENCER	1.010	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.090	ALTA
ORDINARY/FELLENIUS	0.998	ALTA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 4: TERRENO CON OBRAS DE ESTABILIZACIÓN ESTÁTICO, CON NIVELES ASCENSO MÁXIMO DEL NIVEL FREÁTICO SIN OBRAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN (REVEGETALIZACIÓN, CANALETAS SUPERFICIALES Y DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL)		
SUPERFICIES DE FALLA COLUVION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP		
JAMBU		
SPENCER		
GLE/MORGENSTERN AND PRICE		
ORDINARY/FELLENIUS		

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.767	BAJA
JAMBU	1.647	BAJA
SPENCER	1.770	BAJA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.770	BAJA
ORDINARY/FELLENIUS	1.610	BAJA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.160	ALTA
JAMBU	1.070	ALTA
SPENCER	1.164	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.159	ALTA
ORDINARY/FELLENIUS	1.054	ALTA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 3: TERRENO EN CONDICIÓN ACTUAL ESTÁTICO, CON NIVELES ASCENSO MÁXIMO DEL NIVEL FREÁTICO Y CON OBRAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN, MEDIANTE EL USO DE REVEGETALIZACIÓN, CANALETAS SUPERFICIALES Y DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL		
SUPERFICIES DE FALLA COLUVION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.229	ALTA
JAMBU	1.231	ALTA
SPENCER	1.229	ALTA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.231	ALTA
ORDINARY/FELLENIUS	1.229	ALTA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	2.040	BAJA
JAMBU	1.980	BAJA
SPENCER	2.038	BAJA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	2.035	BAJA
ORDINARY/FELLENIUS	1.982	BAJA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.598	BAJA
JAMBU	1.521	BAJA
SPENCER	1.550	BAJA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.480	MEDIA
ORDINARY/FELLENIUS	1.470	MEDIA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GEOTÉCNICA ESCENARIO 5: TERRENO CON OBRAS DE ESTABILIZACIÓN ESTÁTICO, CON NIVELES ASCENSO MÁXIMO DEL NIVEL FREÁTICO Y OBRAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN (REVEGETALIZACIÓN, CANALETAS SUPERFICIALES Y DRENES DE PENETRACIÓN HORIZONTAL)		
SUPERFICIES DE FALLA COLUVION		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP		
JAMBU		
SPENCER		
GLE/MORGENSTERN AND PRICE		
ORDINARY/FELLENIUS		

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.880	BAJA
JAMBU	1.910	BAJA
SPENCER	2.131	BAJA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	2.131	BAJA
ORDINARY/FELLENIUS	1.890	BAJA

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA		
METODO	FS DETERMINISTICO	AMENAZA
BISHOP	1.582	BAJA
JAMBU	1.480	MEDIA
SPENCER	1.580	BAJA
GLE/MORGENSTERN AND PRICE	1.582	BAJA
ORDINARY/FELLENIUS	1.490	MEDIA

Fuente: Autor

A continuación se presenta las observaciones y conclusiones de todos los escenarios modelados, donde se analizó la estabilidad geotécnica en función del modelo hidrogeológico presentado determinando el grado de estabilidad y la influencia de los parámetros ambientales de control de erosión, canalización superficial y control de los niveles freáticos.

#### **4.5.1 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 0: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos promedio.**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 0, que contempla el ascenso promedio de los niveles piezométricos, se identifica que en general, superficies de falla circulares locales, que presentan factores de seguridad inestables para la ladera alta y el material Coluvial, y estable para la zona de ladera baja.

De acuerdo a la estructura geológica, geomorfológica y las propiedades de los materiales, se encuentra que la erosión superficial, afecta considerablemente la estructura del suelo. Erosionando los materiales a una tasa acelerada, debido a sus materiales arenosos poco plásticos sobre el miembro órganos areno limoso, que se erosionan fácilmente. Actualmente, se evidencian procesos morfo dinámicos de erosión superficial acelerada. Estos procesos de erosión con el tiempo se convierten en procesos de inestabilidad. Requiriéndose un control de erosión por medio de revegetalización.

Sobre la ladera alta se encuentran factores de seguridad inestables para la condición estática, categorizados como amenaza media por fenómenos de remoción en masa.

Sobre la masa Coluvial se identifica la inestabilidad del mismo para condiciones no saturadas, determinando factores inestables sobre estos suelos, categorizado como amenaza alta por fenómenos de remoción en masa.

La ladera baja presenta una estabilidad general, evidenciando factores de seguridad estables, esta ladera no presenta la falla debido a que no se satura la parte baja de la ladera.

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario estático, se presenta la estabilidad de la ladera baja, determinando factores de 1.9, que representa una amenaza baja. Sobre la ladera alta, se evidencia una amenaza media en las condiciones estáticas modeladas determinando factores de seguridad del orden de 1.38, Finalmente sobre la masa de suelo Coluvial se evidencia una amenaza alta, calculando factores de seguridad del orden de 1.23 para la condición estática modelada en el perfil geológico geotécnico.

#### **4.5.2 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 1: terreno en condición actual estático, con niveles freáticos máximos de piezómetros.**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 1, que contempla nivel máximo de los niveles de los piezómetros, De este modelo hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, en aproximadamente 8 metros sobre la parte baja de la ladera, saturando parcialmente la ladera baja, donde se encuentra la vía, que conduce al Municipio de Matanza, Santander. Se identifica que en general, superficies de falla circulares locales, que presentan factores de seguridad inestables para la ladera alta, el material Coluvial, y la ladera baja.

Sobre la ladera alta se encuentran factores de seguridad inestables para la condición estática, categorizados como amenaza media por fenómenos de remoción en masa.

Sobre la masa Coluvial se identifica la inestabilidad del mismo para condiciones no saturadas, determinando factores inestables sobre estos suelos, categorizado como amenaza alta por fenómenos de remoción en masa

La ladera baja con el ascenso máximo de los niveles piezométricos, presenta una inestabilidad general, evidenciando factores de seguridad inestables, categorizados como amenaza media por fenómenos de remoción en masa.

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario 1 estático, se presenta la inestabilidad de la ladera baja, determinando factores de 1.4, que representa una amenaza media. Sobre la ladera alta, se evidencia una amenaza media en las condiciones estáticas modeladas, determinando factores de seguridad del orden de 1.38, Finalmente sobre la masa de suelo Coluvial se evidencia una amenaza alta, calculando factores de seguridad del orden de 1.23 para la condición estática modelada.

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico, se evidencia que con el ascenso máximo de las cotas piezométrica, se afecta la estabilidad de la ladera baja, ya que no se presentan variaciones en los factores de seguridad para las unidades de suelos Coluvial y la ladera alta.

#### **4.5.3 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 2: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático.**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 2, que contempla nivel máximo de los niveles freáticos, De este modelo hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, Saturando la parte interna de la ladera, sobre el material Coluvial encontrando, y saturando la ladera baja, donde se encuentra la vía, que conduce al Municipio de Matanza, Santander. Se identifica que en general, superficies de falla circulares locales, que

presentan factores de seguridad inestables para la ladera alta, el material Coluvial, y la ladera baja.

Sobre la ladera alta con el ascenso máximo del nivel freático, se evidencia una disminución leve de los factores de seguridad, por la influencia del agua y se encuentran factores de seguridad inestables para la condición estática, categorizados como amenaza media por fenómenos de remoción en masa.

Sobre la masa Coluvial con el ascenso máximo del nivel freático, se observa la disminución de los factores de seguridad, donde se identifica la inestabilidad del mismo para condiciones saturadas, determinando factores inestables sobre estos suelos, categorizado como amenaza alta por fenómenos de remoción en masa.

La ladera baja con el ascenso máximo de los niveles freáticos, donde se observa la saturación completa de esta parte baja, presenta una inestabilidad general, evidenciando factores de seguridad inestables, categorizados como amenaza alta por fenómenos de remoción en masa.

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario 2 estático, se presenta la inestabilidad general de la ladera, tanto en la parte alta como en el suelo Coluvial, determinando para la ladera alta factores de seguridad de 1.318, que representa una amenaza media. Sobre la ladera baja, se evidencia una amenaza alta en las condiciones estáticas modeladas, determinando factores de seguridad del orden de 1.093, Finalmente sobre la masa de suelo Coluvial se evidencia una amenaza alta, calculando factores de seguridad del orden de 1.021 para la condición estática modelada.

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico, se evidencia que con el ascenso máximo del nivel freático, se afecta la estabilidad general de la ladera, aumentando la inestabilidad geotécnica por el ascenso máximo del mismo.

#### **4.5.4 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 3: terreno en condición actual estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y con obras de prevención y mitigación, mediante el uso de revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 3, que contempla nivel máximo de los niveles freáticos, con obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático, controlado mediante la mitigación de la infiltración del flujo al suelo, por medio de sistemas de revegetalización de las áreas erosionadas, mediante el uso de Pasto Vetiver y suelo orgánico, el suelo orgánico cumple la función de generar una capa semi impermeable al suelo, con el fin que esta discurra hacia los canales colectores de aguas superficiales. Además las raíces profundas de hasta 5 metros del Pasto Vetiver, disminuyen los niveles freáticos debido a que requieren de agua para crecer, es posible la utilización de arbustos de baja altura y raíces profundas sobre la ladera.

También se plantearon obras de prevención para la colección de los flujos superficiales mediante el uso de canaletas superficiales y canales disipadores de energía, con el fin de conducir las aguas superficiales a las áreas bajas de la ladera, donde no generen afectaciones a la estabilidad de la ladera. Finalmente, se proyecta la realización obras de mitigación por medio de drenes de penetración horizontal a 30 metros, ubicados en el pie de ladera y sobre la ladera alta adyacente a la vía, la función de estos drenes es extraer los niveles de flujos subterráneos o nivel freático, dando un control ambiental a la ladera, evitando inestabilidades por la saturación de esta y generando una cobertura vegetal acorde al terreno

De este modelo hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que se presenta el control del flujo subterráneo,

mediante la implementación de drenes de penetración horizontal de longitud 30 metros, que extraen los flujos subterráneos, transportando estos niveles por medio de las canalizaciones superficiales y evitar la infiltración nuevamente al suelo. Se identifica que en general, superficies de falla circulares locales, que presentan factores de seguridad inestables para el material Coluvial, para la ladera alta y baja se evidencia una estabilidad general, encontrando la mitigación de los procesos de remoción en masa al máximo.

De acuerdo a la estructura geológica, geomorfológica, las propiedades de los materiales y las obras ambientales, mediante los sistemas de revegetalización y canalizaciones superficiales se evita la erosión superficial de los materiales.

Sobre la ladera alta y baja con el ascenso máximo del nivel freático, y el control de los niveles subterráneos de escorrentía, se evidencia el aumento de los factores de seguridad, se encuentran factores de seguridad estables para la condición estática, categorizados como amenaza baja por fenómenos de remoción en masa.

Sobre la masa Coluvial con el ascenso máximo del nivel freático y su control mediante drenes de penetración horizontal, se observa la inestabilidad del mismo, determinando factores inestables sobre estos suelos, categorizado como amenaza alta por fenómenos de remoción en masa. Se recomienda realizar la remoción de este material Coluvial, con el fin de evitar fallas locales del suelo suelto.

Para la ladera alta y baja con el ascenso máximo de los niveles freáticos, y el control de los niveles freáticos, se presenta una estabilidad general, evidenciando factores de seguridad estables, categorizados como amenaza baja por fenómenos de remoción en masa.

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario 3 estático, se presenta la estabilidad de la ladera alta y baja, y una inestabilidad sobre el suelo Coluvial, determinando para la ladera alta factores de seguridad de 2.04, que representa una amenaza baja. Sobre la ladera baja, se evidencia una

amenaza baja en las condiciones estáticas modeladas, determinando factores de seguridad del orden de 1.6, Finalmente sobre la masa de suelo Coluvial se evidencia una amenaza alta, calculando factores de seguridad del orden de 1.229 para la condición estática modelada.

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico con el ascenso máximo del nivel freático, se evidencia que con el control ambiental mediante la revegetalización, la canalización superficial y la implementación de drenes de penetración horizontal, se mitiga considerablemente la estabilidad general de la ladera, minimizando la inestabilidad de la ladera alta y baja. En cuanto a los suelos coluviales, es necesario realizar la remoción de estos, ya que por su condición suelta, presenta una inestabilidad local para cualquier escenario planteado.

#### **4.5.5 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 4: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático sin obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal)**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 4, que contempla nivel máximo de los niveles freáticos, con obras de estabilización por medio de una pantalla anclada cubierta con malla y mortero, compuesta por 4 anclajes en la sección tipo, de longitud 25 metros (40% bulbo, 60% longitud libre), que soportan 20 Toneladas, distanciados verticalmente cada 2.5 metros y horizontalmente cada 2 metros. Se proyectó la remoción del material Coluvial determinado inestable. No contempla las obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático, encontrando el afloramiento sobre el pie del talud conformado de 60° de inclinación, para la pantalla anclada, y la saturación completa de la ladera baja.

Se evidencia la estabilidad general de la ladera alta, sin la implementación de obras de prevención y mitigación, sin embargo los factores de seguridad se encuentran cerca al mínimo permitido 1.5 y con el fin de garantizar el adecuado comportamiento de la obra a través del tiempo, se hace necesario implementar dichas obras de prevención y mitigación.

Sobre la ladera baja, que soporta la vía Bucaramanga Matanza, se observa la saturación completa de la ladera, generando una inestabilidad general de esta, comprometiendo la movilidad del sector con el movimiento proyectado.

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando, que no se presenta el control del flujo subterráneo, identificando la saturación de la ladera baja y en poco porcentaje la ladera alta. Se encuentra en general, superficies de falla circulares locales, que presentan factores de seguridad inestables para la parte baja de la ladera, sobre el sector de la vía. Se identifica que con las obras de estabilización proyectadas en la ladera alta, esta es estable, sin embargo debido a que ambientalmente se debe proyectar obras eficientes y eficaces, se hace necesario implementar estas obras de prevención y mitigación con el fin de aumentar la estabilidad de la ladera mediante el aumento de los factores de seguridad, con esto también se garantiza la protección de estas obras

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario 4 estático, se presenta la estabilidad de la ladera alta, y una inestabilidad sobre el sector bajo, determinando para la ladera alta factores de seguridad de 1.77, que representa una amenaza baja. Sobre la ladera baja, se evidencia una amenaza alta en las condiciones estáticas modeladas, determinando factores de seguridad del orden de 1.16.

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico con el ascenso máximo del nivel freático, se evidencia la necesidad de implementar obras de prevención y mitigación como control ambiental mediante la revegetalización de las áreas

erosionadas con el uso de Pasto Vetiver y arbustos bajos, la canalización superficial, utilizando canaletas superficiales y disipadoras y la implementación de drenes de penetración horizontal para la extracción de los niveles freáticos, con el fin de mitigar la inestabilidad general de la ladera baja.

#### **4.5.6 Análisis de estabilidad geotécnica escenario 5: terreno con obras de estabilización estático, con niveles ascenso máximo del nivel freático y obras de prevención y mitigación (revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal)**

De los resultados de estabilidad geotécnica por fenómenos de remoción en masa para el escenario 5, que contempla nivel máximo de los niveles freáticos, con obras de estabilización por medio de una pantalla anclada cubierta con malla y mortero, compuesta por 4 anclajes en la sección tipo, de longitud 25 metros (40% bulbo, 60% longitud libre), que soportan 20 Toneladas, distanciados verticalmente cada 2.5 metros y horizontalmente cada 2 metros. Se proyectó la remoción del material Coluvial determinado inestable. Contempla las obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización por medio de pasto vetiver y Arbustos bajos para el control de erosión superficial, canaletas superficiales y disipadoras y drenes de penetración horizontal a 30 metros de profundidad; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático, encontrando el control de este nivel subterráneo de flujo, conservando las laderas semisecas, y evitando que los efectos de las presiones de poros afecten la estabilidad de la ladera.

Se evidencia la estabilidad general de las laderas alta y baja, con la implementación de obras de prevención y mitigación, aumentando los factores de seguridad determinando laderas estables

De este modelo geológico geotécnico e hidrogeológico, se determinó el comportamiento y la ubicación del nivel freático, encontrando el control ambiental de los procesos erosivos y el control de los niveles subterráneos de flujo de agua. Se identifica que en general, superficies de falla circulares locales, que presentan factores de seguridad estables en general.

De acuerdo a los factores de seguridad determinísticos calculados para escenario 5 estático, se presenta la estabilidad de la ladera alta y la baja, determinando para la ladera alta factores de seguridad de 1.88, que representa una amenaza baja. Sobre la ladera baja, se evidencia una amenaza baja en las condiciones estáticas modeladas, determinando factores de seguridad del orden de 1.58.

Para la determinación de la influencia del control ambiental al perfil geológico geotécnico presentado, a continuación se identifican las magnitudes de las variaciones de los factores de seguridad para los escenarios planteados, cuantificando la variación de los factores de seguridad al deslizamiento en función de los controles ambientales de revegetalización, canalizaciones superficiales y control de niveles freáticos, mediante drenes de penetración horizontal.

Tabla 38. Influencia del nivel freático en los factores de seguridad

SUPERFICIES DE FALLA COLUVION				SUPERFICIES DE FALLA COLUVION	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	0.000	-0.208	0.208	BISHOP	
JAMBU	0.000	-0.168	0.168	JAMBU	
SPENCER	0.000	-0.099	0.099	SPENCER	
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	0.000	-0.061	0.061	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	
ORDINARY/FELLEN IUS	0.000	-0.199	0.199	ORDINARY/FELL ENIUS	

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA				SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	0.000	-0.058	0.722	BISHOP	0.113
JAMBU	0.000	-0.116	0.736	JAMBU	0.263
SPENCER	0.000	-0.088	0.716	SPENCER	0.361
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	0.000	-0.088	0.713	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	0.361
ORDINARY/FELLEN IUS	0.000	-0.177	0.779	ORDINARY/FELL ENIUS	0.280

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA				SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	-0.502	-0.307	0.505	BISHOP	0.422
JAMBU	-0.460	-0.280	0.521	JAMBU	0.410
SPENCER	-0.490	-0.390	0.540	SPENCER	0.416
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	-0.490	-0.310	0.390	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	0.423
ORDINARY/FELLEN IUS	-0.490	-0.267	0.472	ORDINARY/FELL ENIUS	0.436

Fuente. Autor

Para la determinación de la influencia de los controles ambientales (revegetalización, canalización superficial y drenes de penetración horizontal) en la estabilidad de la ladera. Se presenta la tabla de la variación de los factores de seguridad, que se encuentran en función del nivel freático, determinado del análisis hidrogeológico para cada escenario planteado. De esta tabla se encuentra:

#### 4.5.7 Material Coluvial

Para este material caracterizado, se observa que para los escenarios 0 y 1 no se presenta variación de los resultados de estabilidad, debido principalmente a que no se presenta afectaciones por la saturación del material, ya que los niveles freáticos

se encuentran por debajo del material. Para el escenario 2, en relación al escenario 1, se evidencia una reducción de los factores de seguridad de 0.208 con la saturación de la parte baja del coluvión. En el escenario 3 que contempla las obras de prevención y mitigación se identifica el aumento de los factores de seguridad en 0.208, obteniendo la inestabilidad del material en estado seco. En los escenarios 4 y 5, se presenta la remoción del material Coluvial.

#### **4.5.8 Ladera alta.**

Al igual que el material Coluvial para los escenarios 0 y 1, no se presenta una variación en los factores de seguridad de la ladera alta. Ya que los niveles subterráneos no interactúan con las superficies de falla determinadas para este escenario. En relación de los escenario 1 a 2, se observa la disminución de los factores de seguridad en magnitudes muy bajas del orden de 0.058 por el método de Bishop adoptado, ya que solo se presenta el afloramiento del flujo subterráneo en el pie de ladera. Relacionando el escenario 2 que presenta los máximos flujos y el escenario 3 que contempla las obras de prevención y mitigación, se identifica un aumento considerable en la magnitud de los factores de seguridad, aumentando la estabilidad de la ladera, con dichas obras. Se identifican aumentos con magnitudes de 0.72 en el factor de seguridad, que representa un valor considerable en relación a la categorización de la amenaza, que categoriza laderas inestables con factores de seguridad inferiores a 1.5.

Se planteó el escenario 4 que contempla las obras de estabilización sin obras de mitigación ni prevención y el escenario 5 que contempla obras de prevención, mitigación y estabilización. Donde se encuentra que con la implantación de las obras ambientales de prevención y mitigación, se observan aumentos en los factores de seguridad del orden de 0.113 por el método de Bishop adoptado. Cabe resaltar que no se identifica una influencia considerable del flujo subterráneo a esta ladera alta, ya que no se presenta la saturación de la misma, sino que se presentan

afloramientos del flujo en el pie de la intervención. Sin embargo es importante recalcar que estas obras ambientales de prevención y mitigación minimizan las afectaciones a la estructura proyectada y garantiza un comportamiento eficiente y eficaz de las obras proyectadas.

#### **4.5.9 Ladera baja**

Sobre esta ladera baja, se identifica una alta influencia de los flujos subterráneos en la estabilidad de la ladera, se encontró la variación del nivel freático para los escenarios 0 y 1, determinando la disminución considerable de los factores de seguridad en hasta 0.5, identificando una influencia considerable del nivel freático en la estabilidad de la ladera. Relacionando los escenarios 1 y 2, también se observa la disminución del factor de seguridad en 0.307 relativamente. Observando que el flujo subterráneo influye considerablemente en la estabilidad de la ladera. Una vez implantadas las obras de prevención y mitigación relacionando los escenarios 2 y 3, se observa un aumento considerable en los factores de seguridad de 0.505 por el método de Bishop adoptado. Este aumento en los factores de seguridad, garantizan la estabilidad de la ladera baja. Finalmente para los modelos que relacionan los escenarios 4 y 5 se identifican aumentos de factores de seguridad de 0.422. Verificando que la ladera cumpla con la estabilidad requerida.

Según los análisis hidrogeológicos y geotécnicos de estabilidad, se determina que las obras ambientales de prevención y mitigación, por medio de la revegetalización de las zonas erosionadas, el control de los niveles de flujos superficiales y el control de los niveles subterráneos o freáticos, son indispensables en la proyección de obras geotécnicas e hidráulicas, para aumentar la estabilidad de las laderas y conservar un entorno ambiental acorde a los suelos identificados.

## **4.6 OBRAS GEOTÉCNICAS PROPUESTAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

De acuerdo al comportamiento determinado de los niveles subterráneos de flujo de agua (niveles freáticos), para los escenarios planteados donde se determinó el comportamiento del nivel freático para los 5 escenarios planteados, con el fin de identificar la influencia de este en la estabilidad geotécnica de la ladera para condiciones estáticas. También se presenta los resultados de estabilidad geotécnica de la sección tipo modelada, que categoriza la estabilidad y la amenaza de la ladera modelada, para los 5 escenarios planteados que son función del análisis hidrogeológico. Del análisis ambiental, geológico geotécnico y de los resultados obtenidos, se encontró la necesidad de implementar las siguientes obras ambientales, hidráulicas, geotécnicas y estructurales para garantizar la estabilidad de la ladera, y garantizar la eficiencia y eficacia en el tiempo de las obras proyectadas:

Con la alternativa 5 que contempla la totalidad de las obras ambientales, geotécnicas e hidráulicas, de prevención mitigación y estabilización. Se proyecta la construcción de las siguientes obras, definiendo su función en el modelo hidrogeológico, ambiental, geológico y geotécnico:

### **4.6.1 Revegetalización con pasto vetiver o geomanto permanente**

Se recomienda la revegetalización de las zonas intervenidas y aquellas que no cuenten con cobertura vegetal. La revegetalización tiene por objetivo crear una protección del suelo ante la erosión hídrica, producto de la erosión laminar, surcos y cárcavas principalmente, generada por las gotas de lluvia que golpean directamente al suelo, produciendo estos procesos de erosión, también genera una barrera impermeable que impide que las aguas se infiltren en el terreno en altos porcentajes aumentando los niveles de escorrentía del suelo, disminuyendo

considerablemente la infiltración de flujo de agua al sub suelo, además la vegetación requiere de agua para su crecimiento, generando que se alimenten de las aguas freáticas del terreno, disminuyendo la posición del nivel freático en caso que esté presente ascensos por efectos de la lluvia, como sistema de revegetalización, sobre el área analizada, se recomienda utilizar espolones de pasto Vetiver, este pasto cuenta con la especialidad que presenta raíces de hasta 5 metros, que funcionan como refuerzo del suelo superficial. En áreas semi verticales y con pendientes mayores a 60 grados, se recomienda la realización de un sistema de revegetalización con geo manto permanente, mediante la implementación de un geo manto permanente tipo Terratrac TRM 50 o similar, con abono fertilizado el suelo con gramíneas de raíces cortas. La revegetalización se proyecta sobre la ladera alta sobre la pantalla anclada proyectada, sobre las áreas de corte que queden expuestas a la erosión y sobre el cuerpo de la ladera baja.

#### **4.6.1.1 Efectos físicos de la vegetación**

- Desde el punto de vista físico, el papel que cumple la vegetación y los árboles en particular se puede resumir en los siguientes aspectos:
- Contención física al actuar como “pilotes o anclas”, ya que trabajan en sentido vertical o inclinado estableciendo “tejido o amarre” y por lo tanto minimizando el efecto de “rodadero” en el cual una masa o capa superior se desliza sobre otra inferior ayudada por la presencia del agua que hace las veces de lubricante.
- Disminuyendo la exposición de los suelos a los efectos provenientes del impacto vertical de la lluvia o por arrastre (escorrentía) del agua.
- “Impermeabilización” parcial de la superficie del terreno, desviando las corrientes o flujos de agua o disminuyendo significativamente la percolación.

□ Regular la saturación en el suelo, en la medida en que esta estrategia se considera necesaria, por ejemplo en laderas inclinadas con riesgo de deslizamiento por carga hidrostática.

□ Por tanto, la importancia de la vegetación radica en la protección física que le otorga al suelo, por medio de la interceptación directa de la precipitación, o a través de la hojarasca, que protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia y su rugosidad sobre la escorrentía superficial. En el mejoramiento de las características mecánicas del suelo, proporcionando mayor refuerzo a través del sistema radicular y modificando propiedades de los suelos como estructura y permeabilidad, entre otras.

#### **4.6.1.2 Descripción**

Esta especificación se refiere al uso e instalación de un suelo orgánico para control de erosión que facilite el establecimiento de la vegetación natural en la cara de los taludes o laderas erosionadas del proyecto, que no cuenten con una cobertura vegetal, las cuales deben ser geotécnicamente estables.

Sobre las zonas de la ladera alta y baja del perfil modelado, se recomienda adelantar un proceso de revegetalización, por medio de la siembra de pasto Vetiever, pasto elefante o similar de raíces largas, ubicados en forma de tres bolillos cada 30 centímetros. Se debe inicialmente ubicar como mínimo 7 centímetros de suelo orgánico, y la siembra de los estolones de pasto vetiever.

Para las zonas erosionadas con pendientes superiores a 60°, se recomienda realizar un control de erosión y revegetalización por medio de un geo manto permanente tipo Terratrac TRM 50 o similar, bajo este manto permanente y antes de su instalación, se deben ubicar como mínimo 5 centímetros de suelo orgánico con semillas gramíneas, maní forrajero o similar, que presente raíces medias y

cortas. Se debe realizar el anclado de este geo manto por medio de pernos de anclaje cada metro.

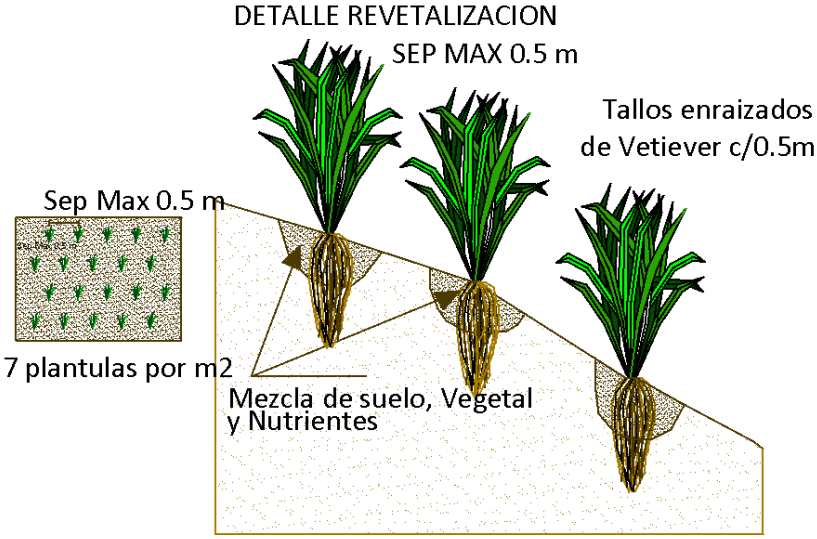
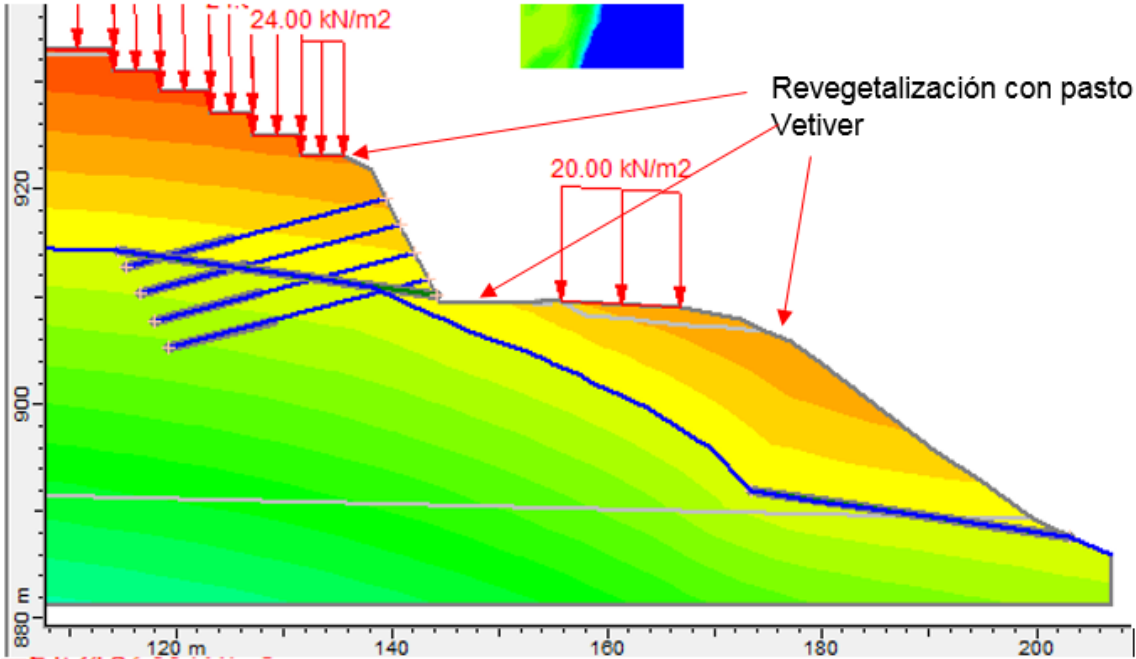
#### 4.6.1.3 Esquema de diseño

Figura 120. Diagrama de siembra con gramíneas



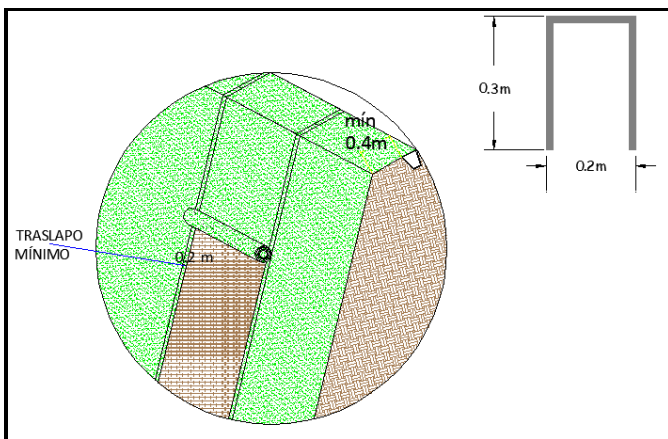
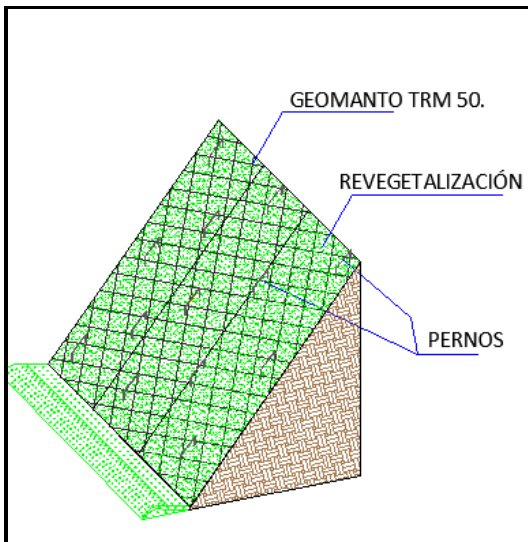
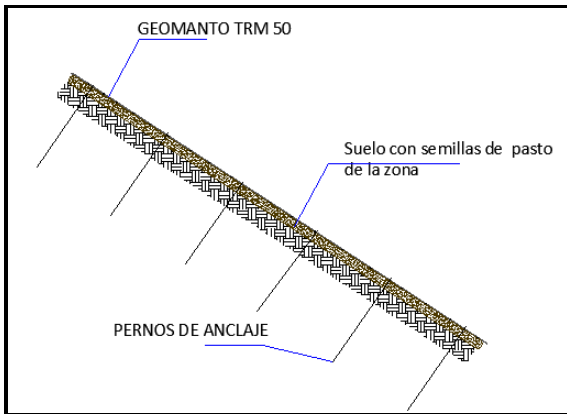
Fuente. Autor

Figura 121. Diagrama de siembra de pasto Vetiver



Fuente. Autor

Figura 122. Diagrama de siembra geo manto permanente Terratrac TRM 50 o similar



Fuente. Geomatrix.

## **4.6.2 Canaletas flexibles en sacos de suelo cemento**

Estas canaletas flexibles, cumplen la función de recolectar las aguas de escorrentía superficial y la proveniente de los drenes de penetración horizontal, para la conducción de estas por las pendientes bajas, sobre los extremos de la vía, recopilando las aguas del bombeo de la vía y de la proveniente de la ladera alta, mediante el discurrir sobre la revegetalización y la pantalla proyectada, estas canaletas deben entregar sus aguas a un lugar seguro, generalmente sobre los pozos y alcantarillas que atraviesan la vía, y luego sobre canales disipadores de energía para transportarla sobre áreas de alta pendiente y finalmente entregarlas a un lugar seguro, principalmente canales naturales.

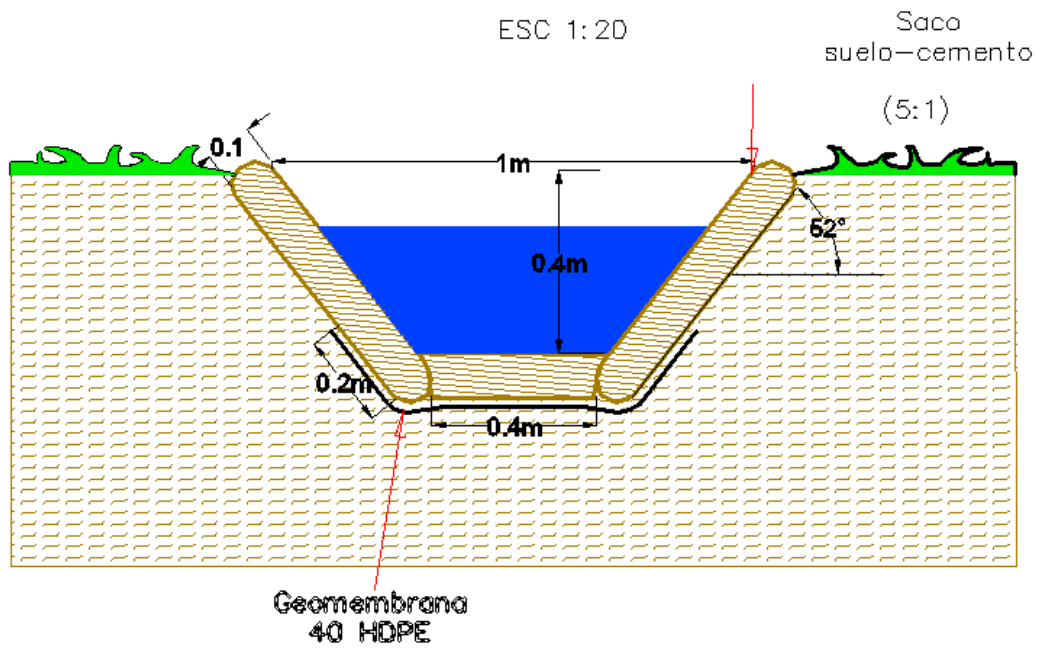
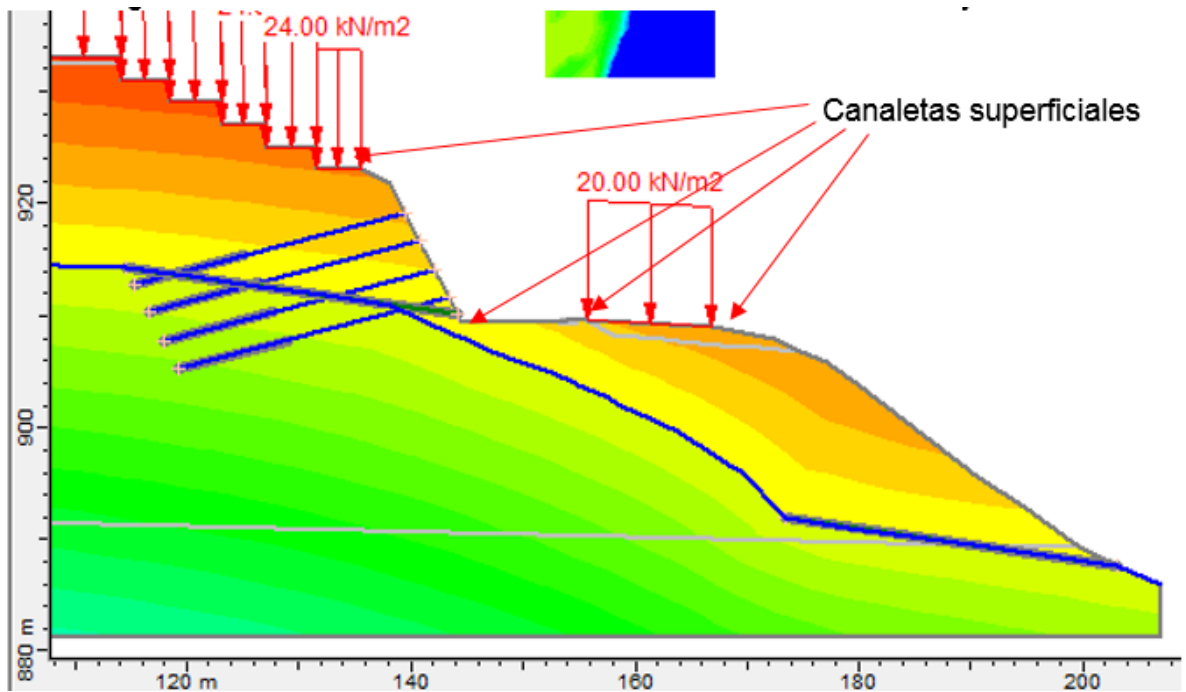
### **4.6.2.1 Descripción**

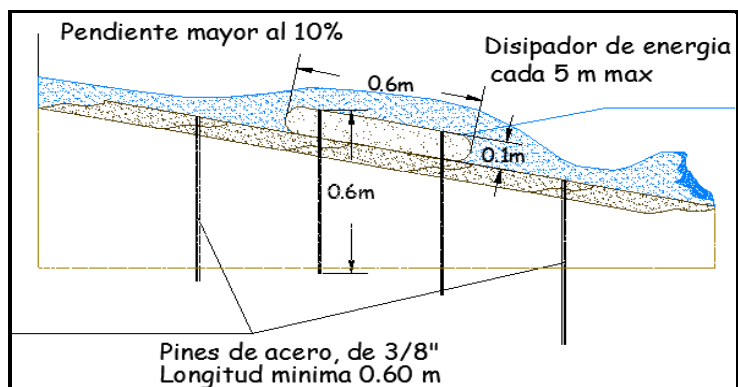
Para la recolección de las aguas superficiales de escorrentía en la corona de la ladera, sobre la banca interna y externa de la vía y en la entrega de los drenes de penetración, se plantea la construcción de canaletas superficiales en sacos de suelo cemento, cerciorándose de ubicar una geo membrana bajo la canaleta, para evitar cualquier posible infiltración al sub suelo. Se recomienda acondicionar inicialmente el terreno de cimentación de la estructura, utilizando materiales compactados en caso de encontrar suelos sueltos.

Este trabajo consiste en el transporte, suministro, elaboración, manejo, almacenamiento y colocación de los materiales de construcción de las cunetas flexibles construidas en sitio, incluyendo las operaciones de alineamiento, excavación y conformación de la sección, las cuales se realizan para controlar las aguas superficiales y de escorrentía que se presentan en la zona, ya que con esto garantizamos la disminución de la erosión e infiltración del agua dentro del subsuelo. A continuación se presenta la geometría de las canaletas.

#### 4.6.2.2 Esquema de diseño

Figura 123. Canaletas en suelo cemento





Fuente. Autor

### 4.6.3 Canaletas disipadoras en concreto reforzado

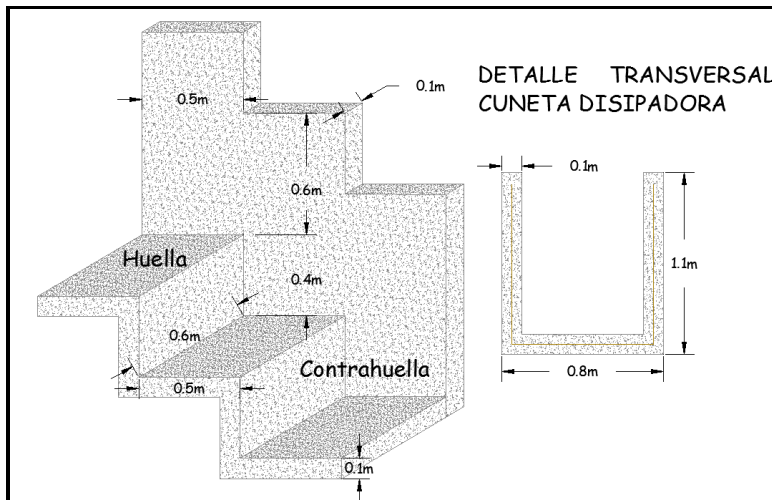
son estructuras en concreto reforzado, que cumplen la función de transportar los flujos superficiales en las áreas de alta pendiente y entregan estas sobre el sector bajo de la ladera entregando las aguas superficiales a los drenajes naturales encontrados en el área.

#### 4.6.3.1 Descripción

Este trabajo consiste en el suministro y transporte de materiales y la construcción de canaletas disipadora en concreto reforzado, con el objetivo de dar control a las aguas de escorrentía sobre las zonas de pendiente, conforme lo indique la Interventoría. Estas actividades tendrán supervisión constante por parte del Supervisor de Obra civil, EL CONTRATISTA. Para la entrega de las aguas superficiales, recolectadas por las canaletas flexibles desde la parte alta de la ladera, se recomienda la implantación de canaletas disipadoras rígidas en concreto reforzado, ubicadas en las zonas de alta pendiente superiores a 15%, para posteriormente entregarlas a un lugar seguro (alcantarilla o drenaje natural). Estas canaletas deben contar con forma escalonada con ancho de 0.60 metros, huella de 0.50 metros, contrahuella de 0.40 metros (máx. 0.5m) y la pared a 90° con una altura de 0.80 metros como se muestra en la siguiente figura

#### 4.6.3.2 Esquema de diseño

Figura 124. Detalle cuneta disipadora en concreto



Fuente. Autor

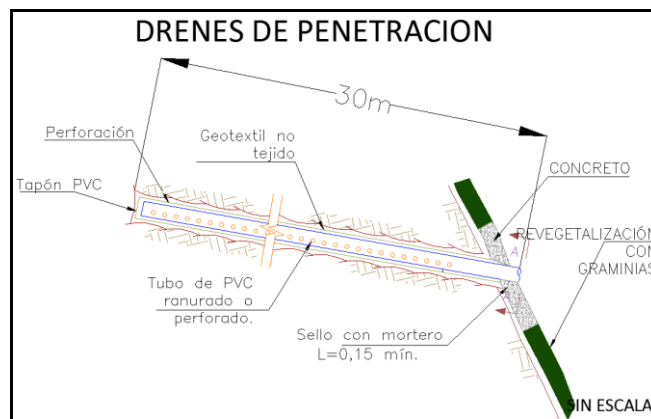
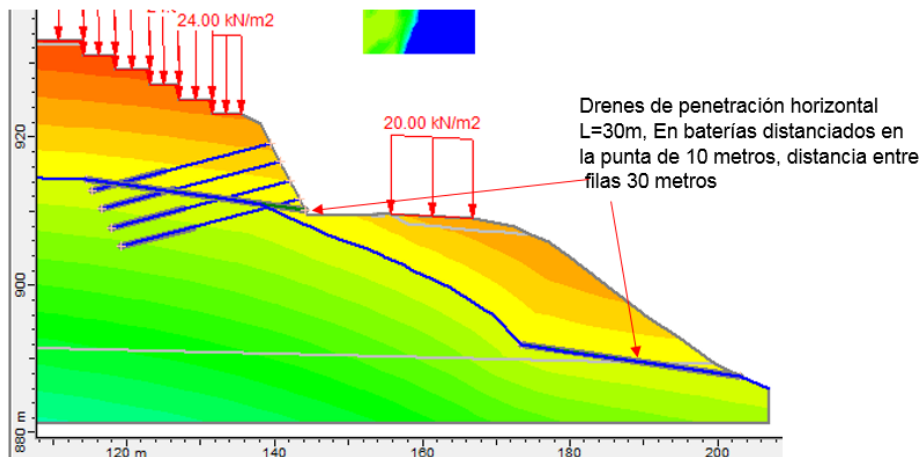
#### 4.6.4 Baterías de drenes de penetración horizontal

Se ubicaran las baterías de drenes sobre los escarpes de las laderas, ubicados en fila sobre el margen interno de la vía que colinda con la ladera alta, que tienen la función de extraer los niveles freáticos sobre esta. La otra fila de batería de drenes, se ubica en el pie de la ladera baja, y cumple la función de controlar estos niveles de flujo subterráneo de agua, sobre la ladera baja, conservando la ladera semi seca en épocas de ascenso máximo de nivel freáticos, la condición semi seca genera un aumento en las propiedades geotécnicas del suelo, disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de superficies de falla en la ladera.

Ver especificación técnica drenes horizontales Artículo 674-07 INVIAS

#### 4.6.4.1 Esquema de diseño

Figura 125. Baterías de Drenes de Penetración horizontal



Fuente. Autor

#### 4.6.5 Filtros en material granular

Estos filtros se ubican bajo las canaletas y sirven para la protección de la capa de pavimento, aportan al abatimiento de los niveles freáticos superficiales, permiten el control de los niveles freáticos en las zonas semi planas, donde no es viable la implementación de drenes de penetración horizontal.

Se propone el uso de Geodrenes como filtros para canales ya que es una excelente alternativa para el manejo de los fluidos, porque permite captarlos y conducirlos de

una manera rápida y eficiente, disminuyendo notablemente el tiempo de construcción de los subdrenes por su facilidad de instalación.

Para el sistema de drenaje con geodren, la función de filtración la desempeña el geotextil no tejido punzonado por agujajes. El medio drenante, el cual es encargado de captar y conducir el agua a través del filtro es desempeñado por un elemento sintético que se conoce como geo-red, estos se ubicaran bajo las canaletas a borde de via, conservando la integridad de esta.

Para el presente proyecto se usaran geodrenes planares y circulares PAVCO o similar con tubería de 4" de diámetros que se deberán conectar al sistema de drenaje del sector. Un esquema básico de estos filtros se presenta a continuación

#### 4.6.5.1 Esquema de diseño

Figura 126. Sistema Geodren

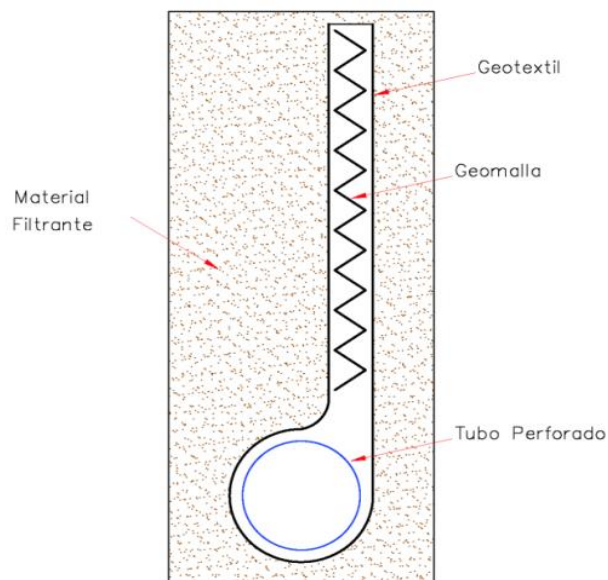


DIAGRAMA DE GEODREN

Fuente: Pavco

- La gradación del material filtrante a emplear para el sistema de drenaje de los muros deberá seguir lo establecido en la Norma INVIAS 673.
- El Geodren estará compuesto por un Geodren planar y un Geodren circular que deberá llevar una tubería circular perforada de diámetros no menor 4”.
- El geotextil usado para conformar el geodren debe ser de tipo no tejido PAVCO NT 3000 o similar.

#### **4.6.6 Pantalla anclada flexible**

Sobre la ladera alta, se proyecta la construcción de una pantalla anclada flexible cubierta con malla y mortero de aproximadamente 14 metros, reforzada mediante anclajes activos, tensionados 20 toneladas, a una inclinación de 15 grados, con longitud de bulbo de 40%, longitud Libre de 60%, con una longitud total de 25 metros. Se proyectan 4 filas de anclajes separados verticalmente cada 2,5 metros y horizontalmente cada 2 metros. Esta pantalla es la obra de estabilización de la ladera alta, ya que presenta una evidente inestabilidad para las condiciones críticas modeladas.

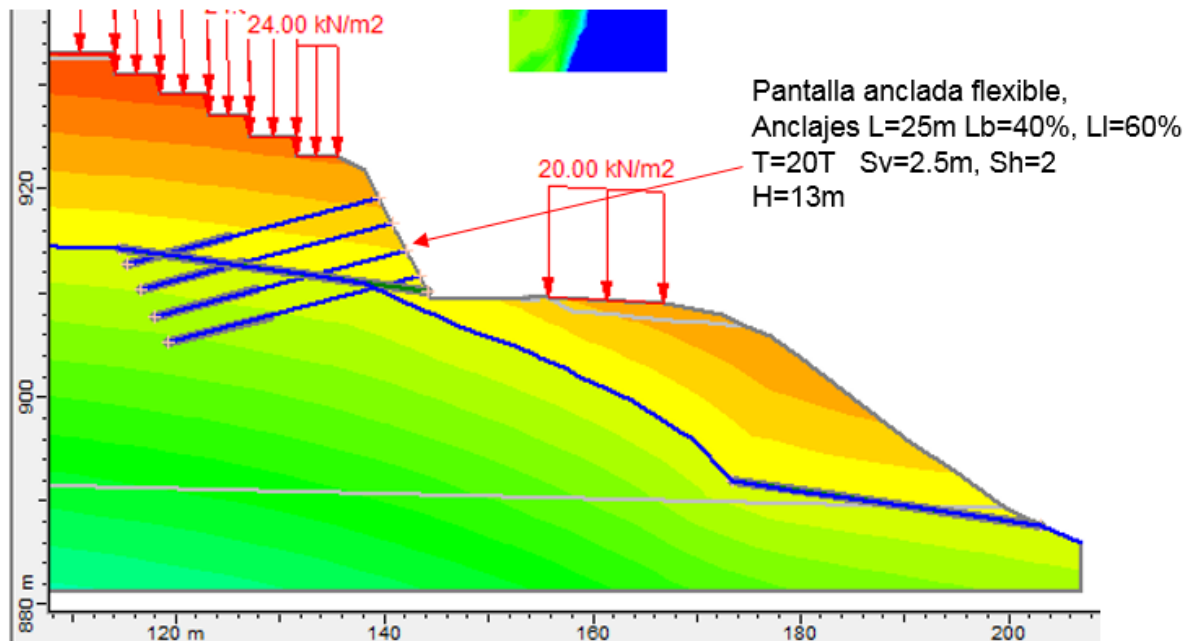
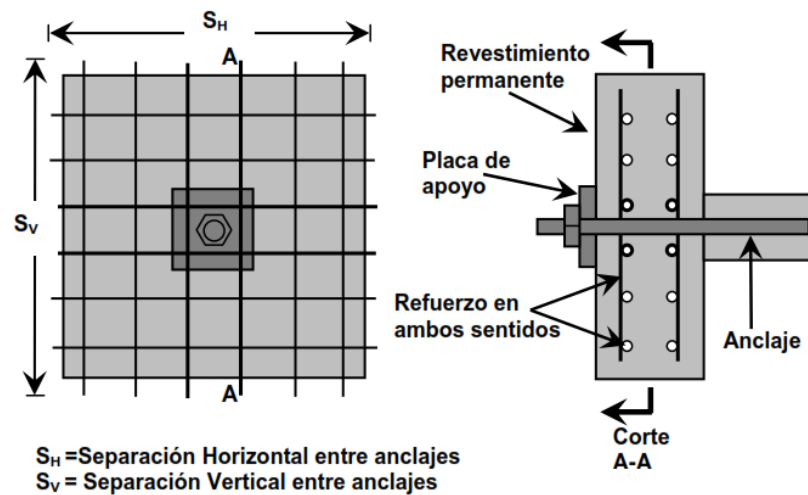
##### **4.6.6.1 Descripción**

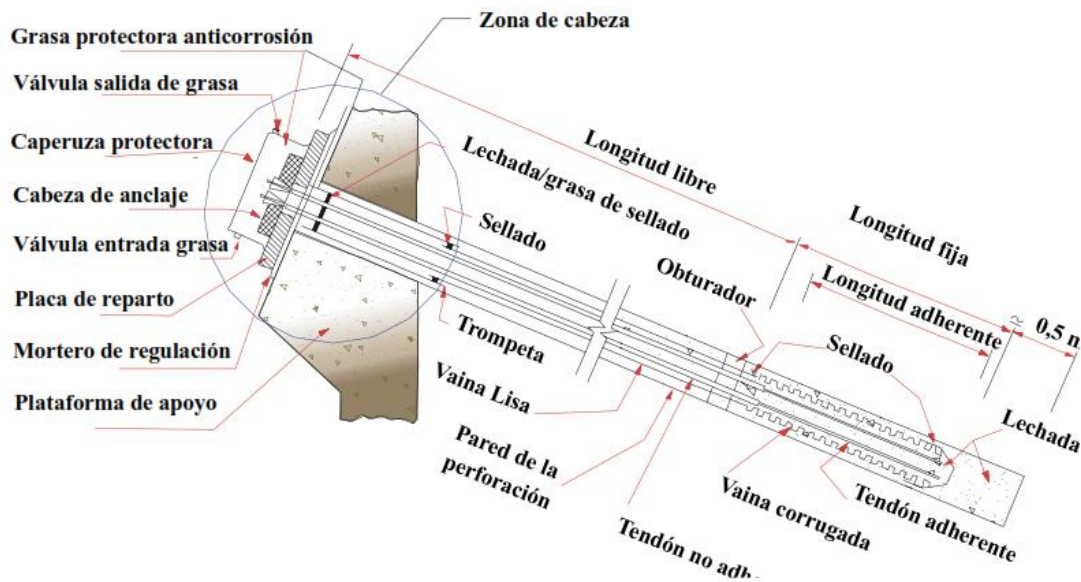
Las pantallas ancladas son estructuras que consisten en la perforación e inclusión de acero dentro del suelo, las cuales comúnmente se inyectan con una lechada de concreto para formar bulbos de anclaje, las cuales son muy efectivas cuando hay roca para realizar el anclaje, teniendo en cuenta la dificultad para realizar cortes con pendientes verticales, se decide proponer este tipo de estructura por su construcción, la cual se puede realizar inicialmente con cortes de una altura de 1.5 metros e ir realizando la pantalla anclada desde la parte superior del talud, después

de construido el primer módulo, se sigue excavando hacia abajo del corte para realizar los siguientes modelos de la pantalla.

#### 4.6.6.2 Esquema de diseño

Figura 127. Pantalla Anclada flexible con cubrimiento de malla y mortero





Fuente: Autor FHWA

#### 4.6.6.3 Anclajes

Los anclajes deberán realizarse, siguiendo el procedimiento convencional para este tipo de trabajos, el cual comprende básicamente las siguientes actividades: Perforación, armado e instalación, llenado e inyección, tensionamiento de los elementos a las cargas especificadas y finalmente prueba de carga a 1.5 veces la carga de trabajo. La localización de los elementos, orientación e inclinación, se realizará según con lo establecido en los planos de diseño definitivo de las pantallas, y según la materialización respectiva realizada en campo, previamente se tiene que seguir las especificaciones realizadas por el ingeniero diseñador estructural.

#### 4.6.7 Movimiento de tierra

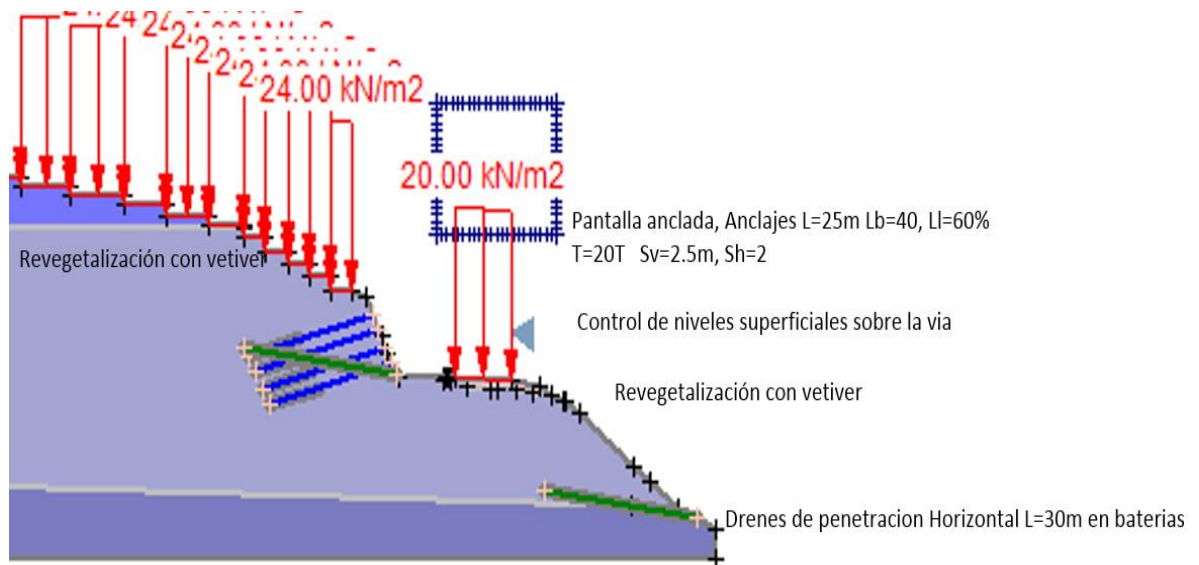
Los movimientos de tierra para el sector adyacente al margen izquierdo de la vía, presentado en el perfil tipo, se proyecta la remoción del material Coluvial y la

conformación de la superficie, mediante un perfilado con una pendiente de 60°, para la implementación de la pantalla anclada flexible, cubierta con malla y mortero, corte del material existente en el margen izquierdo del perfil tipo y corte del material existente para la construcción de las pantallas ancladas.

Volumen de Cortes para construcción de pantallas ancladas

Rellenos con Material seleccionado

Figura 128. Obras geotécnicas en perfil

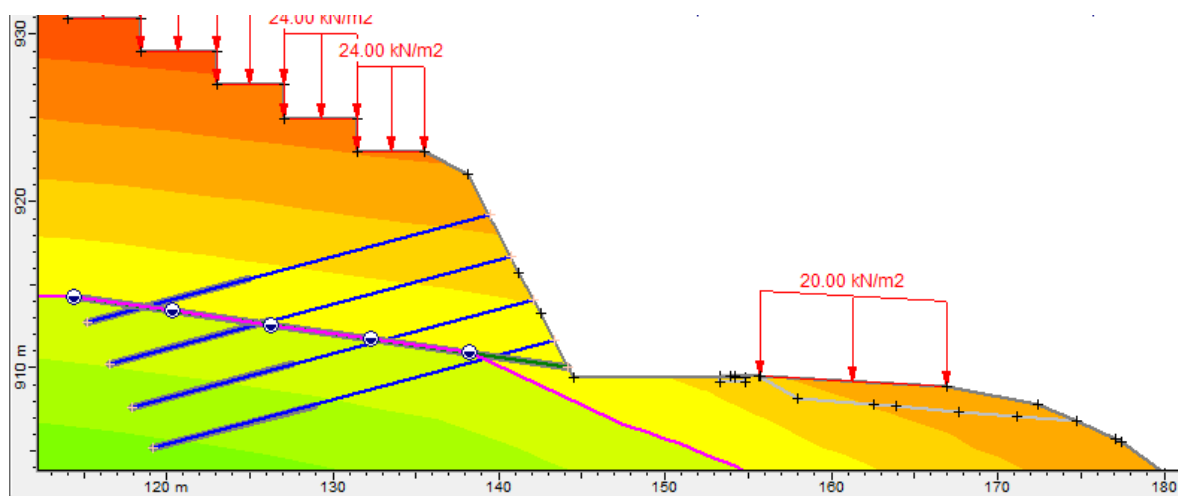


Fuente: Autor.

#### 4.6.7.1 Conformación de la superficie

Se recomienda realizar la conformación de la superficie por medio de perfilados de ladera anclados mediante la pantalla anclada proyectada, se proyecta un perfilado de 60° a 30 metros de la vía, contando con una altura de 14 metros aproximadamente.

Figura 129. Conformación de la superficie



Fuente. Autor.

## 5. CONCLUSIONES

- Del trabajo de campo realizado, se caracterizaron y se cartografiaron 5 unidades geológicas superficiales a escala detallada, de acuerdo a las características físico-mecánicas de los diferentes materiales, encontrando suelos del Miembro Órganos (Sft3), suelos gravosos del Miembro Gravoso (Sft2), suelos del miembro Limos Rojos (Sft1), suelos Coluviales (Sco1) y finalmente suelos de relleno antrópico (Botaderos) (Sla), estos últimos no cartografiables debido a su pequeña extensión.
- Como resultado del levantamiento geológico realizado, se identificaron diversas geoformas de origen fluvial como la Superficie del abanico de Bucaramanga (F7); geoformas de origen denudacional como lomos ancho (D4), laderas subhorizontales (D6), escarpes denudacionales (D7), laderas muy inclinadas (D10), laderas moderadas (D11), escarpe de corona principal de movimiento en masa (D14), cuerpo o depósito de movimiento en masa (D15); y geoformas de origen antropogénico como obras de ingeniería (A7) y laderas explanadas (A9).
- Dentro del área de estudio se obtuvieron una totalidad de 6 tipos de coberturas, dentro de las cuales se encuentran construcciones urbanas (Cu), construcciones rurales (Cr), Pastos y árboles (Pa), Pastos naturales (Pn), Rastrojos bajos (Rb), cultivos (Ct) y suelos desnudos (Sd).
- Los suelos encontrados en la zona de estudio, en general se consideran matriz – soportados consolidados, en los cuales se hallan cantos redondeados de 10 cm a bloques que en algunos casos sus dimensiones pueden ser superiores al metro (1.0 m), la matriz se caracteriza por presentar contenidos de grava inferiores a 20% en la mayoría de los ensayos registrados. En general esta matriz tiene un comportamiento cohesivo y se

encuentra consolidada, ya que el contenido de material fino en ninguno de los casos es inferior al 30%, aunque presenta índices plásticos inferiores a 10% y Límites Líquidos inferiores a 30% y su coloración presenta tintes marrones y grises que se oxidan por el contenido de humedad, así mismo estas características cohesivas hacen que en el sector no se presenten evidencia de erosión.

- El muestreo obtenido en los sondeos ejecutados durante la exploración de campo, se realizó de acuerdo a intervalos de profundidad, basados en las características estratigráficas del sector. Dichos intervalos se dividieron en profundidades de 5.0 m cada uno, en los cuales se obtuvieron diferentes muestras; durante el análisis de clasificación y tomando como base los ensayos de granulometría y límites, se encontraron suelos en su mayoría Areno-Arcillosos (39 %), Arcillosos de baja plasticidad (27%), Areno-limosos (10%), Gravo arcillosos (9%) y Arena arcillo-limosa (8%), el 7% restante varía entre los demás materiales.
- De acuerdo a los ensayos de resistencia realizados en las 57 muestras recolectadas de las 19 exploraciones de campo y 20 apiques, se determinó para el miembro limos rojos (Sfl2) en 5 muestras, un ángulo de fricción promedio de 37,48° y una cohesión promedio de 0,47 kg/cm<sup>2</sup>; para el miembro gravoso (Sft2) en 26 muestras, un ángulo de fricción promedio de 36,22° y una cohesión promedio de 0,46 kg/cm<sup>2</sup>; para el miembro órganos (Sft3) más arenoso en 7 muestras, un ángulo de fricción promedio de 36,07° y una cohesión promedio de 0,49 kg/cm<sup>2</sup>; para miembro órganos (Sft3) más arcilloso en 10 muestras, un ángulo de fricción promedio de 30,93° y una cohesión promedio de 0,62 kg/cm<sup>2</sup>; para el coluvión (Sco) en 6 muestras un ángulo de fricción promedio de 24,56° y una cohesión promedio de 0,23 kg/cm<sup>2</sup>; y por ultimo para el material de relleno en 4 muestras, se determinó un ángulo de fricción promedio de 27,03° y una cohesión promedio de 0,36 kg/cm<sup>2</sup>.

- Del Análisis de sensibilidad del modelo geológico geotécnico en función del nivel freático en condición estática para cada escenario se encontró que:
  - En el escenario 0, se toma en cuenta el nivel promedio de los piezómetros; y se determinó la ubicación del nivel freático, encontrándolo en el sector bajo en aproximadamente 13 a 15 metros bajo la vía. No se evidencia la saturación de la parte baja de la ladera, donde se encuentra la vía, que conduce al municipio de Matanza, Santander.
  - En el escenario 1, nivel máximo de los niveles de los piezómetros; se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, en aproximadamente 8 metros sobre la parte baja de la ladera, saturando parcialmente la ladera baja. Se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos en el pie de ladera, requiriéndose la necesidad de controlar estos afloramientos de flujos subterráneos, con el fin de evitar fallas de laderas por saturación.
  - En el escenario 2, flujos máximos probables; se determinó el comportamiento del nivel freático, encontrando, que se presenta el aumento del flujo subterráneo, saturando la parte interna de la ladera, sobre el material coluvial encontrando, y saturando la ladera baja, donde se encuentra la vía. Se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos en la parte interna de la ladera y el pie de esta, requiriéndose la necesidad de controlar estos afloramientos de flujos subterráneos, con el fin de evitar fallas de laderas por saturación.
  - En el escenario 3, flujos máximos probables con obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel

freático, controlado mediante la mitigación de la infiltración del flujo al suelo. Con las obras proyectadas, se evidencia el control de los niveles freáticos sobre la ladera y depositando los flujos a la parte baja de la ladera. El afloramiento de los niveles freáticos, se presentan bajo el nivel de los drenes de penetración horizontal.

- En el escenario 4, flujos máximos probables con obras de estabilización mediante la realización de una pantalla anclada flexible de 4 anclajes de 25 metros con 40% bulbo y 60% Longitud libre, tensionadas a 20 T, cada 2.5 metros en sentido vertical y 2 metros en sentido horizontal, sin obras de prevención ni mitigación, mediante la revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; de este escenario se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático. Del modelo hidrogeológico, se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos, sobre el pie de la ladera alta, y saturando por completo la ladera baja.
- En el escenario 5 flujos máximos probables con obras de estabilización mediante la realización de una pantalla anclada flexible de 4 anclajes de 25 metros con 40% bulbo y 60% Longitud libre, tensionadas a 20 T, cada 2.5 metros en sentido horizontal y 2.5 metros en sentido vertical, con obras de prevención y mitigación, mediante, revegetalización, canaletas superficiales y drenes de penetración horizontal; se determinó el comportamiento del nivel freático para las condiciones de frontera, tomando el ascenso máximo del nivel freático . Del modelo hidrogeológico, se evidencia el afloramiento de los niveles freáticos, sobre el pie de la ladera alta, y saturando por completo la ladera baja.

- Del Análisis de estabilidad geotécnica y amenaza en función del nivel freático en condición estática para cada escenario ,se determinó la variación de la influencia de los factores de seguridad como se presenta a continuación:

SUPERFICIES DE FALLA COLUVION				SUPERFICIES DE FALLA COLUVION	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	0.000	-0.208	0.208	BISHOP	
JAMBU	0.000	-0.168	0.168	JAMBU	
SPENCER	0.000	-0.099	0.099	SPENCER	
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	0.000	-0.061	0.061	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	
ORDINARY/FELLEN US	0.000	-0.199	0.199	ORDINARY/FELL ENIUS	

SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA				SUPERFICIES DE FALLA LADERA ALTA	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	0.000	-0.058	0.722	BISHOP	0.113
JAMBU	0.000	-0.116	0.736	JAMBU	0.263
SPENCER	0.000	-0.088	0.716	SPENCER	0.361
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	0.000	-0.088	0.713	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	0.361
ORDINARY/FELLEN US	0.000	-0.177	0.779	ORDINARY/FELL ENIUS	0.280

SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA				SUPERFICIES DE FALLA LADERA BAJA	
METODO	D0-1	D1-2	D2-3	METODO	D4-5
BISHOP	-0.502	-0.307	0.505	BISHOP	0.422
JAMBU	-0.460	-0.280	0.521	JAMBU	0.410
SPENCER	-0.490	-0.390	0.540	SPENCER	0.416
GLE/MORGENSTER N AND PRICE	-0.490	-0.310	0.390	GLE/MORGENST ERN AND PRICE	0.423
ORDINARY/FELLEN US	-0.490	-0.267	0.472	ORDINARY/FELL ENIUS	0.436

- Del estudio realizado se puede concluir que es necesario mantener un equilibrio entre los sistemas de control de erosión( mediante el uso de siembra de vetiver y arbolización ) y la estabilidad geotécnica de la ladera que representa un elemento para la determinación del riesgo por fenómenos de remoción en masa, el cual representa un problema ambiental y social.
- Es importante tener en cuenta las condiciones adversas en los sistemas de revegetalización que generan erosión sobre los escarpes cuando no se les da un debido tratamiento, por esta razón es importante controlar y distribuir adecuadamente los niveles de flujo superficial sobre la ladera sus elementos

de control y sobre el sistema de revegetalización con el fin de mantenerlo hidratado.

- Es necesario realizar un control de los niveles freáticos con el fin de evitar inestabilidades de la ladera generando problemas de riego ambiental por desastres.

## BIBLIOGRAFÍA

ALFARO CASTILLO, José Andrés. Correlación entre el valor N del Ensayo de Penetración Estandar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Épsilon. Enero-junio, 2007, no. 008, p. 13-23.

Área Metropolitana de Bucaramanga. ("...") [en línea] s.f. [citado en 19 agosto de 2012] Jurisdicción. Localización. Disponible en World Wide Web:<http://www.amb.gov.co/jurisdiccion.html>

Bucaramanga, Colombia. En: Revista de la Academica Colombiana de Ciencias. Junio, 1999. vol 23, p. 244.

CASSAN, Maurice. Los Ensayos "in Situ" en la Mecánica Del Suelos. vol. 1, 156 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 926 (19, marzo, 2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2010. no. 47663. p. A-22 - A-23, H-1.

CONSORCIO M&CI, Estudio de actualización plan general para el control de la erosión en el municipio de Bucaramanga. CDMB, 2009.

En: Vanguardia Liberal, Bucaramanga. 30, julio, 1967. 8 p. Citado por SALCEDO HURTADO, Elkin de Jesús. Estudios de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga, Colombia. En: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias. Junio, 1999. vol 23, p. 244.

González, Luis et al. Ingeniería Geológica. España: Pearson Educación, 2012. p. 339-340. ISBN 84-205-3104-9.

INGEOMINAS, Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área metropolitana de Bucaramanga. Fase II. Convenio realizado entre la Gobernación de Santander e INGEOMINAS. Bogotá. Junio, 2001.

Medio país se sacudió con un temblor de 6.5 grados en la Escala de Richter. Nos salvamos de una tragedia. En: Vanguardia Liberal, Bucaramanga. 09, noviembre, 1999. 3 sec. p. 2B. ISSN 0122-7319

OHTA, Yukata. y GOTO, Noritoshi. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. En: Earthquake Engineering and Structural Dynamics-1978. vol. 6, p. 167-187.

Reportan daños menores en Bucaramanga tras fuerte temblor [en línea]. Vanguardia Liberal.14, febrero, 2012. s.f. [citado en 1 junio de 2012] Disponible en World Wide Web: <http://www.vanguardia.com/santander/region/144937-reportan-danos-menores-en-bucaramanga-tras-fuerte-temblor>

Ríonegro. Municipio en el país. Santander [en línea] s.f. [citado en 10 agosto de 2012] Disponible en versión HTML <<http://rionegro-santander.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mmxx-1-&x=1363665>>

SALCEDO HURTADO, Elkin de Jesús. Estudios de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga, Colombia. En: Revista de la Académica Colombiana de Ciencias. Junio, 1999. vol 23, p. 234.

SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica.. Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 1995. p 86-90. ISBN 958-9057-49-7.

Servicio Geológico Colombiano. Terremoto de Quindío [en línea]. s.f.[citado en 25 de junio de 2012] Calendario de eventos. Sismo del 25 de enero de 1999. Disponible en versión HTML <[http://seisan.ingegominas.gov.co/RSNC/index.php?option=com\\_jevents&task=icalrepeat.detail&evid=253&Itemid=0&year=2013&month=01&day=25&uid=c0f4c2eb856537df913ddd5afecd9f0e](http://seisan.ingegominas.gov.co/RSNC/index.php?option=com_jevents&task=icalrepeat.detail&evid=253&Itemid=0&year=2013&month=01&day=25&uid=c0f4c2eb856537df913ddd5afecd9f0e)>

SRBULOV, Milutin. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples. Springer: 2010. (Serie Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering; vol. 12) ISBN 978-90-481-9081-2.

SUÁREZ, Diaz Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Instituto de investigación, 1998

SUÁREZ, Diaz Jaime. Deslizamientos Análisis Geotécnico, UIS, 2009

United States Geological Survey. Seismic Wave [online]. s.f. update, 18 july 2012 [cited 02 august 2012 ]. Earthquakes Hazards Program. Earthquake Glossary. Available from HTML: <<http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=seismic%20wave>>